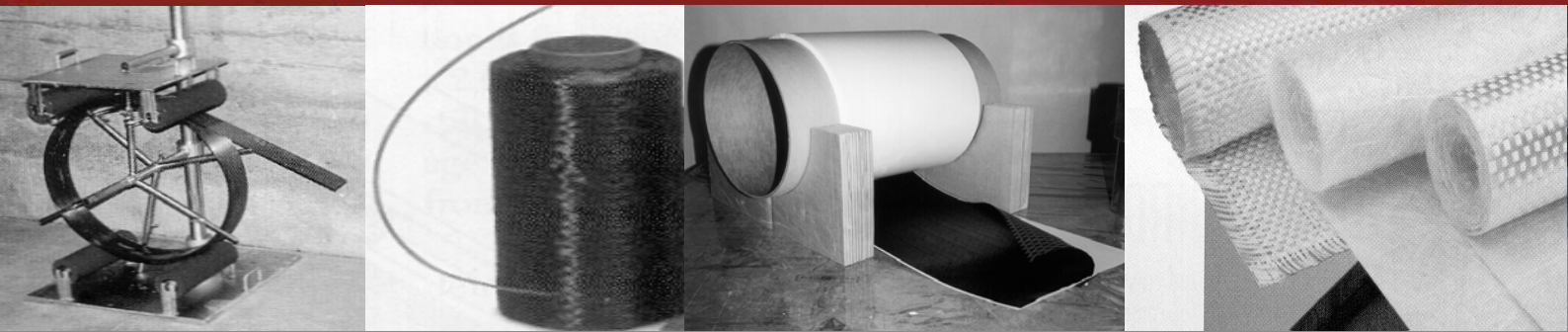




Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

**FEUP**



## Reforço e Reabilitação de Estruturas de Betão Usando Materiais Compósitos de "CFRP"

Strengthening and Rehabilitation of Concrete Structures  
with Composite Materials of "CFRP"

Luís Filipe Pereira Juvandes

FEUP, 1999



**UNIVERSIDADE DO PORTO**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA**  
**Departamento de Engenharia Civil (DEC)**

**REFORÇO E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS DE BETÃO**  
**USANDO MATERIAIS COMPÓSITOS DE "CFRP"**

Luís Filipe Pereira Juvandes

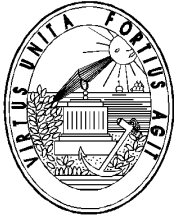
Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil e avaliada pelo Júri constituído por:

Presidente: Doutor Carlos Albino Veiga da Costa (UP)  
Vogais: Doutor Júlio António da Silva Appleton (IST)  
Doutor Raúl Alberto de Oliveira Pinheiro Torres (FEUP)  
Doutor Manuel Américo Gonçalves da Silva (FCTUNL)  
Doutor Manuel Carlos de Azeredo e Melo (FEUP)  
Doutor Joaquim Azevedo Figueiras (FEUP)  
Doutor António Torres Marques (FEUP)  
Engenheiro José Manuel Rosado Catarino (LNEC)

Setembro de 1999

Copyright © 1999  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
Rua dos Bragas, 4050-123 PORTO, Portugal  
[www.fe.up.pt](http://www.fe.up.pt)  
e-mail: [juvandes@fe.up.pt](mailto:juvandes@fe.up.pt)

Todos os direitos reservados, incluindo os direitos de reprodução e uso sob qualquer forma ou meio, nomeadamente, reprodução em cópia ou oral, sem a expressa autorização do autor, estão sujeitos ao estabelecido na Lei dos Direitos de Propriedade.



**UNIVERSITY OF PORTO**  
**FACULTY OF ENGINEERING (FEUP)**  
**Division of Civil Engineering (DEC)**

**STRENGTHENING AND REHABILITATION OF CONCRETE  
STRUCTURES WITH COMPOSITE MATERIALS OF "CFRP"**

Luís Filipe Pereira Juvandes

A Dissertation submitted to the "*Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP)*" to  
achieve the Degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering

Juries:

Chairman: Doutor Carlos Albino Veiga da Costa (UP)  
Members: Doutor Júlio António da Silva Appleton (IST)  
Doutor Raúl Alberto de Oliveira Pinheiro Torres (FEUP)  
Doutor Manuel Américo Gonçalves da Silva (FCTUNL)  
Doutor Manuel Carlos de Azeredo e Melo (FEUP)  
Doutor Joaquim Azevedo Figueiras (FEUP)  
Doutor António Torres Marques (FEUP)  
Engenheiro José Manuel Rosado Catarino (LNEC)

September 1999



Copyright © 1999  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
Departamento de Engenharia Civil  
Rua dos Bragas, 4050 123 PORTO  
Portugal  
[www.fe.up.pt](http://www.fe.up.pt)

Brief quotation from this dissertation are allowable without special permission, provided that accurate acknowledgement of source is made. Requests for permission for extended quotation from or reproduction of this manuscript in whole or in part may be granted by the head of the major department or the Dean of the Graduate College when in his or her judgment the proposed use of the material is in the interests of scholarship. In all other instances, however, permission must be obtained from the author.

e-mail: [juvandes@fe.up.pt](mailto:juvandes@fe.up.pt)

*À Mité e Inês*

*"...Tenho sempre presente seis princípios,  
e eles ensinam-me tudo o que eu sei.  
Os seus nomes são como, onde, o quê,  
porquê, quando e quem..."*

Rudyard Kipling 1865-1936

# Agradecimentos

---

No culminar deste trabalho, desejo exprimir o meu reconhecimento às pessoas ou entidades, que das mais variadas formas contribuíram para que fossem atingidos os objectivos propostos.

A tese foi desenvolvida no Departamento de Engenharia Civil (DECivil) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), sendo parte significativa do trabalho de carácter experimental realizado no Laboratório de Estruturas (LE) e com o apoio do Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção (LEMC) e da Unidade de Materiais Compósitos do Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (CEMACOM - INEGI). A estas instituições agradeço os meios colocados à minha disposição.

Ao Professor Joaquim Azevedo Figueiras, sob cuja orientação decorreu a realização deste trabalho, quero expressar o meu profundo agradecimento pelos seus ensinamentos, rigor científico, revisão crítica, disponibilidade, amizade e incentivos sempre permanentes.

Ao Professor António Torres Marques, co-orientador desta dissertação, gostaria de manifestar, igualmente, a minha gratidão pelo conhecimento transmitido na área dos materiais compósitos e pelo seu empenho, dedicação e pela forma pronta e franca como colocou à minha disposição os recursos da Unidade de Materiais Compósitos do INEGI.

Do mesmo modo, o meu reconhecimento dirige-se para o Professor Sami Rizkalla da Universidade de Manitoba e Presidente da ISIS Canadá, para o Doutor Martin Deuring da empresa Dr. Deuring + Oehninger AG (Suíça), para o Doutor Heinz Meier da Sika-Suíça e do Laboratório EMPA (Suíça) e para o Engenheiro Uwe Neubauer da Universidade Técnica de Braunschweig (Alemanha), por partilharam os seus vastos conhecimentos e publicações, sobre a temática dos materiais compósitos reforçados com fibras (FRP), através da preciosa comunicação por correio electrónico.

Aos Engenheiros Salvador José Dias e Paulo Alexandre Costeira, manifesto a minha gratidão pela colaboração e apoio na execução dos ensaios de flexão e no tratamento dos resultados obtidos por via experimental e por cálculo numérico.

Agradeço, também, ao Professor Joaquim Sampaio, à Professora Joana Sousa Coutinho e aos Engenheiros Alberto Tavares Moreira, Ana Maria Proença e Noémia Sampaio pelos ensinamentos transmitidos, pelo apoio e facilidades concedidas no Laboratório LEMC para os estudos de composição, confecção, caracterização e análises químicas do betão utilizado na execução dos modelos reduzidos do trabalho experimental.

De igual modo, declaro o meu reconhecimento pelo contributo extraordinário da Engenheira Guilhermina Câncio Martins Barreto na fase de confronto directo com o idioma Alemão, das principais publicações sobre laminados de CFRP.

Não poderei esquecer nem deixar de apresentar os meus agradecimentos aos Professores Mário Vaz e Luís Esteves e ao Engenheiro Hernani Lopes, do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEGI), pelo incentivo e apoio fundamentais na aquisição de informações extensométricas do trabalho experimental.

Manifesto o meu apreço ao Professor Vasco Freitas, pela disponibilidade constante do equipamento de realização dos ensaios de arrancamento por tracção, para a caracterização da aderência das ligações coladas.

Apresento o meu reconhecimento às empresas SIKA, Indústria Química, SA e STAP - Reparação, Consolidação e Modificação de Estruturas, S.A., pela cooperação na realização dos ensaios, através da cedência de meios humanos e materiais. Desejo destacar a colaboração prestada pelos Engenheiro Valdemar Lebre da Sika e Engenheiro Brazão Farinha da STAP.

Agradeço, também, o apoio financeiro prestado pelos projectos CARBOPONTE “Reforço de pontes com compósitos avançados” e PRAXIS nº CEG 3/3.1/2572-95 e pela bolsa de doutoramento do programa PRODEP - concurso nº 4/95 - projecto nº. 306.004/95, para o desenvolvimento deste trabalho de investigação.

Declaro ainda o meu "bem-haja" à Secção de Materiais de Construção, sobretudo ao Coordenador da Secção Professor Raúl Pinheiro Torres, pelo apoio humano, logístico e financeiro no decurso desta tese e aos colegas da disciplina de Resistência de Materiais, em particular aos Engenheiros Joaquim Mateus Gomes e Alberto Jorge Figueiredo, pela adesão imediata na substituição das minhas obrigações à Secção, na fase final do trabalho. Não poderei deixar de manifestar o meu regozijo pelo carinho e pela colaboração prestada na dactilografia do texto e na composição das figuras da dissertação, demonstrados pela D. Maria Teresa e pelo Pedro Morais.

Aos auxiliares dos Laboratórios que tornaram possível a execução do trabalho experimental, em especial as colaborações permanentes dos Senhores Jorge Monteiro, Jorge Neves e Paula Silva do Laboratório LE, bem como do Fernando Hora e do Rui Sales do Laboratório LEMC, fica aqui patente a minha gratidão.

Por fim, o maior agradecimento apresento-o à Mité e à Inês, as minhas mulheres predilectas, por me proporcionarem o tempo, o espaço e o apoio moral imprescindível para a realização deste trabalho, em prejuízo da minha condição de marido e pai. Não esqueço, também, o empenho e a crítica construtiva sempre permanentes da Mité, na revisão do texto desta tese.

# Resumo

---

O presente trabalho refere-se ao estudo do reforço à flexão de elementos de betão armado, através da técnica de colagem de armaduras não metálicas do tipo CFRP unidireccionais (Compósitos Reforçados com Fibras de Carbono). Para o efeito, realizou-se um programa de investigação, fundamentalmente experimental, com base em ensaios de flexão de modelos reduzidos de vigas e de faixas de laje, reforçados com dois sistemas de CFRP, que visa discutir e desenvolver esta tecnologia em estruturas de edifícios e de pontes, de betão armado ou pré-esforçado.

De modo a permitir uma análise mais coerente da fase experimental, efectuou-se uma revisão bibliográfica sobre o estado do conhecimento, no que concerne à história da técnica de colagem de armaduras exteriores no reforço de estruturas de betão, em geral e ao comportamento de estruturas reforçadas por colagem de compósitos de CFRP unidireccional, em particular. Pretendeu-se adquirir conhecimentos que permitam esclarecer sobre aspectos como os modos de ruína gerais e o comportamento da ligação entre o betão, o adesivo e o compósito.

Apresenta-se a análise experimental efectuada no Laboratório de Estruturas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (DECivil - FEUP), dividida em duas etapas principais. Na primeira, descrevem-se os ensaios realizados num conjunto de três séries de vigas tipo, reforçadas exteriormente por colagem de laminados pré-fabricados de carbono, com a referência *CarboDur S 512*. Em cada série analisaram-se, além do modo de ruína, os parâmetros que influenciam o comportamento estrutural, tais como o comprimento de ancoragem, o tipo de preparação da superfície, a distribuição das tensões de corte na ligação betão-compósito e o grau de deterioração do betão.

Na segunda etapa, avalia-se a eficiência do reforço de modelos de três séries de faixas de laje com dois sistemas de CFRP unidireccional, o laminado pré-fabricado (*CarboDur S 512*) e a manta flexível e pré-impregnada (*Replark 20*). Esta fase resultou de um projecto de I & D em consórcio com a Junta Autónoma das Estradas (J. A. E.), com vista a analisar a viabilidade do reforço da laje superior do tabuleiro da “Ponte de Nossa Senhora do Guia” ( em Ponte de Lima) com a aplicação destes sistemas.

Realizou-se, complementarmente, a caracterização das tensões de aderência das ligações coladas à superfície do betão, para diferentes casos de tratamento superficial como a limpeza com o martelo de agulhas, o esmeril e o jacto de areia e , posteriormente, com ou sem aplicação de um primário, através da realização de ensaios de arrancamento por tracção nas vigas, nas faixas de laje e num grupo de prismas. Finalmente, indicam-se as principais conclusões e recomendações sobre a técnica de colagem de sistemas de CFRP e salientam-se algumas perspectivas de desenvolvimento futuro.

# Abstract

---

This present work refers to the study of bend strengthening of reinforced concrete elements through bonding of advanced materials such as unidirectional Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP), with the use of an epoxy adhesive. A research programme was carried out to develop this strengthening technology for retrofit or rehabilitation of concrete structures such as buildings and bridges. This programme was based on bending tests of scale-reduced beams and slab strips previously strengthened with CFRP.

The first part of this work includes the state-of-art concerning FRP composites. Some aspects are more emphasised, such as the history of bonding with external reinforcement for strengthening of concrete structures, particularly the behaviour of reinforced structures by bonding of unidirectional CFRP composites. Issues such as modes of failure and the behaviour of bond between concrete, adhesive and composite were characterised.

A second part describes experimental research developed at the Structures Laboratory of the “Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (DECivil FEUP)”.

This part is divided into two phases. The first phase consists of the description of tests carried out on three series of beams previously flexure strengthened by bonding ready-to-use carbon laminates (*CarboDur S 512*). Other than failure mechanisms, various aspects that influence the structural behaviour were considered for each beam series, such as the anchorage length, the type of surface preparation, the bond stress distribution at the concrete-composite interface and the degree of concrete deterioration.

The following phase deals with the assessment of the strengthening of scale-reduced slab strips with two different unidirectional CFRP systems regarding its efficiency. These systems consist of the ready-to-use laminates (*CarboDur S 512*) and the prepreg sheet (*Replark 20*). The studies described in this phase led to a joint R & D project with the “Junta Autónoma das Estradas (J. A. E.)”, to assess the applicability of these systems for strengthening the top slab of the “Nossa Senhora da Guia” bridge at “Ponte de Lima” city.

A further study comprised a thorough investigation into adhesion at the interface composite-adhesive-concrete. Different surface treatments were considered such as preparation with a needle hammer, sand paper and sand blasting followed or not by further application of a primary. Pull-off tests were carried out on beams, on slab strips and on concrete prismatic specimens with the different surface treatments.

Finally, conclusions are drawn out and recommendations concerning the bonding technique for CFRP systems are presented. Work to be developed in the future is also suggested.

# Résumé

---

La thèse présentée considère l'étude de renforcement, en flexion, des structures de béton armé, avec l'application de la technique de collage d'armatures non-métalliques comme le CFRP unidirectionnel (Polymères Renforcés avec des fibres de carbone) à l'aide de résine epoxy. Une recherche expérimentale a été exécutée, à travers des essais de flexion des modèles réduits de poutres et des bandes de dalle, renforcées avec deux systèmes CFRP, vis-à-vis une utilisation, plus élargie vers des bâtiments et des ponts, en béton armé ou précontraint.

Pour permettre une analyse plus cohérente de la phase expérimentale, une révision bibliographique a été réalisée sur la technique de collage pour renforcer ou réhabiliter des structures de béton, envisageant connaître des modes de rupture et le comportement béton, adhésif et composite.

L'ensemble d'essais réalisés au Laboratoire de Structures de la "Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (DECivil-FEUP)" est présentée en deux parts.

Dans la première, on présente la description des essais réalisés sur trois types de poutres, renforcés par des lamelles pré-fabriquées *Carbodur S 512* (CFRP) collés sur le béton à l'aide de résine epoxy. Dans la deuxième, l'efficacité du renforcement des modèles de trois séries de bandes de dalle avec deux systèmes de CFRP unidirectionnel, la lamelle pré-fabriquée (*Carbodur S 512*) et le manteau pré-impregné (*Replark 20*), est décrite.

Le mode de rupture, les paramètres qui ont influence sur le comportement structural, comme la longueur d'ancrage, la préparation de surface, la distribution des contraintes de cisaillement dans l'interface béton-adhésif-composite et la détérioration du béton ont été analysés.

On termine avec la présentation des suggestions sur l'application de la technique de collage des systèmes CFRP à l'aide de résine epoxy.



# Zusammenfassung

---

In der vorliegenden Dissertation wird die Verstärkung von auf Biegung beanspruchten Stahlbetonelementen mittels der Anwendung von Klebebewehrungen aus einachsig kohlenstoffaserverstärktem Kunststoff (CFK) untersucht. Auf der Basis eines Forschungsprogramms, daß eine Serie von Biegeversuchen an mit zwei CFK-Systemen verstärkte Modelle von Balken und Plattenstreifen umfaßt, wird die Anwendung dieser Technologie in Tragwerken des Hoch- und Brückenbaus aus Stahl- und Spannbeton diskutiert und ausgearbeitet.

Zur ausführlicheren Auswertung der Versuche wurde in der Literatur allgemein auf die geschichtliche Entwicklung der Klebetechnik von äußerer Verstärkungsbewehrung auf Betontragwerken und speziell auf das Verhalten von Tragwerken mit Klebebewehrungen aus CFK eingegangen. Es wurde somit versucht, zu einem besseren Verständnis der allgemeinen Versagensmechanismen und des Verhaltens des Verbundes zwischen Beton, Kleb- und Kunststoff beizutragen.

Die vorgestellten Versuche, die an dem "Laboratório de Estruturas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (DECivil - FEUP)" durchgeführt wurden, sind in zwei Abschnitten unterteilt. Im ersten Abschnitt werden die Versuche an drei Serien von Trägertypen, die durch Aufkleben von vorgefertigten CFK-Lamellen mit der Bezeichnung *CarboDur S 512* verstärkt wurden, beschrieben. In jeder Serie wurden neben der Versagensmechanismen auch andere Parameter untersucht, die das Tragverhalten beeinflussen, wie Verankerungslänge, Art der Vorbereitung der Oberfläche, Verlauf der Verbundspannungen an der Schnittstelle Beton-Klebstoff und Korrosionsgrad des Betons.

Im zweiten Abschnitt wird die Wirksamkeit der Verstärkung durch zwei verschiedenen Systemen von CFK, nämlich die vorgefertigte Lamelle (*CarboDur S 512*) und die vorimprägnierte, flexible Folie (*Replark 20*), anhand drei Serien von Plattenstreifen untersucht und bewertet. Diese Arbeit wurde im Rahmen eines "R & D" (Research and Development)-Projektes hinsichtlich eines möglichen Einsatzes dieser Systeme bei der Verstärkung der oberen Querschnittsplatte der Brücke "Ponte de Nossa Senhora do Guia" (in Ponte de Lima) in Zusammenarbeit mit der "Junta Autónoma de Estradas (J.A.E.)" durchgeführt.

Zusätzlich wurde der Verlauf der Verbundspannungen der Klebeverbindung an der Betonoberfläche für verschiedene Arten der Oberflächenbehandlung - Nadelpistole, Anschleifen und Sandstrahlen mit oder ohne anschließende Primerschicht - durch Ausreißversuche an Balken, Plattenstreifen und einer Serie von Prismen untersucht. Schließlich werden die wichtigsten Folgerungen und Anwendungsvorschläge über die Klebetechnik von CFK-systemen angegeben und auf das Entwicklungspotential hingewiesen.

# Palavras Chave

---

## Keywords

### **PALAVRAS CHAVE**

Betão armado

Reforço e reabilitação estrutural

Preparação da superfície do betão

Adesivo e resina de saturação

Laminado pré-fabricado de CFRP unidireccional

Manta flexível e pré-impregnada de CFRP unidireccional

Técnica de colagem do CFRP ao betão com adesivos

Análise experimental

Ensaio de flexão

Ensaio de aderência, ensaio de arrancamento por tracção

Modos de ruína

Distribuição de tensões de corte

### **KEYWORDS**

Reinforced concrete

Structural strengthening and rehabilitation

Concrete surface preparation

Adhesive and impregnation resin

Unidirectional CFRP laminates

Unidirectional CFRP prepreg sheets

CFRP bonded to the concrete

Experimental analysis

Bending tests

Bond tests, pull-off test

Failure modes

Bond stress distribution



# Índice Geral

---

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>i</b>
<b>RESUMO / ABSTRACT / RÉSUMÉ / ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>iii</b>
<b>PALAVRAS CHAVE / KEYWORDS</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE GERAL</b> .....	<b>ix</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	<b>xix</b>
<b>SIMBOLOGIA</b> .....	<b>xxiii</b>
<b>CAPÍTULO 1 - Introdução</b> .....	<b>1.1</b>
1.1 - Aspectos gerais .....	1.1
1.2 - Materiais compósitos de "FRP" no reforço de estruturas de betão .....	1.3
1.3 - Objectivos do trabalho .....	1.5
1.4 - Organização da dissertação .....	1.6
<b>CAPÍTULO 2 - Revisão Bibliográfica</b> .....	<b>2.1</b>
2.1 - Reforço de estruturas de betão por colagem de armaduras .....	2.1
2.1.1 - Introdução ao reforço de estruturas de betão .....	2.1
2.1.2 - História da técnica de colagem .....	2.7
2.2 - Sistemas de materiais compósitos reforçados com fibras (FRP) .....	2.16
2.2.1 - Materiais .....	2.18
2.2.2 - Comportamento a longo prazo .....	2.28
2.3 - Comportamento de estruturas reforçadas com colagem de compósitos de CFRP unidireccionais .....	2.40
2.3.1 - Principais contribuições experimentais .....	2.40
2.3.2 - Modos de ruína gerais .....	2.46
2.3.3 - Ligação entre o betão, o adesivo e o compósito .....	2.54
2.3.3.1 - Comportamento geral .....	2.56
2.3.3.2 - Aderência da ligação .....	2.65
2.3.3.3 - Zona de ancoragem .....	2.72
<b>CAPÍTULO 3 - Programa Experimental e Caracterização dos Materiais</b> .....	<b>3.1</b>
3.1 - Modelos experimentais para ensaios de flexão .....	3.1
3.1.1 - Projecto de reforço com sistemas de CFRP unidireccionais .....	3.2
3.1.1.1 - Série de vigas .....	3.2
3.1.1.2 - Série de faixas de laje .....	3.3
3.1.2 - Modelos de ensaio .....	3.9
3.1.2.1 - Série de vigas .....	3.9
3.1.2.2 - Série de faixas de laje .....	3.17
3.2 - Instrumentação em geral .....	3.21
3.2.1 - Identificação dos equipamentos .....	3.21
3.2.2 - Instrumentação dos ensaios de flexão .....	3.25

3.3 - Caracterização dos materiais .....	3.31
3.3.1 - Betão .....	3.31
3.3.1.1 - Série de vigas .....	3.31
3.3.1.2 - Série de faixas de laje .....	3.40
3.3.2 - Armadura .....	3.44
3.3.3 - Compósitos de CFRP unidireccionais .....	3.45
3.3.3.1 - Laminado pré-fabricado .....	3.46
3.3.3.2 - Manta flexível e pré-impregnada .....	3.49
3.3.4 - Adesivos .....	3.50
3.3.4.1 - Série de vigas .....	3.51
3.3.4.2 - Série de faixas de laje .....	3.56
3.4 - Metodologia de observação, medição e análise dos ensaios .....	3.58
<b>CAPÍTULO 4 – Caracterização da Ligação e Aplicação do CFRP</b> .....	<b>4.1</b>
4.1 - Tratamento da superfície de ligação .....	4.1
4.1.1 - Laminado pré-fabricado .....	4.1
4.1.2 - Manta flexível e pré-impregnada .....	4.2
4.2 - Avaliação da aderência ao betão .....	4.4
4.2.1 - Série de vigas .....	4.7
4.2.2 - Série de faixas de laje .....	4.12
4.2.3 - Conclusões .....	4.23
4.3 - Aplicação do reforço exterior .....	4.25
4.3.1 - Laminado pré-fabricado .....	4.26
4.3.2 - Manta flexível e pré-impregnada .....	4.29
4.4 - Conclusões .....	4.32
<b>CAPÍTULO 5 – Resultados dos Ensaio de Flexão</b> .....	<b>5.1</b>
5.1 - Flexão de vigas recentes .....	5.1
5.1.1 - Introdução .....	5.2
5.1.2 - Vigas <i>tipo A</i> .....	5.2
5.1.3 - Vigas <i>tipo B</i> .....	5.10
5.2 - Flexão de vigas com oito anos .....	5.30
5.2.1 - Introdução .....	5.30
5.2.2 - Vigas <i>tipo C</i> .....	5.30
5.3 - Flexão de faixas de laje .....	5.40
5.3.1 - Introdução .....	5.40
5.3.2 - Série <i>tipo N</i> .....	5.42
5.3.3 - Série <i>tipo R</i> .....	5.46
5.3.4 - Série <i>tipo S</i> .....	5.55

---

<b>CAPÍTULO 6 - Discussão dos Resultados Experimentais</b>	<b>6.1</b>
6.1 - Introdução .....	6.1
6.2 - Vigas reforçadas com laminados de CFRP .....	6.1
6.2.1 - Vigas <i>tipo A</i> .....	6.2
6.2.2 - Vigas <i>tipo B</i> .....	6.6
6.2.3 - Vigas <i>tipo C</i> .....	6.11
6.2.4 - Conclusões .....	6.12
6.3 - Lajes reforçadas com mantas e com laminados de CFRP .....	6.14
6.3.1 - Comportamento previsto .....	6.14
6.3.2 - Análise comparativa das séries .....	6.17
6.3.3 - Conclusões .....	6.27
<b>CAPÍTULO 7 - Considerações Finais</b>	<b>7.1</b>
7.1 - Principais informações .....	7.2
7.2 - Conclusões gerais .....	7.3
7.3 - Recomendações .....	7.6
7.4 - Desenvolvimentos futuros .....	7.9
<b>CAPÍTULO 8 - Referências</b>	<b>8.1</b>
<b>ANEXO A - Instrumentação e Materiais</b> .....	<b>A.1</b>
<b>ANEXO B - Ensaios de Aderência</b> .....	<b>B.1</b>
<b>ANEXO C - Ensaios de Flexão</b> .....	<b>C.1</b>
<b>GLOSSÁRIO - Definição de Termos</b> .....	<b>D.1</b>



# Índice de Figuras

## CAPÍTULO 2 - Revisão Bibliográfica

Figura 2.1 - Formas gerais de reforços exteriores .....	2.7
Figura 2.2 - Importância relativa dos materiais básicos ao longo do tempo (Ashby, 1987) .....	2.12
Figura 2.3 - Evolução no tempo da utilização da fibra de carbono em função do preço, da produção e do campo de aplicação .....	2.15
Figura 2.4 - Comparação de algumas propriedades entre o aço, o alumínio e o compósito (Taly, 1998) .....	2.17
Figura 2.5 - Classificação das fibras segundo o JCI (JCI TC952, 1998) .....	2.19
Figura 2.6 - Comportamento à tracção de fibras e metais (ACI 440R-96, 1996) .....	2.19
Figura 2.7 - Aspecto geral de um <i>sistema de FRP pré-fabricado</i> .....	2.22
Figura 2.8 - Aspecto geral de um <i>sistema de FRP curado "in situ"</i> .....	2.24
Figura 2.9 - Comportamento à tracção de vários sistemas de FRP e aço (Abdelrahman et al., 1997) .....	2.24
Figura 2.10 - Efeito da temperatura e do teor de humidade no comportamento corrente de um polímero .....	2.29
Figura 2.11 - Comportamento à fluência de um FRP a baixas e altas tensões (EUROCOMP, 1996) .....	2.34
Figura 2.12 - Tempos de colapso de varões de FRP (Yamaguchi et al., 1997) .....	2.35
Figura 2.13 - Deformação de varões de FRP, por <i>fluência</i> (Yamaguchi et al., 1997) .....	2.35
Figura 2.14 - Protecção adicional ao fogo por revestimento directo dos laminados de CFRP com cartões de gesso ou placas de sílica (S&P, 1998) .....	2.39
Figura 2.15 - Comportamento de vigas de betão reforçadas com armaduras exteriores (Meier et al., 1991; Kaiser, 1989) .....	2.41
Figura 2.16 - Reforço de uma viga com um laminado pré-esforçado e um sistema de ancoragem (Meier et al., 1992) .	2.43
Figura 2.17 - Modos de ruína possíveis (com base em Deuring, 1993) .....	2.47
Figura 2.18 - Modos de ruína observados por Büyüköztürk et al. (1997; 1998) .....	2.49
Figura 2.19 - Efeito de "peeling" na interface betão-compósito (Büyüköztürk et al., 1997) .....	2.50
Figura 2.20 - Modos de ruína possíveis para a zona de amarração dos laminados de CFRP (baseado na informação de Neubauer et al. (1997)).....	2.50
Figura 2.21 - Resumo dos modos de ruína principais .....	2.52
Figura 2.22 - Modelos de viga reforçados ao corte e respectivos modos de ruína (Taerwe et al., 1997) .....	2.55
Figura 2.23 - Algumas formas da relação $\tau = f(s)$ segundo vários autores .....	2.59
Figura 2.24- Esquema de propagação de uma fenda de flexão na interface betão-adesivo-CFRP (Meier, 1997-b) .....	2.61
Figura 2.25 - Esquema de prevenção do colapso numa ligação por adição de estribos planos (Rostásy et al., 1997-b) .	2.63
Figura 2.26 - Reforço ao corte proposto pelo DIBt (Homologações Nr. Z-36.12-29 e Nr. Z-36.12-54) .....	2.64
Figura 2.27 - Relação resistência de aderência vs resistência do betão medidos nos ensaios de corte, de flexão e de arrancamento por tracção (Horiguchi et al., 1997) .....	2.66
Figura 2.28 - Distribuição de tensões de corte na junta (Brosens et al., 1997) .....	2.70
Figura 2.29 – Força normalizada vs comprimento de ancoragem dos ensaios de Ranisch, Ladner et al. e Täljsten (1994) .....	2.71
Figura 2.30 – Comparação da máxima força de tracção entre o modelo de Ranisch e Holzenkämpfer para os ensaios de corte duplo de Blaschko et al. (1998) .....	2.74
Figura 2.31 – Esquema com a ancoragem do laminado e o ensaio de aderência associado (Neubauer et al., 1997) .....	2.74



Figura 2.32 - Informação geral sobre ensaios de aderência com laminados de CFRP (Rostásy, 1998) .....	2.76
---	------

### CAPÍTULO 3 - Programa Experimental e Caracterização dos Materiais

Figura 3.1 - "Ponte de Nossa Senhora da Guia" em Ponte de Lima .....	3.5
Figura 3.2 - Secção transversal tipo da viga em caixão da "Ponte N. S. G." (Figueiras et al., 1999) .....	3.5
Figura 3.3 - Geometria, armadura, carregamento e instrumentação utilizados nas vigas <i>tipo A</i> .....	3.10
Figura 3.4 - Disposição da armadura na série <i>tipo A</i> .....	3.10
Figura 3.5 - Disposição da armadura na série <i>tipo B</i> .....	3.11
Figura 3.6 - Geometria, armadura e instrumentação dos modelos de vigas <i>tipo B</i> segundo o caso (a) .....	3.13
Figura 3.6 - Geometria, armadura e instrumentação dos modelos de viga <i>tipo B</i> segundo o caso (b) .....	3.14
Figura 3.7 - Armadura das vigas <i>tipo C</i> .....	3.15
Figura 3.8 - Geometria, armadura e instrumentação dos modelos de vigas <i>tipo C</i> .....	3.15
Figura 3.9 - Aspecto geral da armadura das lajes <i>tipo N,R e S</i> .....	3.17
Figura 3.10 - Informações gerais sobre as faixas de laje (alçados) .....	3.18
Figura 3.11 - Informações gerais sobre as faixas de laje (plantas e secções) .....	3.19
Figura 3.12 - Prensa servo-comandada da série 315 da MTS (Barros, 1995) .....	3.23
Figura 3.13 - Ensaio de tracção do laminado de CFRP .....	3.23
Figura 3.14 - Ensaio de DMTA do adesivo (PL-DMTA, 1991) .....	3.24
Figura 3.15 - Célula de carga .....	3.24
Figura 3.16 - Transdutores do tipo LVDT .....	3.24
Figura 3.17- Extensómetros eléctricos .....	3.24
Figura 3.18 - Caixas de ligação .....	3.24
Figura 3.19 - Aspecto geral da instrumentação do ensaio de flexão de uma viga .....	3.26
Figura 3.20 - Aspecto geral da instrumentação do ensaio de flexão de uma laje .....	3.26
Figura 3.21 - Aspecto geral do ensaio de carga da viga <i>tipo A</i> .....	3.27
Figura 3.22 - Aspecto geral do ensaio de carga da viga <i>tipo B</i> .....	3.27
Figura 3.23 - Aspecto geral do ensaio de carga da viga <i>tipo C</i> .....	3.27
Figura 3.24 - Aspecto geral do ensaio de carga da laje <i>tipo N</i> .....	3.28
Figura 3.25 - Aspecto geral do ensaio de carga da laje <i>tipo R</i> .....	3.28
Figura 3.26 - Aspecto geral do ensaio de carga da laje <i>tipo S</i> .....	3.28
Figura 3.27 - Plantas com a posição dos extensómetros eléctricos colados ao laminado de carbono (vigas A.3 e A.4) ..	3.29
Figura 3.28 - Plantas com a posição dos extensómetros eléctricos colados na manta <i>Replark 20</i> e no laminado <i>CarboDur S 512</i> .....	3.30
Figura 3.29 - Fotografia com as carotes extraídas à viga C.5 .....	3.35
Figura 3.30 - Geometria e localização dos prismas e das carotes de betão nas vigas C.1, C.2, C.4 e C.5 .....	3.36
Figura 3.31 - Observação da profundidade de carbonatação nas vigas <i>tipo C</i> .....	3.38
Figura 3.32 - Relação da profundidade de carbonatação esperada ao fim de 15 anos com a resistência .....	3.38
Figura 3.33 - Diagramas tensão-extensão do aço utilizado nas faixas de laje ( $\phi 3$ , e $\phi 6$ ) .....	3.44
Figura 3.34 - Aspecto do provete de CFRP submetido à tracção .....	3.47
Figura 3.35 - Ensaio de tracção do laminado <i>CarboDur S 512</i> .....	3.47
Figura 3.36 - Diagrama tensão-extensão do laminado <i>CarboDur S 512</i> .....	3.48

Figura 3.37 - Manta flexível do sistema <i>Replark 20</i> .....	3.49
Figura 3.38 - Tipos de provetes de adesivos <i>Sikadur 30</i> e <i>Sikadur 31</i> ensaiados .....	3.53
Figura 3.39 - Ensaio de flexão em três pontos (LEMC) .....	3.53
Figura 3.40 - Ensaio de compressão (LEMC) .....	3.54
Figura 3.41 - Determinação do módulo de elasticidade (LEMC/LE) .....	3.54
Figura 3.42 - Evolução do módulo de elasticidade e do coeficiente de perda com a temperatura para a mistura <i>4A</i> ....	3.55
Figura 3.43 - Análise dos resultados medidos com os extensómetros eléctricos (diagramas de extensões e de tensões médias de corte) .....	3.62
Figura 3.44 - Esquema de formação de fenda num elemento de betão solicitado à flexão, estados I e II (Deuring, 1993) .....	3.63

## CAPÍTULO 4 - Caracterização da Ligação e Aplicação do CFRP

Figura 4.1 - Preparação da superfície de betão com um martelo de agulhas (modelos de viga e de laje) .....	4.2
Figura 4.2 - Preparação da superfície ( <i>Replark</i> , 1997) .....	4.3
Figura 4.3 - Ensaio de arrancamento por tracção ou "pull-off" .....	4.6
Figura 4.4 - Modos de ruína do ensaio de arrancamento por tracção ("pull-off") .....	4.8
Figura 4.5 - Localização das pastilhas na zona interior dos prismas serrados às vigas <i>C.1</i> , <i>C.2</i> , <i>C.4</i> e <i>C.5</i> .....	4.10
Figura 4.6 - Ensaio de arrancamento por tracção sobre as vigas <i>tipo C</i> .....	4.11
Figura 4.7 - Distribuição dos ensaios de arrancamento por tracção, pelas faixas de lajes .....	4.14
Figura 4.8 - Aspecto geral dos ensaios de "pull-off" nos modelos de laje ( <i>s/</i> e <i>c/</i> carotagem) .....	4.15
Figura 4.9 - Ensaio de arrancamento por tracção em prismas ( <i>c/esmeril</i> ) .....	4.18
Figura 4.10 - Aspecto geral dos prismas e das pastilhas metálicas ( <i>c/esmeril</i> ) .....	4.18
Figura 4.11 - Ensaio de arrancamento por tracção em prismas ( <i>c/martelo de agulhas</i> ) .....	4.19
Figuras 4.12 - Aspecto geral dos prismas e das pastilhas metálicas ( <i>c/martelo de agulhas</i> ) .....	4.19
Figura 4.13 - Aspecto geral dos modos de ruína (tratamento <i>c/esmeril</i> ) .....	4.21
Figura 4.14 - Aspecto geral dos modos de ruína (tratamento <i>c/martelo de agulhas</i> ) .....	4.22
Figura 4.15 - Aspecto final do reforço das lajes <i>tipo S</i> .....	4.28
Figura 4.16 - Cronograma de procedimentos do sistema <i>Replark</i> (1997) .....	4.29
Figura 4.17 - Aspecto das texturas sucessivas após aplicação de cada material à superfície do betão .....	4.29
Figura 4.18 - Esquema da 2ª fase de aplicação da manta flexível ( <i>Replark</i> , 1997) .....	4.30

## CAPÍTULO 5 - Resultados dos Ensaio de Flexão

Figura 5.1 - Pormenor da ruína na viga <i>A.1</i> .....	5.3
Figura 5.2 - Pormenor da ruína na viga <i>A.2</i> .....	5.3
Figura 5.3 - Curvas carga total vs deslocamento do LVDT nº 3 (próximo do meio vão) .....	5.4
Figura 5.4 - Distribuição das tensões de corte e normais na extremidade da interface betão-adesivo (Roberts, 1989) ...	5.5
Figura 5.5 - Aspecto geral da ruína da viga <i>A.3</i> .....	5.6
Figura 5.6 - Pormenor da morfologia da superfície de ruína na viga <i>A.3</i> .....	5.6
Figura 5.7 - Aspecto geral da ruína da viga <i>A.4</i> .....	5.6
Figura 5.8 - Curvas carga total normalizada vs deslocamento do LVDT nº 3 para as vigas <i>A.3</i> e <i>A.4</i> .....	5.7

Figura 5.9 - Diagramas de extensões e de tensões médias de corte ao longo de metade do comprimento do CFRP (A.3 e A.4) .....	5.8
Figura 5.10 - Esquema de distribuição das deformações do laminado (ensaio de corte de Maeda et al., 1997) .....	5.9
Figura 5.11 - Curvas carga total vs deslocamento central das vigas B.2, B.6 e B.12 (flexão em 4 pontos) e vigas B.4(1) e B.4(2) (flexão em 3 pontos) .....	5.11
Figura 5.12 - Aspecto geral da cedência da viga B.6 .....	5.11
Figura 5.13 - Pormenor da secção de ruína da viga B.12 .....	5.12
Figura 5.14 - Aspecto geral da ruína da viga B.1 .....	5.13
Figura 5.15 - Curvas carga total vs deslocamento a meio vão das vigas B.1, B.3, B.5 e B.8 .....	5.13
Figura 5.16 - Ruína da viga B.3 .....	5.14
Figura 5.17 - Diagramas de extensões e de tensões médias de corte ao longo de metade do comprimento do CFRP (B.3, B.5 e B.8) .....	5.16
Figura 5.18 - Ruína da viga B.5 .....	5.17
Figura 5.19 - Aspecto geral da cedência da viga B.8 .....	5.17
Figura 5.20 - Superfície de destacamento do CFRP (viga B.8) .....	5.18
Figura 5.21 - Aspecto geral da ruína da viga B.7 .....	5.19
Figura 5.22 - Aspecto geral da ruína da viga B.11 .....	5.20
Figuras 5.23 - Curvas carga total vs deslocamento central das vigas B.3, B.7 e B.11 .....	5.20
Figura 5.24 - Extensões e tensões médias de corte ao longo de metade do comprimento do CFRP .....	5.21
Figura 5.25 - Curvas carga total vs deslocamento central das vigas B.3, B.6, B.9 e B.13 .....	5.22
Figura 5.26 - Aspecto geral da cedência da viga B.9 .....	5.23
Figura 5.27 - Pormenor da ruína interlaminar do CFRP (viga B.9) .....	5.23
Figura 5.28 - Extensões e tensões médias de corte ao longo de metade do comprimento do CFRP .....	5.24
Figura 5.29 - Aspecto geral da cedência da viga B.13 .....	5.25
Figura 5.30 - Resposta da viga B.10 ao ensaio de flexão .....	5.27
Figura 5.31 - Superfície de rotura da viga B.10 .....	5.27
Figura 5.32 - Diagrama carga total vs deslocamento central das vigas B.3 e B.10 .....	5.28
Figura 5.33 - Extensões e tensões médias de corte ao longo de metade do comprimento do CFRP .....	5.28
Figura 5.34 - Diagrama de carga total vs deslocamento central das vigas C.1, C.2 (1ª fase e 3ª fase) e C.3 (não reforçada) .....	5.31
Figura 5.35 - Ruína da viga C.1: secção de colapso por corte; destacamento do laminado CFRP .....	5.32
Figura 5.36 - Superfície de cedência do betão na viga C.1 .....	5.32
Figura 5.37 - Aspecto geral da pré-fendilhação da viga C.2 (1ª fase) .....	5.32
Figura 5.38 - Ruína da viga C.2: esmagamento no betão; descolamento do laminado de CFRP .....	5.33
Figura 5.39 - Superfície de ruína da viga C.2 com corte no betão e rotura interlaminar do CFRP .....	5.33
Figura 5.40 - Aspecto geral do modo de ruína da viga C.3 .....	5.34
Figura 5.41 - Diagrama de carga total vs deslocamento central das vigas C.3 (não reforçada), C.4 e C.5 .....	5.35
Figura 5.42 - Aspecto geral da ruína da viga C.4 .....	5.36
Figura 5.43 - Pormenor da superfície de ruína .....	5.36
Figura 5.44 - Aspecto geral da ruína da viga C.5 .....	5.37
Figura 5.45 - Pormenor da zona de ruína .....	5.37

Figura 5.46 - Diagrama de extensões e de tensões médias de corte ao longo de metade do comprimento do CFRP (viga C.5) .....	5.38
Figura 5.47 - Extremidade livre do compósito (manta ou laminado) junto ao apoio .....	5.41
Figura 5.48 - Aspecto geral do ensaio de <i>LB3N</i> antes do colapso (carga total = 22.0 kN) .....	5.43
Figura 5.49 - Alçado da laje <i>LB3N</i> após o colapso .....	5.43
Figura 5.50 - Aspecto geral da fendilhação final na laje <i>LB3N</i> .....	5.43
Figura 5.51 - Aspecto geral do ensaio de <i>LB4N</i> próximo da carga de colapso (carga total = 23.8 kN) .....	5.44
Figura 5.52 - Pormenor da secção de cedência que levará ao colapso de <i>LB4N</i> (carga total = 23.8 kN) .....	5.44
Figura 5.53 - Aspecto geral da fendilhação final do modelo <i>LB4N</i> .....	5.44
Figura 5.54 - Carga total normalizada vs deslocamento central da <i>série N</i> .....	5.45
Figura 5.55 - Momento normalizado vs curvatura média no meio vão dos modelos da <i>série N</i> .....	5.45
Figura 5.56 - Curvas experimental e numérica de momento vs curvatura média a meio vão ( <i>série N</i> ) .....	5.46
Figura 5.57 - Padrão de fendilhação em serviço (caso de <i>LC3R</i> ) .....	5.47
Figura 5.58 - Aspecto geral do ensaio de <i>LC3R</i> antes do colapso (carga total = 38.5 kN) .....	5.48
Figura 5.59 - Aspecto geral do instante de ruína/destacamento do CFRP ( <i>LC3R</i> ) .....	5.48
Figura 5.60 - Alçado de <i>LC3R</i> após o colapso do CFRP .....	5.48
Figura 5.61 - Aspecto geral da laje <i>LC3R</i> após o ensaio (vista e pormenor) .....	5.49
Figura 5.62 - Alçado da laje <i>LC4R</i> próximo da carga de ruína do CFRP (carga total = 32.3 kN) .....	5.50
Figura 5.63 - Aspecto geral da laje <i>LC4R</i> após a ruína do CFRP .....	5.50
Figura 5.64 - Aspecto geral da laje <i>LC4R</i> após o ensaio (vista e pormenor) .....	5.51
Figura 5.65 - Carga total normalizada vs deslocamento central da <i>série R</i> .....	5.52
Figura 5.66 - Momento normalizado vs curvatura média no meio vão da <i>série R</i> .....	5.53
Figura 5.67 - Curvas médias experimental e numérica para o momento vs curvatura da <i>série R</i> .....	5.53
Figura 5.68 - Extensão e tensão médias de corte ao longo de metade do comprimento do CFRP (faixa 1) .....	5.54
Figura 5.69 - Distribuição inicial da fendilhação na laje <i>LC1S</i> (carga total $\cong$ 16 kN) .....	5.56
Figura 5.70 - Aspecto geral do padrão de fendilhação estabilizado no modelo <i>LC1S</i> (carga total $\cong$ 34 kN) .....	5.56
Figura 5.71 - Pormenor da fendilhação do adesivo e do corte do betão entre fendas (carga total $\cong$ 36 kN) .....	5.56
Figura 5.72 - Alçado da laje <i>LC1S</i> próximo da capacidade máxima (carga total = 34.13 kN) .....	5.58
Figura 5.73 - Aspecto geral do momento de destacamento dos laminados em <i>LC1S</i> (carga total = 32.9 kN) .....	5.58
Figura 5.74 - Aspecto geral de <i>LC1S</i> já sem o efeito do reforço .....	5.58
Figura 5.75 - Alçado da laje <i>LC2S</i> próximo da sua capacidade máxima (carga total = 36.0 kN) .....	5.59
Figura 5.76 - Aspecto geral de <i>LC2S</i> no momento de ruína do CFRP (carga total = 37.7 kN) .....	5.59
Figura 5.77 - Aspecto final de <i>LC2S</i> com os laminados destacados da laje .....	5.59
Figura 5.78 - Ruína do laminado de CFRP na laje <i>LC1S</i> (planta e pormenores) .....	5.60
Figura 5.79 - Ruína do laminado de CFRP na laje <i>LC2S</i> (planta e pormenor) .....	5.61
Figura 5.80 - Carga total normalizada vs deslocamento central para a <i>série S</i> .....	5.63
Figura 5.81 - Momento normalizado vs curvatura média no meio vão para a <i>série S</i> .....	5.63
Figura 5.82 - Curvas médias experimental e numérica para o momento vs curvatura da <i>série S</i> .....	5.64
Figura 5.83 - Extensões e tensões médias de corte ao longo de metade do comprimento do CFRP (faixa 1) .....	5.65

## CAPÍTULO 6 - Discussão dos Resultados Experimentais

Figura 6.1 - Curvas carga total vs deslocamento central para as vigas <i>A.3</i> e <i>A.4</i> (numérico vs experimental) .....	6.5
Figura 6.2 - Distribuição de extensões e tensões médias de corte ao longo de metade do laminado .....	6.5
Figura 6.3 - Curvas carga total vs deslocamento central para as vigas <i>B.6</i> e <i>B.9</i> .....	6.9
Figura 6.4 - Distribuições de extensões e tensões médias de corte ao longo de metade do laminado .....	6.10
Figura 6.5 - Adição de estribos planos de CFRP (Meier, 1998) .....	6.13
Figura 6.6 - Discretização de uma secção tipo em camadas .....	6.14
Figura 6.7 - Diagrama de retenção de tensões de tracção para o betão fendilhado .....	6.15
Figura 6.8 - Diagrama trilinear adaptado ao diagrama de ensaio do aço de $\phi 6$ mm .....	6.15
Figura 6.9 - Diagrama de momento vs curvatura de uma estrutura de betão reforçada exteriormente com material compósito .....	6.16
Figura 6.10 - Diagramas de momento vs curvatura dos modelos de laje (resposta numérica) .....	6.16
Figura 6.11 - Diagramas carga total vs deslocamento central do comportamento médio experimental das séries <i>N</i> , <i>R</i> e <i>S</i> e da armadura mínima ( <i>Arm. Min.</i> ) .....	6.18
Figura 6.12 - Diagramas momento vs curvatura central do comportamento médio experimental e numérico das séries <i>N</i> , <i>R</i> , e <i>S</i> e da armadura mínima ( <i>Arm. Min.</i> ) .....	6.18
Figura 6.13 - Padrão de fendilhação final obtido nas três séries ( <i>N</i> , <i>R</i> e <i>S</i> ) com capacidades resistentes semelhantes ..	6.20
Figura 6.14 - Padrão de fendilhação final instalado nos modelos reforçados com CFRP (séries <i>R</i> e <i>S</i> ) e no modelo de referência (com <i>armadura mínima</i> ) .....	6.20

## CAPÍTULO 7 - Considerações Finais

Figura 7.1 - O animal procurará sempre alcançar a cenoura colocada à sua frente .....	7.10
---	------

## ANEXO A - Instrumentação e Materiais

Figura A.1 - Plantas com a posição dos extensómetros eléctricos colados ao laminado de carbono (vigas <i>B.3</i> , <i>B.5</i> , <i>B.7</i> , <i>B.8</i> , <i>B.9</i> , <i>B.13</i> ). .....	A.1
Figura A.2 - Plantas com a posição dos extensómetros eléctricos colados ao laminado de carbono (vigas <i>B.10</i> e <i>B.11</i> ) ..	A.2
Figura A.3 - Plantas com a posição dos extensómetros eléctricos colados ao laminado de carbono (vigas <i>C.4</i> e <i>C.5</i> ) ...	A.3
Figura A.4 - Curvas granulométricas dos inertes (betonagem A) .....	A.7
Figura A.5 - Curvas granulométricas dos inertes (betonagens B e C) .....	A.8
Figura A.6 - Diagrama de variação da temperatura (T) .....	A.9
Figura A.7 - Diagrama de variação da Humidade Relativa (HR) .....	A.9

# Índice de Tabelas

---

## CAPÍTULO 2 - Revisão Bibliográfica

Tabela 2.1 - Classificação de um reforço segundo o “Japan Concrete Institute” (JCI TC952, 1998).....	2.5
Tabela 2.2 - Reforços tipo mais comuns com colagem de laminados, mantas e tecidos de FRP ao betão.....	2.8
Tabela 2.3 - Características principais das fibras segundo o JCI (JCI TC952, 1998).....	2.19
Tabela 2.4 - Descrição das <i>mantas</i> e <i>tecidos</i> empregues nos sistemas FRP curados “in situ”.....	2.23
Tabela 2.5 - Propriedades mecânicas do <i>adesivo</i> , do <i>betão</i> e do <i>aço</i> segundo Täljsten (1994).....	2.27
Tabela 2.6 - Mecanismos de ruína e medidas de verificação para evitar a sua ocorrência.....	2.48
Tabela 2.7 - Ensaio de caracterização da interface.....	2.67
Tabela 2.8 - Ensaio de aderência ("Bond tests") (JCI TC952, 1998).....	2.69
Tabela 2.9 - Alguns critérios para a resistência de aderência de juntas.....	2.72

## CAPÍTULO 3 - Programa Experimental e Caracterização dos Materiais

Tabela 3.1 - Análise por equivalência da <i>resistência</i> .....	3.8
Tabela 3.2 - Análise por equivalência da <i>rigidez</i> .....	3.8
Tabela 3.3 - Resumo das armaduras das vigas.....	3.16
Tabela 3.4 - Modelos de laje em estudo.....	3.20
Tabela 3.5 - Dimensões e pesos das faixas de laje ensaiadas (só 1ª Fase).....	3.20
Tabela 3.6 - Instrumentação dos ensaios.....	3.25
Tabela 3.7 - Resumo das características do betão aos 28 dias.....	3.33
Tabela 3.8 - Características do betão previstas nas datas do ensaio das vigas ( <i>j</i> dias).....	3.34
Tabela 3.9 - Valores médios das propriedades do betão.....	3.40
Tabela 3.10 - Critérios de execução, de designação e de ensaios dos modelos de laje.....	3.41
Tabela 3.11 - Resumo das características do betão aos 28 dias (análise experimental).....	3.43
Tabela 3.12 - Características do betão previstas nas datas do ensaio das lajes ( <i>j</i> dias).....	3.43
Tabela 3.13 - Principais propriedades das armaduras (valores médios).....	3.45
Tabela 3.14 - Propriedades de catálogo do laminado <i>Sika-CarboDur</i> .....	3.46
Tabela 3.15 - Resultados do ensaio de tracção do laminado <i>CarboDur S 512</i> .....	3.48
Tabela 3.16 - Principais propriedades da manta flexível.....	3.50
Tabela 3.17 - Principais propriedades do <i>Sikadur 30</i> e <i>Sikadur 31</i> (ensaio e fabricante).....	3.57
Tabela 3.18 - Principais propriedades do <i>L700W</i> (ensaio e fabricante) e do <i>PS 301</i> (fabricante).....	3.58

## CAPÍTULO 4 - Caracterização da Ligação e Aplicação do CFRP

Tabela 4.1 - Especificação das resinas (de saturação, primário, "putty") do sistema Replark (1997).....	4.3
Tabela 4.2 - Tratamento da superfície de betão.....	4.5
Tabela 4.3 - Valores médios de $f_{cm,p}$ obtidos nos ensaios de arrancamento por tracção sobre as vigas <i>tipo A</i> e <i>tipo B</i> ... ..	4.9
Tabela 4.4 - Valores médios de $f_{cm,p}$ obtidos nos ensaios de arrancamento por tracção sobre as vigas <i>tipo C</i> .....	4.12
Tabela 4.5 - Critério dos ensaios de arrancamento por tracção nas lajes.....	4.13
Tabela 4.6 - Resumo dos valores médios da aderência ( $f_{cm,p}$ ) dos ensaios de arrancamento nas lajes.....	4.16

Tabela 4.7 - Critérios dos ensaios de arrancamento por tracção nos prismas.....	4.17
Tabela 4.8 - Resumo dos valores médios da tensão de aderência ( $f_{cm,p}$ ) nos prismas .....	4.20
Tabela 4.9 - Fases da aplicação do laminado <i>CarboDur S 512</i> a uma viga de betão armado.....	4.27
Tabela 4.10 - 2ª Fase de aplicação da manta <i>Replark 20</i> às lajes de betão, <i>tipo R</i> .....	4.31

## CAPÍTULO 5 - Resultados dos Ensaios de Flexão

Tabela 5.1 - Resumo dos ensaios de flexão das vigas <i>tipo A</i> .....	5.9
Tabela 5.2 - Resultados dos ensaios.....	5.10
Tabela 5.3 - Resumo dos ensaios de flexão das vigas <i>tipo B</i> .....	5.29
Tabela 5.4 - Resumo dos ensaios de flexão das vigas <i>tipo C</i> .....	5.39
Tabela 5.5 - Dados sobre o compósito CFRP e a interface com o betão ( <i>série R</i> ).....	5.55
Tabela 5.6 - Dados sobre o compósito CFRP e a interface com o betão ( <i>série S</i> ).....	5.65

## CAPÍTULO 6 - Discussão dos Resultados Experimentais

Tabela 6.1 - Comportamento do CFRP e da interface betão-CFRP (vigas <i>tipo A</i> ).....	6.3
Tabela 6.2 - Comportamento do CFRP e da interface betão-CFRP (vigas <i>tipo B</i> ).....	6.8
Tabela 6.3 - Comportamento experimental e numérico das vigas <i>B.6</i> e <i>B.9</i> .....	6.10
Tabela 6.4 - Comportamento do CFRP e da interface betão-CFRP (vigas <i>C</i> ).....	6.11
Tabela 6.5 - Comprimentos de ancoragem ( $\ell_t$ ) das séries reforçadas com CFRP.....	6.21
Tabela 6.6 - Informações médias do comportamento em serviço.....	6.22
Tabela 6.7 - Informações médias do comportamento resistente em termos de modelo e de reforço.....	6.23
Tabela 6.8 - Relação entre taxas previstas e observadas.....	6.24

## ANEXO A - Instrumentação e Materiais

Tabela A.1 - Plano geral dos ensaios das vigas e das lajes.....	A.4
Tabela A.2 - Composição do betão segundo o nº de ordem da amassadura das vigas.....	A.6
Tabela A.3 - Composição do betão por betonagem das faixas de laje.....	A.6
Tabela A.4 - Ensaio de PL-DMTA (“Dynamic Mechanical Thermal Analyser”) do <i>Sikadur 30</i> usado nos modelos de vigas.....	A.10

## ANEXO B - Ensaios de Aderência

Tabela B.1 - Características da preparação e da aplicação do reforço nas vigas <i>Tipo A</i> .....	B.1
Tabela B.2 - Características da preparação e da aplicação do reforço nas vigas <i>Tipo C</i> .....	B.1
Tabela B.3 - Características da preparação e da aplicação do reforço nas vigas <i>Tipo B</i> .....	B.2
Tabela B.4 - Resultados dos ensaios de arrancamento por tracção - Vigas <i>tipo A</i> e <i>tipo B</i> .....	B.3
Tabela B.5 - Resultados dos ensaios de arrancamento por tracção - Vigas <i>tipo C</i> .....	B.9
Tabela B.6 - Resumo dos ensaios de arrancamento por tracção nas lajes <i>Tipo R</i> .....	B.13
Tabela B.7 - Resumo dos ensaios de arrancamento por tracção nas lajes <i>Tipo S</i> .....	B.14

Tabela B.8 - Resumo dos ensaios de aderência ("pull-off") nos prismas (s/ primário).....	B.15
Tabela B.9 - Resumo dos ensaios de aderência ("pull-off") nos prismas (c/ primário).....	B.16

### **ANEXO C - Ensaios de Flexão**

Tabela C.1 - Resultados da <i>viga A.1</i> .....	C.2
Tabela C.2 - Resultados da <i>viga A.2</i> .....	C.3
Tabela C.3 - Resultados da <i>viga A.3</i> .....	C.4
Tabela C.4 - Resultados da <i>viga A.4</i> .....	C.5
Tabela C.5 - Resultados da <i>viga B.1</i> .....	C.6
Tabela C.6 - Resultados da <i>viga B.3</i> .....	C.7
Tabela C.7 - Resultados da <i>viga B.5</i> .....	C.8
Tabela C.8 - Resultados da <i>viga B.6</i> .....	C.9
Tabela C.9 - Resultados da <i>viga B.7</i> .....	C.10
Tabela C.10 - Resultados da <i>viga B.8</i> .....	C.11
Tabela C.11 - Resultados da <i>viga B.9</i> .....	C.12
Tabela C.12 - Resultados da <i>viga B.10</i> (1ª e 3ª fases).....	C.13
Tabela C.13 - Resultados da <i>viga B.11</i> .....	C.14
Tabela C.14 - Resultados da <i>viga B.12</i> .....	C.15
Tabela C.15 - Resultados da <i>viga B.13</i> .....	C.16
Tabela C.16 - Resultados da <i>viga C.1</i> .....	C.17
Tabela C.17 - Resultados da <i>viga C.2</i> .....	C.18
Tabela C.18 - Resultados da <i>viga C.3</i> .....	C.19
Tabela C.19 - Resultados da <i>viga C.4</i> .....	C.20
Tabela C.20 - Resultados da <i>viga C.5</i> .....	C.21
Tabela C.21 - Resultados da <i>laje LB3N</i> .....	C.22
Tabela C.22 - Resultados da <i>laje LB4N</i> .....	C.23
Tabela C.23 - Resultados da faixa de <i>laje LC3R</i> .....	C.24
Tabela C.24 - Resultados da faixa de <i>laje LC4R</i> .....	C.25
Tabela C.25 - Resultados da <i>laje LC1S</i> .....	C.26
Tabela C.26 - Resultados da <i>laje LC2S</i> .....	C.27





# Simbologia

## Siglas

A, B, C	– ordem de betonagem de uma laje
AFRP	– polímeros (ou compósitos) reforçados com fibras de aramida (A)
<i>Arm. Min.</i>	– modelo de betão armado com “armadura mínima” à tracção
CA.i a CJ.i	– amostras extraídas nos ensaios de arrancamento por tracção em vigas
PE.i, PM.i	– amostras extraídas nos ensaios de arrancamento por tracção em lajes
CEMACOM	– Unidade de Materiais Compósitos do INEGI
CFRP	– polímeros (ou compósitos) reforçados com fibras de carbono (C)
DECivil, DEC	– Departamento de Engenharia Civil da FEUP
DEMEGI	– Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial da FEUP
DIBt	– "Deutches Institut für Bautechnik", na Alemanha
DMTA	– ensaio de "Dynamic Mechanical Thermal Analyser"
EMPA	– "Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research", na Suíça
FEUP	– Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FRP	– família geral dos polímeros (ou compósitos) reforçados com fibras contínuas
GFRP	– polímeros (ou compósitos) reforçados com fibras de vidro (G)
I.C.	– Instituto da Construção da FEUP
INEGI	– Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
J.A.E.	– Junta Autónoma das Estradas
<i>L700W</i>	– resina de saturação do sistema <i>Replark 20</i> , produto MITSUBISHI
<i>LAij</i>	– faixa de laje nº "i", da betonagem tipo A e com o tipo de reforço "j"
<i>LBij</i>	– faixa de laje nº "i", da betonagem tipo B e com o tipo de reforço "j"
<i>LCij</i>	– faixa de laje nº "i", da betonagem tipo C e com o tipo de reforço "j"
LE	– Laboratório de Estruturas do DECivil
LEMC	– Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção do DECivil
LNEC	– Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LOME	– Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental do DEMEGI
LVDT	– transdutor de deslocamentos do tipo "Linear Variable Differential Transformer"
<i>N, R, S</i>	– tipo de reforço das séries de faixas de laje: betão armado ( <i>N</i> ), manta ( <i>R</i> ), laminado ( <i>S</i> )
<i>PS 301</i>	– primário do sistema <i>Replark 20</i> , produto MITSUBISHI
<i>Replark 20</i>	– manta flexível e pré-impregnada de carbono unidireccional, tipo <i>M2</i> , produto MITSUBISHI
Seta	– equipamento usada nos ensaios de arrancamento por tracção ou "pull-off", marca SETA
<i>Sikadur 30</i>	– adesivo do sistema <i>CarboDur S 512</i> , produto SIKA
UNL	– Universidade Nova de Lisboa
<i>Viga A.i</i>	– modelo de viga nº "i" da série <i>tipo A</i>
<i>Viga B.i</i>	– modelo de viga nº "i" da série <i>tipo B</i>
<i>Viga C.i</i>	– modelo de viga nº "i" da série <i>tipo C</i>
i	– nº de ordem da amassadura de um betão (vigas)
s/c, c/c	– sem carotagem ou com carotagem da superfície de betão (ensaio de “pull-off”)

## Notações Escalares Latinas

$A_L$	– área da armadura de material compósito de FRP ( $cm^2$ )
$A_s$	– área da armadura ordinária de aço ( $cm^2$ )
$\Delta A_s$	– acréscimo de área de armadura ordinária de aço ( $cm^2$ )
$C$	– concentração de cloretos expressa em relação à massa de cimento (%)
$Ca/b$	– classe de resistência de um betão (tensão de compressão em cilindros/cubos NP-ENV 206) (MPa)
$C_L$	– constante definida na [Eq-3.14]
$C_r$	– limite crítico da concentração de cloretos expressa em relação à massa de cimento (%)
$E'$	– módulo de elasticidade de ganho no ensaio DMTA (GPa)
$E_c, E_{cm}$	– valor médio do módulo de elasticidade do betão aos 28 dias (em cilindros) (GPa)
$E_{cm,j}$	– valor médio do módulo de elasticidade do betão aos “j” dias (em cilindros) (GPa)
$E_L$	– módulo de elasticidade longitudinal do compósito de FRP (GPa)
$E_{Lm}$	– valor médio do módulo de elasticidade longitudinal do compósito de FRP (GPa)
$E_s, E_{sm}$	– valor médio do módulo de elasticidade longitudinal do aço da armadura ordinária (GPa)
$(EI)_I, (EI)_{II}, (EI)_{III}$	– rigidez à flexão nos estados I, II e III dos modelos reforçados de betão armado ( $kN.m^2$ )
$F$	– carga total (2P) aplicada no ensaio de flexão dum modelo de viga ou laje, em cada instante (kN)
$\Delta F$	– variação do esforço de tracção do CFRP entre posições consecutivas dos extensómetros (kN)
$F_{3\phi6}$	– força resistente do grupo de varões de aço da armadura ordinária constituído por $3\phi6$ mm (kN)
$F_{CFRP}$	– força resistente duma armadura de CFRP (kN)
$F_L$	– força de tracção na armadura de material compósito de FRP (kN)
$F_{máx}, F_{máx,m}$	– valores máximo e médio da força de tracção do CFRP obtidos nos ensaios de flexão das lajes (kN)
$F_{máx,L}$	– valor máximo da força de tracção do CFRP ( <i>séries R e S</i> ) obtido do equilíbrio da secção [Eq-6.5] (kN)
$F_{máx,N}$	– valor máximo da força de tracção do aço ( $3\phi6$ ) obtido do equilíbrio da secção [Eq-6.3] (kN)
$F_{série R}$	– força resistente da armadura de CFRP (manta) da série de lajes <i>tipo R</i> (kN)
$F_{série S}$	– força resistente da armadura de CFRP (laminado) da série de lajes <i>tipo S</i> (kN)
$HR$	– percentagem de humidade relativa do ambiente (%)
$K$	– constante de calibração dos extensómetros eléctricos (-)
$K_\mu$	– coeficiente afecto ao tipo de ensaio e grau de reforço [Eq-2.2] (-)
$K_{3\phi6}$	– rigidez axial do grupo de varões de aço da armadura ordinária constituído por $3\phi6$ mm ( $MN.m^{-1}$ )
$K_b$	– coeficiente de relação geométrica [Eq-2.4] (-)
$K_{CFRP}$	– rigidez axial da armadura de reforço de CFRP ( $MN.m^{-1}$ )
$K_{sérieR}, K_{sérieS}$	– rigidez axial da armadura de CFRP (manta e laminado) de reforço das <i>séries R e S</i> ( $MN.m^{-1}$ )
$K_T$	– coeficiente de correcção afecto às condições de ambiente do modelo de ensaio [Eq-2.7] (-)
$L_1$	– comprimento da junta de colagem betão-CFRP nas vigas <i>tipo A</i> (m)
$\Delta L$	– afastamento entre posições consecutivas dos extensómetros colados no compósito de CFRP (m)
$M_f$	– momento flector de início de fendilhação ( Figura 6.9) (kN.m)
$M_u$	– momento flector de colapso do modelo de betão reforçado com FRP ( Figura 6.9) (kN.m)
$M_y$	– momento flector de início de cedência da armadura ordinária de tracção ( Figura 6.9) (kN.m)
$P_{fend}, P_{fend,N}$	– carga total de início de fendilhação de um modelo de faixa de laje e do modelo da <i>série N</i> (kN)

$P$	– valor da acção medido em cada célula de carga no ensaio de flexão ( $kN$ )
$P_{máx}$	– carga total máxima de um modelo (viga ou laje), próxima da ruína ( $kN$ )
$P_{máx,B.i}$	– carga total máxima da <i>viga B.i</i> , próxima da ruína ( $kN$ )
$P_{máx,N}$	– carga total máxima da <i>série N</i> , próxima da ruína ( $kN$ )
$R^{-1}$ , $1/R$	– valor da curvatura a meio vão da laje em flexão ( $m^{-1}$ )
$T$	– temperatura de ambiente ou de uma superfície ( $^{\circ}C$ )
$Ta_m$	– relação entre as flechas de serviço das <i>séries</i> de laje <i>R</i> e <i>S</i> com a da <i>série N</i> (-)
$T_c$	– temperatura crítica acima da qual se inicia a redução do módulo de elasticidade do polímero ( $^{\circ}C$ )
$T_F$ , $T_{F,R}$ , $T_{F,S}$	– taxa de refoço “esperado” das <i>séries</i> de laje <i>R</i> e <i>S</i> em relação à <i>série N</i> e em termos de resistência (-)
$T_{F,exp}$	– taxa de refoço “ $T_F$ ” medido por via experimental (-)
$T_{F,expR}$ , $T_{F,expS}$	– taxa de refoço “ $T_{F,exp}$ ” medido para as <i>séries R</i> e <i>S</i> (-)
$T_g$	– temperatura de transição vítrea ( $^{\circ}C$ )
$T_{go}$	– temperatura de transição vítrea - seco ( $^{\circ}C$ )
$T_{gw}$	– temperatura de transição vítrea - húmido ( $^{\circ}C$ )
$T_K$ , $T_{K,R}$ , $T_{K,S}$	– taxa de quebra “esperada” de rigidez das <i>séries</i> de laje <i>R</i> e <i>S</i> em relação à <i>série N</i> (-)
$T_{k,max}$	– valor característico da força máxima de ancoragem da ligação betão-compósito [Eq-2.7] ( $N$ )
$T_m$	– valor médio da força de ancoragem (ou aderência) da ligação betão-compósito ( $N$ )
$T_{m,max}$	– valor médio da força máxima de ancoragem (ruína) da ligação betão-compósito ( $N$ )
$T_P$	– taxa de reforço para cargas totais últimas aplicadas nas lajes das <i>séries R</i> e <i>S</i> em relação à <i>N</i> (-)
$T_P^*$	– taxa de reforço “ $T_P$ ” convertida para a relação “ $P_{CFRP}$ vs $P_{3\phi}$ ” das <i>séries R</i> e <i>S</i> em relação à <i>N</i> (-)
$T_{P_{fend}}$	– relação entre as cargas totais de início de fendilhação das <i>séries reforçadas</i> com a da <i>série N</i> (-)
$T_{u,max}$	– valor de ruína da força máxima de ancoragem (ou aderência) da ligação betão-compósito ( $N$ )
$X_i$	– distância da posição do LVDT nº “ <i>i</i> ” à posição do LVDT nº 1 [Eq-3.31] ( $mm$ ).
$X_{min}$	– menor valor da resistência à compressão dum grupo de provetes [Eq-3.19] ( $MPa$ )
$\bar{X}_3$	– valor médio da resistência à compressão dum grupo de 3 provetes [Eq-3.19] ( $MPa$ )
$a_m$	– valor médio do deslocamento vertical (flecha) a meio vão em fase de serviço ( $P_{máx}/2$ ) ( $mm$ )
$a_{m,N}$	– valor médio do deslocamento vertical (flecha) a meio vão para a <i>série N</i> em fase de serviço ( $mm$ )
$a_{m,B.6}$	– deslocamento vertical (flecha) a meio vão para a <i>viga B.6</i> em fase de serviço ( $mm$ )
$b$	– largura de uma secção ( $m$ )
$b_1$	– largura do compósito de FRP adoptada no reforço do modelo de betão [Eq-3.36] ( $m$ )
$b_2$	– largura média da faixa de interface betão-adesivo e que é igual ou superior a $b_1$ [Eq-3.35] ( $m$ )
$b_1$ , $b_2$	– larguras da 1ª camada e da 2ª camada de CFRP adoptadas no reforço das lajes da <i>série tipo R</i> ( $m$ )
$b_c$	– largura da viga ou distância entre eixos do laminado na laje [Eq-2.4] ( $mm$ )
$b_{cal}$	– largura do CFRP (laminado ou manta) necessária para o reforço dum modelo [Eq-3.9] ( $mm$ )
$b_L$	– largura do compósito de FRP ( $mm$ )
$b_{real}$	– largura do CFRP (laminado ou manta) adoptada no reforço das <i>séries R</i> e <i>S</i> ( $mm$ )
$c$	– comprimento de CFRP não colado ao betão dos modelos de viga <i>tipo A</i> ( $m$ )
$cal T_m$	– valor de $T_{m,max}$ calculado pela expressão [Eq-2.2] ( $N$ )
$d_L$	– altura útil da armadura de CFRP nos modelos de betão armado reforçados <i>série R</i> e <i>série S</i> ( $mm$ )

$d_s$	– altura útil da armadura de aço à tracção num modelo de betão armado ( $m$ )
$exp T_u$	– valor de $T_{u,max}$ obtido por via experimental (Figura 2.32) ( $N$ )
$f_{ck}$	– valor característico da resistência à compressão de um betão (NP-ENV 206) ( $MPa$ )
$f_{cm}$	– valor médio da resistência à compressão (em cilindros) de um betão aos 28 dias ( $MPa$ )
$f_{cm,j}$	– valor médio da resistência à compressão (em cilindros) de um betão aos “ $j$ ” dias ( $MPa$ )
$f_{ctm,fl,j}$	– valor médio da resistência à tracção por flexão de um betão aos “ $j$ ” dias ( $MPa$ )
$f_{ctm,j}$	– valor médio da resistência à tracção simples de um betão aos “ $j$ ” dias ( $MPa$ )
$f_{ctm}$	– valor médio da resistência à tracção simples de um betão aos 28 dias ( $MPa$ )
$f_{ct,p}$	– tensão de tracção perpendicular à ligação betão-pastilha obtido no ensaio de "pull off" ( $MPa$ )
$f_{ctm,p}$	– valor médio da resistência à tracção perpendicular à ligação betão-material ("pull off") ( $MPa$ )
$f_{Lm}, f_{Lum}$	– valor médio da resistência à tracção do compósito de FRP ( $MPa$ )
$f_{Lu}$	– tensão de rotura à tracção dum provete de FRP ( $MPa$ )
$f_{su}$	– tensão de rotura à tracção dum provete de aço da armadura ordinária ( $MPa$ )
$f_{sum}$	– valor médio da tensão de rotura à tracção do aço da armadura ordinária ( $MPa$ )
$f_{sy}, f_y, f_{sym}$	– valor médio da tensão de cedência do aço da armadura ordinária ( $MPa$ )
$f_{syd}$	– valor de cálculo da tensão de cedência do aço da armadura ordinária ( $MPa$ )
$f_{syk}$	– valor característico da tensão de cedência do aço da armadura ordinária ( $MPa$ )
$h$	– altura duma viga ou espessura duma laje ( $m$ )
$h^*$	– afastamento entre as fibras traccionada e comprimida onde se avalia as deformações [Eq-3.32] ( $m$ )
$i$	– sub-índice de referência (-)
$l$	– distância entre apoios (ou vão) num protótipo ( $mm$ )
$l_t$	– comprimento de ancoragem (ou de aderência) que mobiliza a força de transferência $T_m$ da ligação ( $mm$ )
$l_{t,max}$	– valor máximo do comprimento efectivo de ancoragem ( ou de aderência) duma ligação ( $mm$ )
$l_L$	– comprimento da armadura de material compósito de FRP ( $mm$ )
$l_{t, série R}$	– valor máximo do comprimento efectivo de ancoragem da junta betão-CFRP na <i>série R</i> ( $cm$ )
$l_{t, série S}$	– valor máximo do comprimento efectivo de ancoragem da junta betão-CFRP na <i>série S</i> ( $cm$ )
$m_{Rd}, m'_{Rd}$	– valor de cálculo do momento flector resistente ( $kN.m$ )
$s$	– escorregamento ou deslizamento entre faces num junta ( $mm$ )
$s^*$	– distância entre as duas secções transversais onde se mede a curvatura [Eq-3.32] ( $m$ )
$s_{rm}$	– valor médio do afastamento final entre fendas ( $cm$ )
$\tan \delta$	– coeficiente de perda (amortecimento) de um adesivo (-)
$t_L$	– espessura do compósito de CFRP ( $mm$ )
$\Delta x$	– afastamento entre os LVDTs [Eq-3.33] ( $cm$ ).
$z_s$	– braço do binário das forças interiores da armadura ordinária de aço ( $m$ )
$z_L, z_{L,R}, z_{L,S}$	– braço do binário da força da armadura de material compósito de FRP das <i>séries R e S</i> ( $m$ )

### Notações Escalares Gregas

$\alpha$	– coeficiente de correcção do $f_{cm}$ do betão ( Figura 6.7) (-)
$\alpha_c$	– coeficiente de dilatação térmica do betão ( $^{\circ}C^{-1}$ )
$\alpha_L$	– coeficiente de dilatação térmica do compósito de FRP ( $^{\circ}C^{-1}$ )

$\alpha_M$	– coeficiente de dilatação térmica da matriz dum polímero ( $^{\circ}C^{-1}$ )
$\beta_{c,j}$	– constante dada pela expressão [Eq-3.24] (-)
$\delta_i, \delta'_i$	– valores inicial e corrigido do deslocamento vertical registado no LVDT n.º "i" [Eq-3.31] (mm)
$\delta_{m\acute{a}x}$	– valor máximo do deslocamento vertical central (flecha) dum modelo (viga ou laje) (mm)
$\epsilon_c$	– valor da extensão na fibra mais comprimida do betão ( $\%$ )
$\Delta\epsilon$	– variação da deformação do CFRP entre posições consecutivas dos extensómetros [Eq-3.36] ( $\mu m/m$ )
$\epsilon_{cr}$	– valor da extensão correspondente à resistência à tracção do betão ( Figura 6.7) ( $\%$ )
$\epsilon_{ctu}$	– valor da extensão última de tracção do betão ( Figura 6.7) ( $\%$ )
$\epsilon_{cu}$	– valor da extensão última do betão ( $\%$ )
$\epsilon_{Lu}^{s\acute{e}rie R}$	– valor da extensão longitudinal de ruína à tracção da manta de CFRP da <i>série R</i> ( $\%$ )
$\epsilon_{Lu}^{s\acute{e}rie S}$	– valor da extensão longitudinal de ruína à tracção do laminado de CFRP da <i>série S</i> ( $\%$ )
$\epsilon_L$	– valor da extensão longitudinal dum compósito de FRP ( $\%$ )
$\Delta\epsilon_L$	– variação da extensão longitudinal do laminado de CFRP ( $\%$ )
$\epsilon_{Lu}$	– valor da extensão longitudinal de ruína à tracção dum compósito de FRP ( $\%$ )
$\epsilon_{Lud}$	– valor de cálculo da extensão longitudinal de ruína à tracção dum compósito de FRP ( $\%$ )
$\epsilon_{Luk}$	– valor característico da extensão longitudinal de ruína à tracção dum compósito de FRP ( $\%$ )
$\epsilon_{Lum}$	– valor médio da extensão longitudinal de ruína à tracção dum compósito de FRP ( $\%$ )
$\epsilon_{m\acute{a}x}$	– valor máximo da extensão longitudinal à tracção do CFRP medido num ensaio de flexão da laje ( $\%$ )
$\epsilon_{m\acute{a}x,m}$	– valor médio da extensão longitudinal máxima à tracção do CFRP (ensaio de flexão das lajes) ( $\%$ )
$\epsilon_{su}$	– valor da extensão após rotura à tracção dum provete de aço da armadura ordinária (%)
$\epsilon_{sum}$	– valor médio da extensão após rotura à tracção do aço da armadura ordinária (%)
$\epsilon_{sy}$	– valor da extensão de cedência à tracção dum provete de aço da armadura ordinária (%)
$\phi$	– diâmetro de um varão de armadura ordinária (mm)
$\rho_L$	– percentagem de armadura de FRP em relação à área de betão (%)
$\rho_s$	– percentagem de armadura ordinária de aço à tracção em relação à área de betão (%)
$\rho_s'$	– percentagem de armadura ordinária de aço à compressão em relação à área de betão (%)
$\rho_w$	– percentagem de armadura de aço para esforço transversal (estribos) (%)
$\sigma_L$	– tensão de tracção longitudinal num compósito de FRP (MPa)
$\sigma_{m\acute{a}x}$	– valor máximo da tensão de tracção longitudinal no CFRP (MPa)
$\tau$	– tensão de corte ou tensão de aderência (MPa)
$\tau_{bm}$	– valor médio da tensão de aderência (MPa)
$\tau_{c\ max}$	– valor da resistência ao corte numa ligação colada ao betão, ensaio de "torque-test" (MPa)
$\tau_L$	– tensão de corte ou tensão de aderência na junta betão-adesivo-compósito (MPa)
$\tau_{max}, \tau_{med}$	– valores máximo e médio da aderência de uma junta colada tipo betão-adesivo-compósito (MPa)
$\tau_{med}$	– valor médio da tensão de corte entre posições consecutivas de extensómetros [Eq-3.35] (MPa)



# Capítulo 1

---

## Introdução

Neste preâmbulo, expõem-se os aspectos gerais sobre estruturas de betão armado, em particular, as situações merecedoras de uma análise de *reforço* ou *reabilitação*, através da *técnica de colagem* com *elementos não metálicos*. Introduzem-se os *novos materiais compósitos* de FRP, como alternativa aos tradicionais e equacionam-se os objectivos deste trabalho de investigação acerca dos aspectos principais relativos à *técnica de colagem de sistemas compósitos de CFRP ao betão*, em especial, os casos do *laminado* e da *manta*. No final, apresenta-se a organização dos assuntos descritos na tese.

### 1.1 - ASPECTOS GERAIS

O betão armado, pré-esforçado ou não, tem evidenciado as suas potencialidades ao longo do século XX, apresentando-se como uma das melhores opções na área da construção civil. Este facto é notório após a 2ª Guerra Mundial, onde passaram a construir-se estruturas mais esbeltas e arrojadas.

Porém, surgiram alguns problemas ignorados até há alguns anos, primeiro inerentes ao facto do material "milagroso" apresentar dificuldade de reajuste, sobretudo de capacidade de carga, uma vez consolidada a estrutura. Actualmente, muitas estruturas estão a atingir o período de vida inicialmente previsto, evidenciando-se os efeitos do envelhecimento e observando-se noutros o aparecimento de degradação prematura, muito antes deste período, face às características conhecidas dos materiais de construção. Com efeito, nunca se deu a devida importância aos aspectos da durabilidade das estruturas e tem sido colocado em segundo plano, o controlo de qualidade na construção de betão armado.

Entretanto, em algumas circunstâncias, o projectista é confrontado com condicionantes de projecto que limitam profundamente a solução estrutural e a natureza dos materiais a eleger. Incluem-se, neste âmbito, os reservatórios e os sistemas fabris onde predomina a agressividade do meio, em termos de degradação dos materiais. Outros casos existem, em que se pretende construir edifícios destinados a equipamentos muito sensíveis, sob o ponto de vista electromagnético, como por exemplo computadores ou aparelhos emissores/receptores. Deste modo, a simples utilização dos materiais



tradicionais em elementos estruturais pode pôr em causa, mais uma vez, a durabilidade estrutural ou a funcionalidade da edificação.

Presentemente, os melhoramentos a nível tecnológico aliados à implementação do controlo de qualidade do projecto e do processamento em obra, estimulam, nos engenheiros, a vontade de projectar estruturas mais arrojadas. Em contrapartida, debatem-se com dificuldades na compatibilização dos materiais correntes, com os modelos de cálculo disponíveis para a análise estrutural. A abordagem de uma estrutura especial mais complexa pode adicionar obstáculos à sua realização, segundo as técnicas correntes do betão armado e pré-esforçado, devido, nomeadamente, ao peso próprio excessivo, à dificuldade em vencer grandes vãos, à garantia das ligações e à morosidade do sistema construtivo.

As estruturas de betão estão, diversas vezes, sujeitas a cargas repetidas e a agentes agressivos que, por acções físicas e químicas, podem originar a fragilização mecânica das estruturas durante o seu período de vida, comprometendo a sua durabilidade. Assim, devem ser previstos, no projecto, materiais com as características mais adequadas às condições de utilização dessas estruturas, bem como planos de manutenção para a obra, de forma a garantir a longevidade desejada. A reduzida durabilidade dos tabuleiros de pontes de betão armado e/ou pré-esforçado tem conduzido a custos directos e indirectos (perturbações de tráfego) consideráveis, perante a necessidade de manutenção e de reabilitação dos mesmos. Em inúmeros casos, torna-se imperativo a necessidade de se ajustar novas técnicas à reabilitação e ao reforço de estruturas. Por exemplo, nos EUA, verificou-se ser necessário substituir um número considerável de tabuleiros deteriorados (250.000 dos 578.000 existentes), com custos avaliados no dobro dos iniciais. Por seu turno, no Reino Unido, os custos de reparação de cerca de 165.000 pontes, a realizar entre 1988 e 1999, foram estimados em 1.25 biliões de libras por Weaver (1995).

Apesar duma maneira geral, as estruturas de betão terem um período de vida útil longo, os seus requisitos podem alterar-se nesse período. Uma estrutura poderá, num futuro próximo, ter que suportar um espectro maior de cargas ou subscrever novas exigências normativas. Inúmeros são os casos de estruturas que têm de ser reparadas devido a acidentes. Existem outras situações em que se detectam erros durante a fase de projecto ou de construção, o que obriga a reforçar as estruturas, antes ou mesmo após entrarem em funcionamento.

Se alguma destas circunstâncias ocorrer, cabe ao engenheiro defrontar-se com a avaliação da opção pelo *reforço* da estrutura existente ou pela *substituição* por outra nova. Posteriormente, apresentar-se-ão as difíceis tarefas de concretização do tipo de *técnica de reforço* e da selecção do *material* a usar.

O processo de reforço de estruturas de betão, objecto deste trabalho, recorre à *técnica da colagem* de *armaduras exteriores* com a utilização de *adesivos de epóxido*, originalmente surgida em França nos finais dos anos 60, quando L'Hermite (1967) e Bresson (1971) efectuaram os primeiros ensaios sobre vigas de betão reforçadas.

Entretanto, na sequência dos factos mencionados, conclui-se que os materiais tradicionais (nomeadamente o betão e o aço) começam a manifestar-se inadequados em determinadas situações, devendo ser encontradas alternativas. Desse modo, tem-se assistido ao crescimento dos *materiais compósitos*, utilizados inicialmente nos campos militar e aeronáutico, e posteriormente alargados à generalidade das indústrias. Quando as propriedades destes materiais são convenientemente ajustadas às estruturas de betão, sobretudo, através da garantia de uma adequada ligação ao betão, pela compatibilidade de deformações e da perfeita conjugação química entre eles, permitem a concepção de estruturas mais leves, mais resistentes e mais duráveis.

## 1.2 - MATERIAIS COMPÓSITOS DE "FRP" NO REFORÇO DE ESTRUTURAS DE BETÃO

No século XX, a investigação na área da ciência dos materiais proporcionou aos engenheiros uma certa curiosidade na linha de orientação dos novos materiais destacando-se, com êxito, os *compósitos*. O objectivo consiste em abordar materiais, com comportamentos mais eficientes nas aplicações específicas de engenharia, de modo a colmatar as lacunas evidenciadas com a utilização dos tradicionais. Deste modo, nesta última década, tem havido grande empenho na procura de materiais com características apropriadas aos novos projectos de engenharia, visto ser cada vez mais urgente a aplicação de materiais muito resistentes, duráveis, pouco deformáveis e capazes de absorver e dissipar energia, sem ocorrência de rotura frágil.

Devido ao seu êxito em diversas indústrias, foram despertando o interesse da engenharia civil em os aplicar, nomeadamente, sob a forma de produtos *polímeros* (ou *compósitos*) *reforçados com fibras* de sigla internacional FRP "Fiber Reinforced Polymer", empregues como armaduras não metálicas. Neste âmbito, são de assinalar *propriedades* como a elevada resistência à tracção, o baixo

peso específico, a resistência à corrosão, a elevada resistência à fadiga, o bom amortecimento ao choque e ao isolamento electromagnético.

A família dos compósitos de FRP resulta, sobretudo, da conjugação de *fibras contínuas* de reforço orgânicas ou inorgânicas, com a *resina termoendurecível* e com as *cargas* de enchimento designadas por "fillers". Para constituintes secundários, estes materiais recorrem a *aditivos* e a outros produtos, como por exemplo, os agentes catalizadores, os promotores ou os aceleradores. As principais *fibras* comercializadas são o vidro, o carbono e a poliamide aromática (aramida ou kevlar<sup>®</sup>), sendo os respectivos compósitos reforçados, denominados internacionalmente por *GFRP* (Glass Fiber Reinforced Polymer), *CFRP* (Carbon Fiber Reinforced Polymer) e *AFRP* (Aramid Fiber Reinforced Polymer). O comportamento final de um compósito de FRP é acentuadamente dependente dos materiais que o constituem, da disposição das fibras principais de reforço e da interacção entre os referidos materiais. Os factores intervenientes nesse comportamento são a orientação, o comprimento, a forma e a composição das fibras, as propriedades mecânicas da resina da matriz, assim como a adesão ou ligação entre as fibras e a matriz (Juvandes et al., 1996-a).

Um número elevado de investigadores e organizações têm vindo a trabalhar, com êxito, no processo de integração destas matérias nas aplicações de engenharia civil. Consta-se que, a nível mundial, este assunto despertou frentes de trabalho com algumas conotações geográficas peculiares. Sendo assim, destacam-se três potenciais frentes de trabalho: o Japão interessado na pré-fabricação, no pré-esforço por pré-tensão e no reforço aos sismos; a América do Norte motivada pelas soluções de problemas de durabilidade de pontes e a Europa preocupada com a necessidade de preservar e reabilitar o património histórico.

Assim, para as situações de *reforço* e de *reabilitação* expressas no início desta secção, é possível recorrer a *armaduras não metálicas* e a técnicas executadas com produtos compósitos, como as *mantas* ou os *laminados* de FRP (pré-esforçados ou não), que são colados criteriosamente nas faces dos elementos (para resistir à flexão e ao corte), ou como as aplicações exteriores de *cabos* de FRP pós-tensionados e não aderentes. Para as anomalias surgidas em pilares, devido a sismos, destaca-se a técnica de reforço por encamisamento total ou parcial daqueles elementos com *fios* ou *mantas* contínuos de FRP (reforço ao corte e aumento de ductilidade). Em qualquer dos casos, o novo material apresenta imunidade à corrosão e facilidade de aplicação, ao contrário do que ocorre com os elementos metálicos correntes.

Das diversas formas de intervenção num reforço, a *técnica de colagem* de *armaduras não metálicas* na superfície do betão será o objecto principal deste trabalho. Em análise estão as armaduras de material compósito que surgiram, na Europa, com a forma de *laminados* pré-fabricados

de CFRP e, no Japão e EUA, sob a forma de *mantas*, *tecidos* e *firos* que só adquirem a consistência de um FRP, após polimerização na colagem “in situ” ao elemento de betão.

### 1.3 - OBJECTIVOS DO TRABALHO

Embora a necessidade de *reforçar e/ou reabilitar* as estruturas de betão armado tenha sido crescente nestes últimos anos, ainda não se dispõe de experimentação suficiente sobre o uso de materiais compósitos, que permita fundamentar a definição de regras e conceitos de dimensionamento e de execução dos projectos de reforço.

A maior parte dos trabalhos executados até hoje baseia-se, nomeadamente, no resultado do comportamento experimental de modelos reduzidos de laboratório e na prática recente das novas técnicas com os sistemas compósitos de FRP. No nosso país, poucos são os trabalhos de investigação realizados neste domínio. A maioria dos materiais de reforço presentes no mercado nacional são importados e muito recentes e o conhecimento das suas características é baseado nas fichas técnicas do produto.

A necessidade de expandir o *conhecimento* e a *confiança* na utilização dos compósitos de CFRP no reforço de estruturas de betão, a nível nacional, impõe que o comportamento dos materiais, as técnicas de aplicação e o funcionamento posterior das estruturas reforçadas devam ser claramente compreendidos pelos técnicos da construção civil.

Estes requisitos tornam-se fundamentais, quando se investem em programas científicos de análise e de caracterização do comportamento mecânico dos novos materiais, como são, por exemplo, as iniciativas em curso no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (DECivil – FEUP) e concretamente, o projecto de investigação desta tese.

Os objectivos em questão compreendem um trabalho de análise sobre a *técnica de colagem* com *armaduras de CFRP*, a três níveis:

- i) - No início deste trabalho, muitas dúvidas foram levantadas em relação às técnicas, aos materiais, ao funcionamento após as intervenções, etc. e constatou-se, então, a necessidade de realizar uma pesquisa internacional pormenorizada e actual, de modo a poder esclarecer questões como:

- qual o *comportamento geral* das estruturas reforçadas com CFRP?

- quais os *modos de ruína* esperados nestas situações?
  - qual o *comportamento da ligação* entre o betão, o adesivo e o compósito a nível geral, sob o ponto de vista da aderência da ligação e em termos da zona de ancoragem?
  - como se comportam os sistemas de CFRP a *longo prazo*, principalmente em termos de durabilidade, de história de carga e, em certa medida, de comportamento ao fogo?
- ii) - Sem obedecer a um projecto específico, pela primeira vez neste trabalho, a investigação envolve uma componente de análise experimental que consiste na realização de ensaios sobre uma série de vigas tipo de betão armado, reforçadas exteriormente por colagem de laminados pré-fabricados unidireccionais de carbono. Com estes ensaios, pretende avaliar-se o comportamento estrutural das vigas segundo vários aspectos, tais como:
- a variação do *comprimento de colagem*;
  - o tipo de *preparação da superfície* do betão;
  - o *tipo* de adesivo;
  - a forma de distribuição das *tensões de corte* nas interfaces betão-adesivo-laminado;
  - o *sistema de ancoragem* das extremidades;
  - a presença de betões com determinado *grau de deterioração*.
- iii) -A última etapa do programa de investigação resultou de uma solicitação concreta de reforço do tabuleiro de uma ponte. Foi analisada a viabilidade do aumento da capacidade de carga da laje superior do tabuleiro da “Ponte de Nossa Senhora da Guia” (Ponte de Lima) e, em paralelo, foi equacionada a hipótese de concretização deste aumento de resistência através da aplicação de dois materiais compósitos reforçados com fibras de carbono unidireccionais (CFRP), o *laminado pré-fabricado* e a *manta flexível e pré-impregnada*. Este programa consiste na comparação dos resultados de ensaio de flexão sobre uma série de faixas de lajes com capacidade resistente semelhante, reforçadas exteriormente por colagem de cada um dos dois sistemas anteriores.

## 1.4 - ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A estrutura desta dissertação consta de oito capítulos, incluindo a introdução, as considerações finais e as referências, acrescida de três anexos e um glossário, sendo organizada de acordo com os objectivos pretendidos.

Assim e após esta introdução, no Capítulo 2, descreve-se de forma resumida e actualizada o resultado da pesquisa bibliográfica sobre o reforço de estruturas de betão, com a colagem de novos materiais compósitos, em particular, os *polímeros reforçados com fibras de carbono* (CFRP) unidireccionais. Apresentam-se algumas contribuições, sobretudo experimentais, sobre o comportamento em geral, os principais modos de ruína, a ligação entre betão-adesivo-compósito a nível de aspectos condicionantes, de avaliação da aderência e de interpretação da zona de ancoragem. É discutida a contribuição a longo prazo com base na durabilidade, na história de carga e no comportamento ao fogo perante uma acção de acidente.

No Capítulo 3, discrimina-se o programa de investigação experimental, incluindo os critérios de projecto, os modelos reduzidos de reforço e o sistema de instrumentação utilizado nos ensaios de flexão. Expõe-se a caracterização dos materiais intervenientes na execução dos protótipos, segundo os quatro constituintes principais, ou seja, o betão, o aço, o compósito e os adesivos de ligação. De entre os sistemas compósitos disponíveis no mercado, seleccionam-se o *laminado pré-fabricado* e a *manta flexível e pré-impregnada*.

O Capítulo 4 reporta-se à caracterização da ligação colada betão-adesivo-CFRP, através da avaliação da aderência nas juntas betão-adesivo e betão-adesivo-compósito, por meio de ensaios de arrancamento por tracção na superfície do betão. O objectivo deste capítulo é esclarecer-se, igualmente, os critérios definidos nos procedimentos das duas fases, que constituem a técnica de aplicação dos dois sistemas de CFRP em estudo.

Os resultados dos ensaios de flexão em quatro pontos de carga e de modo estático apresentam-se no Capítulo 5, quer para os modelos das três séries de vigas, sendo umas recentes e outras com oito anos, quer para os modelos das três séries de faixas de laje. Em ambos os casos, as estruturas de betão são reforçadas com os materiais compósitos de CFRP unidireccionais. A estrutura do capítulo é dividida em três secções, onde se descrevem os resultados dos ensaios, primeiramente do grupo de vigas recentes (*série tipo A e tipo B*), depois do grupo de vigas com oito anos de idade (*série tipo C*) e, por último, do grupo que constitui a série de faixas de laje (*tipo N, tipo R e tipo S*).

No Capítulo 6, discutem-se os resultados experimentais anteriores, mediante a *análise comparativa* entre as séries testadas e a *interpretação numérica* de alguns exemplos, embora em número reduzido. Inicia-se com o exame e a conclusão acerca do comportamento geral das três séries de vigas reforçadas *tipo A, tipo B e tipo C*. Procede-se, em seguida, a novo exame, desta vez relativamente ao grupo das três séries de faixas de laje, duas delas reforçadas com laminados (*série S*) e mantas (*série R*) de CFRP e uma terceira de betão armado (*série N*). No final de cada etapa de discussão dos resultados, salientam-se as principais conclusões sobre o comportamento geral de vigas

e de lajes reforçadas por colagem destes sistemas de CFRP (o laminado pré-fabricado e a manta flexível e pré-impregnada).

As considerações finais sobre a experiência do reforço de modelos reduzidos de betão com sistemas de CFRP tecem-se no Capítulo 7 e propõem-se algumas sugestões, visando desenvolvimentos futuros.

A presente dissertação termina com as exposições do Capítulo 8 de referências, dos anexos A, B e C e do glossário acerca dos termos mais utilizados no domínio dos sistemas de FRP.

# Capítulo 2

---

## Revisão Bibliográfica

Para situar o tema principal de investigação deste trabalho, sobre o reforço de estruturas de betão com a colagem de *novos materiais compósitos*, foi realizada uma ampla pesquisa bibliográfica. Neste capítulo, descrevem-se de forma resumida e actualizada os principais aspectos, preocupações e conclusões discutidos em vários trabalhos desenvolvidos na área da colagem de armaduras a estruturas de betão. Paralelamente, ao longo do texto procura estabelecer-se uma terminologia nova, em consonância com os diversos conceitos associados ao tema e documentados nas referências internacionais.

### 2.1 - REFORÇO DE ESTRUTURAS DE BETÃO POR COLAGEM DE ARMADURAS

Nesta secção, em primeiro lugar, apresenta-se uma introdução do panorama internacional sobre o reforço de estruturas de betão, descrevendo-se as várias técnicas de intervenção, nomeadamente a nível de *reforço* e de *reabilitação* de estruturas existentes. Ao longo deste estudo, expõe-se a interpretação de vários países e a importância dos materiais, sobretudo os materiais compósitos, na classificação das técnicas de reforço.

Seguidamente, dá-se particular ênfase à técnica de colagem de armaduras exteriores a elementos de betão. Neste contexto, descreve-se a sua história, desde a origem até aos nossos dias, especificando as aplicações de natureza *metálica* e *não metálica*, sendo estas do tipo “Polímeros Reforçados com Fibras” (FRP).

#### 2.1.1 - Introdução ao reforço de estruturas de betão

Em engenharia civil, uma construção deve oferecer boa funcionalidade aos seus utentes, durante a vida útil requerida pelo projecto. De uma maneira geral, as construções de betão armado têm um período longo de vida. No entanto, os requisitos sobre a estrutura podem alterar-se nesse espaço de tempo, ameaçando a esperança remanescente dessa vida útil, ao nível das condições de utilização e de segurança.

Frequentemente, na construção civil surgem *situações* onde é necessário aumentar a capacidade portante e o isolamento electro-magnético de uma estrutura de betão armado em determinado



momento da sua existência, devido à alteração da função principal de utilização, à subscrição de novas exigências normativas, a deficiências de projecto ou de construção e ao aumento do efeito da acção actuante por eliminação pontual de elementos estruturais. Existem ainda *outras situações* em que é prioritário efectuar a recuperação estrutural para níveis de segurança desejáveis, como consequência do aparecimento de anomalias causadas por degradação dos materiais com o tempo ou por acções acidentais (explosão, incêndio ou sismo, etc.). Perante estes factos, e definidos os objectivos a atingir com a estrutura em questão, torna-se necessário equacionar que tipo de intervenção é a mais apropriada: o *reforço* de elementos existentes, a *substituição* de parcelas estruturais ou a introdução de *novos sistemas* estruturais.

Optando pela reparação da estrutura, as técnicas de *reforço* (a utilizar nas primeiras situações) e de *reabilitação* (a empregar nas segundas situações) têm ficado limitadas aos sistemas tradicionais que são descritos no trabalho de Regina de Souza (De Souza, 1990). Por exemplo, para o caso do reforço de vigas à flexão pode contar-se, habitualmente, com os tipos de intervenção seguintes (Monteiro et al., 1996):

- i) *Técnicas de reforço activas*: por pré-esforço exterior não aderente;
- ii) *Técnicas de reforço passivas*: por colagem de perfis ou chapas metálicas; por encamisamento do elemento; por colocação de perfis metálicos; por colocação de elementos pré-fabricados.

Estes sistemas metálicos, contudo, podem criar dificuldades técnicas que, na primeira hipótese, consistem no estabelecimento dos sistemas de ancoragem e na necessidade de evitar a corrosão dos cabos. No segundo caso, deve haver uma preocupação permanente em evitar a corrosão das chapas, na medida em que tal põe em perigo todo o sistema de colagem.

Na última década, tem havido grande empenho na procura de materiais com características apropriadas aos novos projectos de engenharia, visto ser cada vez mais urgente a aplicação de materiais muito resistentes, duráveis, não oxidáveis, pouco deformáveis e capazes de absorver e dissipar energia, sem ocorrência de rotura frágil (Brito, 1986). Os *materiais compósitos*, neste contexto, representam um enorme avanço sobre o esforço permanente de optimização dos materiais estruturais (Taly, 1998).

Hoje em dia, o uso de *materiais compósitos* no universo das aplicações realizadas por engenheiros civis, é ainda reduzido. Em contrapartida, as indústrias aero-espacial, automobilística, ferroviária e naval empregam, com frequência, estes materiais nos seus produtos. Inicialmente, estas indústrias limitavam a sua aplicação a componentes estruturais secundários e/ou a combinações com

os materiais como o aço, o alumínio e a madeira. Recentemente, assistimos a uma confiança crescente nas capacidades resistentes destes materiais expressa na execução de estruturas principais para satélites, naves espaciais, automóveis, barcos, etc.

Devido ao seu êxito, a engenharia civil manifestou grande interesse em os aplicar, nomeadamente, sob a forma de produtos de *polímeros reforçados com fibras* de sigla internacional FRP, “Fiber Reinforced Polymer (Plastic)”, empregues como armaduras não metálicas. Neste âmbito, são de assinalar propriedades como a elevada resistência à tracção, o baixo peso específico, a resistência à corrosão, a elevada resistência à fadiga, o bom amortecimento ao choque e ao isolamento electromagnético. Os produtos de FRP são anisotrópicos e na sua composição as fibras regem, praticamente, a capacidade resistente do sistema. Não apresentam patamar de cedência (plastificação), comportando-se como materiais perfeitamente elásticos até à ruína (Iyer et al., 1991; Nanni, 1993; ACI 440R-96, 1996; EUROCOMP, 1996).

Assim, para as situações de *reforço* e de *reabilitação* expressas no início desta secção, é possível recorrer a armaduras não metálicas e a técnicas executadas com produtos compósitos, como as mantas ou os laminados de FRP (pré-esforçados ou não) que são colados criteriosamente nas faces dos elementos (para resistir à flexão e ao corte), ou como as aplicações exteriores de cabos de FRP pós-tensionados e não aderentes. Para as anomalias surgidas em pilares, devido a sismos, destaca-se a técnica de reforço por encamisamento total ou parcial daqueles elementos com fios ou mantas contínuos de FRP (reforço ao corte e aumento de ductilidade). Em qualquer dos casos, o novo material apresenta imunidade à corrosão e facilidade de aplicação, ao contrário do que ocorre com os elementos metálicos correntes.

Diversos países da Europa apresentam um objectivo comum, ou seja, a necessidade de reforçar e/ou reabilitar elementos estruturais do seu vasto património histórico. Nesse sentido, hoje é possível encontrar vários produtos compósitos de FRP na indústria da construção, sendo os mais relevantes os cabos tipo ARAPREE (Alemanha), os laminados unidireccionais de carbono tipo CARBODUR (Suíça), as cordas tipo PARAFIL Ropes (Reino Unido), os varões não aderentes tipo POLYSTAL (Alemanha), os varões tipo SPIFLEX e os cabos JONC J.T.(França). Outros países como os EUA, o Canadá e o Japão são, do mesmo modo, potenciais fontes de investigação e apresentam grande experiência no domínio desses e outros (tecidos e mantas pré-impregnados) sistemas de materiais compósitos reforçados com fibras. O estado actual de conhecimentos sobre materiais compósitos no reforço de estruturas de betão foi resumido em 1996 por Juvandes et al. (1996-a; 1996-b). Entretanto, nestes últimos anos confirma-se a expectativa gerada à volta dos novos materiais, traduzida na publicação em massa de trabalhos de investigação. Assim, o estado actual dos conhecimentos nesta

área passa a ser representado, necessariamente, pela informação compreendida nos três níveis seguintes:

- i) *Nas publicações dos encontros internacionais como:* os 1º e 2º do ACMBS (1992 e 1996) e o 1º do CDCC'98 (1998) realizados no Canadá; os ICCI'96 (1996) e ICCI'98 (1998) efectuados nos EUA; os 2º e 3º simpósios de FRPRCS (1995 e 1997) decorridos na Bélgica e no Japão respectivamente; na Europa, as realizações do “US-Canada Europe Workshop in Bridge Engineering” (1997), do “Structural Faults & Repair” (1997) e do ECCM-8 (1998);
- ii) *Em compilações sobre o estado actual dos conhecimentos editados:* por Nanni (1993); pelo comité de trabalho 440C do ACI (ACI 440R-96, 1996); pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Juvandes et al., 1996-a); pelo grupo de trabalho TC592 do JCI (JCI TC952, 1998);
- iii) *Em publicações sobre procedimentos para projecto e construção com FRP propostos pelos países seguintes:* o Japão através de JSCE (1997); o Canadá com especificações adicionais ao “Canadian Standards Association” (CSA, 1996), a Suíça com as publicações D0128 (1995) e D0144 (1997) da série “Documentation SIA”; o EUA em futuras publicações dos sub-comités 440F e 440H do ACI (1999, versões provisórias).

Das diversas formas de intervenção num reforço já descritas, a *técnica de colagem de armaduras não metálicas* na superfície de betão será o objecto de investigação ao longo dos vários capítulos deste trabalho. A opção por uma técnica de colagem exige, à partida, a presença de um betão de boa qualidade, bem como a selecção de uma armadura e de um adesivo credíveis para os objectivos em causa. Em estudo estará, principalmente, a investigação de armaduras de sistemas compósitos de FRP do tipo unidireccional (fibras segundo uma direcção principal) e todos os princípios fundamentais que conduzam à concretização e desempenho com êxito do reforço estrutural por colagem. A experiência demonstra que as estruturas assim reforçadas obtêm aumento significativo de resistência e algum de rigidez, sendo o último mais evidente em estado fendilhado do betão e, ainda, que o mecanismo de aderência na interface de ligação betão-adesivo-compósito é condicionado pelo material mais fraco, geralmente o betão (Täljsten, 1994).

Os critérios de concepção e os procedimentos de construção de reforços com colagens de sistemas de FRP são, actualmente, vagos e dispersos devido a factores como a novidade, a diversidade de formas do produto, os múltiplos campos de aplicação e a divergência de opiniões quanto aos seus objectivos. Contudo, alguns países têm compensado o seu investimento em trabalhos exaustivos de investigação, através da publicação de recomendações, contendo a convergência de

experiências, opiniões e conceitos, com vista à uniformização de critérios de aplicação (projecto e construção) dos sistemas de FRP comerciais, produzidos ou adoptados como produtos de reforço credíveis no país.

Entre 1996 e 1998, no Japão, generalizou-se a designação do termo “Continuous Fiber Sheets” para os produtos comercializados na construção civil com integração de fibras contínuas e sob a forma de elementos contínuos de mantas, tecidos ou cordões, pré-impregnados ou não com uma resina superficial (JSCE, 1997; JCI TC952, 1998). O reforço de um elemento de betão por colagem, nestas condições, designa-se por “Strengthening” e pode classificar-se segundo quatro categorias. Na Tabela 2.1 expõem-se estas categorias através da distinção dos objectivos e das áreas de intervenção (pontes ou edifícios) que as representam.

Tabela 2.1 - Classificação de um reforço segundo o “Japan Concrete Institute” (JCI TC952, 1998).

Técnica de reparação		Objectivo do reforço	Áreas de investigação
Reforço por colagem	1	à flexão	pilares (pontes, edifícios), longarinas (pontes), vigas, lajes, chaminés
	2	ao corte	pilares (pontes, edifícios), longarinas (pontes), vigas, paredes, aberturas
	3	à compressão	pilares (pontes, edifícios)
	4	prevenção da deterioração	chaminés, túneis, postes

Nos EUA, o comité de trabalho do “American Concrete Institute” (ACI) com a designação de “ACI Committee 440” é responsável pela dinamização e pelas actividades na área dos sistemas compósitos de FRP aplicados à construção com betão. Da experiência resumida numa publicação do subgrupo designado por “Subcommitte 440C (ACI 440R-96, 1996), pode constatar-se a divisão dos reforços com a técnica da colagem em dois grupos principais: em vigas de betão e em confinamentos. Entretanto, no final de 1999 prevê-se uma publicação do “Subcommitte 440F” (ACI 440F, 1999 – versão de trabalho) que generaliza a anterior classificação e adopta três campos principais de intervenção atribuindo a cada, um termo específico que se descreve em seguida:

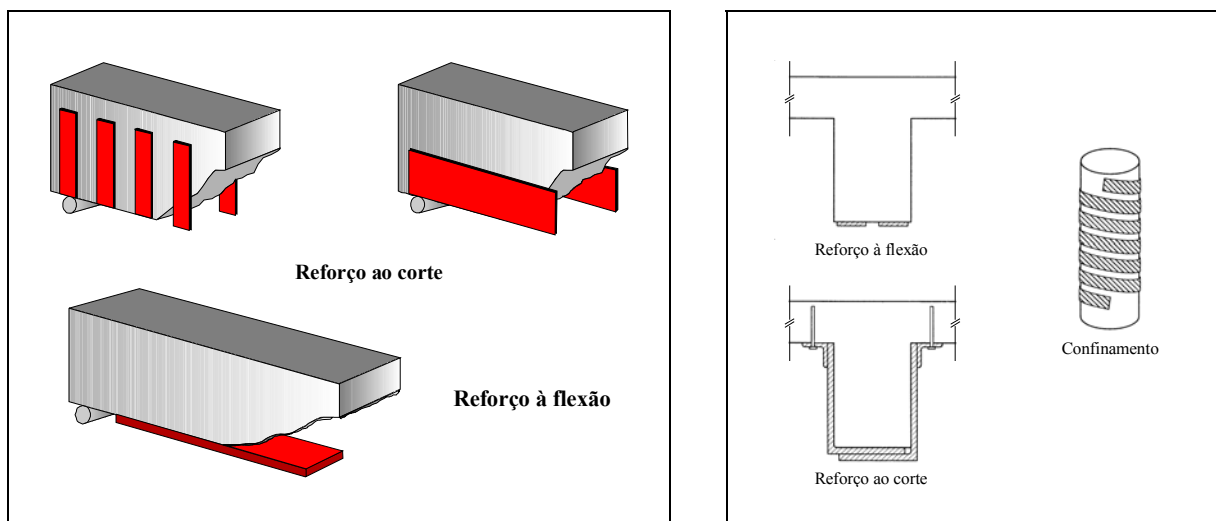
- i) “*Rehabilitation*”: traduz as situações de recuperação da resistência de estruturas onde esta ficou comprometida, devido a deficiências traduzidas em degradação contínua de elementos (casos de deterioração natural ou por acidente dos materiais);
- ii) “*Retrofit*”: designação atribuída ao reforço estrutural de elementos para a correcção de anomalias, decorrentes de deficiências de projecto ou de construção, e da resistência a cargas adicionais devido a uma nova utilização;
- iii) “*Seismic*”: representa as situações de implemento da resistência à acção sísmica, por meio do aumento de ductilidade e de resistência ao corte dos elementos estruturais, permitindo, deste modo, a dissipação de energia e a capacidade de deformação para os níveis de acções estabelecidas no regulamento.

Contudo, qualquer dos casos de reforço descritos ajustar-se-á à necessidade comum de melhorar a resistência à flexão, ao corte, à compressão e ductilidade ou à tracção.

De um modo geral, os restantes países sem documentações específicas sobre compósitos de FRP, têm adoptado os critérios estabelecidos para os reforços colados com armaduras metálicas, adaptando nos casos mais duvidosos, as conclusões e sugestões dos países mais avançados nesta área. O Canadá, a Alemanha e a Suíça constituem excepções, na medida em que o primeiro apresenta um desenvolvimento semelhante à directriz dos EUA (CSA, 1996) e os restantes dispõem de critérios específicos (construção, projecto e aplicação) para o reforço com a colagem de laminados de CFRP (Compósitos Reforçados com Fibras de Carbono) (D0128, 1995; D0144, 1997; Homologação Nr. Z-36.12-29, 1997; Homologação Nr. Z-36.12-54, 1998).

Em termos gerais, conclui-se que, a nível da construção civil internacional, os sistemas compósitos de FRP do tipo *laminado* (pré-fabricado) e do tipo *manta* ou *tecido* flexíveis (com resina pré-impregnada) são os mais estudados e aconselháveis para as *técnicas de reforço por colagem* exterior ao longo da superfície dos elementos de betão mais traccionados.

Para além das formas habituais usadas nos reforços à flexão e ao corte com a adição de chapas metálicas (observar Figuras 2.1 a) e b)), os novos materiais são muito mais flexíveis e abrangentes, potenciando outras formas de aplicação que podem ser resumidas nos esquemas ilustrados na Tabela 2.2. No item 2.2.1, descrever-se-ão as formas e a caracterização dos produtos compósitos de FRP agora ilustrados.



a) Referido em Stabilator (1997).

b) Segundo documento SIA (D0144,1997).

Figura 2.1 - Formas gerais de reforços exteriores.

### 2.1.2 - História da técnica de colagem

Cedo o homem aprendeu a juntar diferentes materiais entre si, recorrendo a outros a fim de concretizar a ligação (propriedade adesiva) como por exemplo a argila, o barro, as resinas vegetais, a clara do ovo e muitos outros. Nas suas civilizações, os Egípcios, os Gregos e os Romanos sem o conhecimento do “princípio de aderência”, utilizavam, na construção de madeira e de pedra, misturas adesivas como o sangue de animais e as resinas vegetais (Raknes, 1971).

Com o avançar do tempo, o princípio de colagem foi evoluindo, ajustando-se, na construção civil, ao campo específico do reforço de estruturas de betão através da *técnica de colagem* de armaduras. O método é simples, onde chapas ou placas de dado material são adicionadas à superfície de elementos de betão, por aplicação ou injeção de um adesivo, resultando numa estrutura com uma armadura de tracção adicional. O *adesivo* promove a ligação ao corte entre o betão e a armadura exterior, ao longo da interface de colagem, e transforma o conjunto numa estrutura composta. A técnica iniciou-se com a aplicação de *armaduras metálicas*, sobretudo com chapas de aço Fe 360 de espessuras compreendidas entre 3 mm a 10 mm e larguras de 60 mm a 300 mm (D0144, 1997). Recentemente, a *técnica de colagem* recorre a aplicação de *armaduras não metálicas*, através de sistemas compósitos de FRP com as formas de laminados, de mantas e de tecidos (a descrever no item 2.2.1).

Tabela 2.2 – Reforços tipo mais comuns com colagem de laminados, mantas e tecidos de FRP ao betão.

Sistema FRP	REFORÇO TIPO Comportamento / Forma / Estrutura	
LAMINADOS / MANTAS (unidireccionais)		
	<b>FLEXÃO</b>	
	<b>CORTE</b>	<b>FLEXÃO /CORTE</b>
TECIDOS (bi ou multidireccionais)		
	<b>COMPRESSÃO / DUCTILIDADE</b>	<b>IMPACTO / EXPLOSÃO</b>

### **Armaduras metálicas**

Esta técnica surgiu em França nos finais dos anos 60, quando L'Hermite (1967) e Bresson (1971) efectuaram os primeiros ensaios sobre vigas de betão reforçadas com chapas metálicas. Segundo Dussek (1974), este método de reforço é utilizado na África do Sul desde 1964. Em França, uma ponte de betão foi reforçada por colagem de chapas metálicas no princípio dos anos 70 (L'Hermite, 1977). Simultaneamente, em Inglaterra iniciava-se a investigação nesta área o que proporcionou a reabilitação de várias pontes, como descrevem Mays et al. (1985). Até hoje, em todo o mundo foram reabilitadas com êxito várias estruturas de betão, incluindo pontes, através da colagem exterior de chapas metálicas. Todos os casos relatados foram reforçados essencialmente, à flexão, por serem mais recentes os casos de aumento da resistência ao corte e à compressão, como citam Jones et al. (1985). Quinze anos após o reforço, as estruturas continuam a trabalhar, mas entretanto, iniciou-se um processo de deterioração sobretudo a nível de corrosão do aço e de alguma degradação do adesivo. Outras aplicações nesta área são referidas no trabalho de investigação de Täljsten (1994).

Paralelamente ao campo de aplicação, foram realizados vários estudos experimentais e analíticos. Destes, salienta-se a compilação de Ladner et al. (1981) sobre um conjunto de ensaios efectuados no “Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research” (EMPA) que analisam a transmissão de esforços na ligação, o comportamento estático do reforço, a fadiga, o comportamento a longo prazo e as juntas das chapas. Segundo Malek (1997), destacam-se os trabalhos datados de 1982 de MacDonald e Calder acerca do comportamento estático de vigas reforçadas; de 1985 de Van Gemert e Vanden Bosch com os estudos sobre a fadiga e a exposição climática extensa de vigas reforçadas; de 1987 em que Swamy et al. analisam a importância das propriedades mecânicas do betão no reforço; de 1990 onde Hamoush e Ahmad fazem a interpretação analítica dos modos de ruína e de Ziraba et al. publicado em 1994 sobre a proposta de recomendações para projecto.

As diversas questões abordadas pela literatura internacional, sobre o comportamento de estruturas de betão armado reforçadas com chapas de aço coladas ao betão com resina de epóxido manifestaram-se, também, nas investigações e em alguns casos de aplicação realizados em Portugal.

Em 1986, Alfaiate (1986) publica o “Reforço por Adição de Elementos Metálicos em Vigas de Betão Armado - Flexão Simples”, onde se descrevem as conclusões sobre os ensaios realizados em vigas de betão reforçadas à flexão.



Rodrigues (1993) efectuou ensaios em modelos da ligação aço-resina com cargas monotónicas e em modelos da ligação aço-resina-betão sujeitos a acções monotónicas ou cíclicas. O objectivo a atingir foi o estudo do comportamento às acções monotónicas, e em particular às acções cíclicas, da ligação aço-resina-betão com buchas metálicas, na medida em que o território português se localiza numa região sísmica importante.

A intervenção realizada no edifício da Central de Correios de Lisboa, em Cabo Ruivo (Appleton et al., 1995), originou o trabalho de investigação de Viegas (1997). A razão principal deste trabalho foi a análise do comportamento em serviço e à rotura de uma viga de betão armado reforçada com chapas metálicas coladas e com buchas metálicas, onde a relação entre a área de armadura de reforço e a área de armadura inicial é superior à unidade.

A evolução histórica sobre a experiência da utilização da *técnica de colagem de armaduras metálicas* a elementos de betão evidencia alguns aspectos que devem merecer a atenção do projectista. Em linhas gerais, estes factores discriminam-se no artigo publicado na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas por Appleton et al. (1997) e resumem-se nos seguintes pontos:

- i) A técnica é adequada quando há deficiência nas armaduras existentes e só se as dimensões e a qualidade do betão dos elementos estruturais forem as desejáveis;
- ii) Devem utilizar-se aços de resistência baixa ou média, como o Fe 360, de modo a não ser necessária uma deformação elevada para mobilizar a sua capacidade resistente;
- iii) Requer-se uma cuidadosa preparação das superfícies do betão e das chapas para garantir condições de boa ligação entre as chapas de reforço e o betão existente;
- iv) Os problemas da transmissão de forças ao longo da interface de colagem podem ser atenuados, desde que se opte por um adesivo de epóxido com boa resistência ao corte (15 a 25 MPa) e se controle o nível das tensões de corte na interface, para não exceder a capacidade do betão que, geralmente, é o material condicionante do sistema (Täljsten, 1994). Citando Appleton et al. (1997), a ligação pode e deve ser complementada com buchas metálicas;
- v) Aconselha-se a aliviar a estrutura de todas as acções variáveis e permanentes removíveis na execução do reforço, de modo a garantir-se que as chapas adicionadas sejam mobilizadas para as cargas de serviço;

vi) As armaduras coladas devem ser protegidas contra a corrosão e a acção do fogo, de forma a que neste último caso resista ao fogo durante *30 minutos*, no mínimo.

Apesar do aço ser o material de reforço mais divulgado nas aplicações correntes de reabilitação, apresenta algumas desvantagens significativas. A literatura internacional, nomeadamente Meier (1997-a) e Täljsten (1994), resume os inconvenientes do aço em três pontos:

- i) A dificuldade de montagem “in situ” do sistema, demasiado pesado, de colagem das chapas metálicas e agravado com a acessibilidade limitada nalguns casos (ex: pontes);
- ii) O risco de corrosão na superfície da junta de ligação do aço ao adesivo;
- iii) A necessidade de criação de juntas de ligação entre chapas, devido às limitações das dimensões para o seu transporte.

### **Armaduras não metálicas**

Na sequência dos factos mencionados, conclui-se que os materiais tradicionais manifestam-se inadequados em determinadas situações, devendo ser encontradas alternativas. Além disso, o desenvolvimento tecnológico das construções depende do avanço apresentado pela área dos materiais. Com a evolução dos materiais que vão surgindo no mercado como a pedra, o tijolo, a madeira, o ferro, o aço e o betão armado e pré-esforçado, as estruturas transformaram-se desde as suas formas mais primitivas até modernas estruturas suspensas por cabos estaiados executadas, por exemplo, em pontes. Nestas circunstâncias, o desenvolvimento de novos materiais tem introduzido na construção estruturas melhores, mais duráveis e mais resistentes.

Ao longo dos últimos cinquenta anos, os *compósitos* têm impulsionado o aparecimento de novos produtos estruturais. Na Figura 2.2 expõe-se esquematicamente a importância relativa dos quatro materiais básicos da construção, ou seja, os metais, os polímeros, os compósitos e os cerâmicos, presentes no contexto histórico descrito no trabalho de Ashby e citado por Taly (1998). A diminuição de importância dos metais e o aumento dos materiais poliméricos, cerâmicos e compósitos é bastante representativo nesta figura. No período da II Guerra Mundial, os metais são fundamentais, mas a necessidade de construções de elevado desempenho, proporciona um impulso exponencial dos outros, em particular dos *compósitos*, tornando-os mais competitivos.

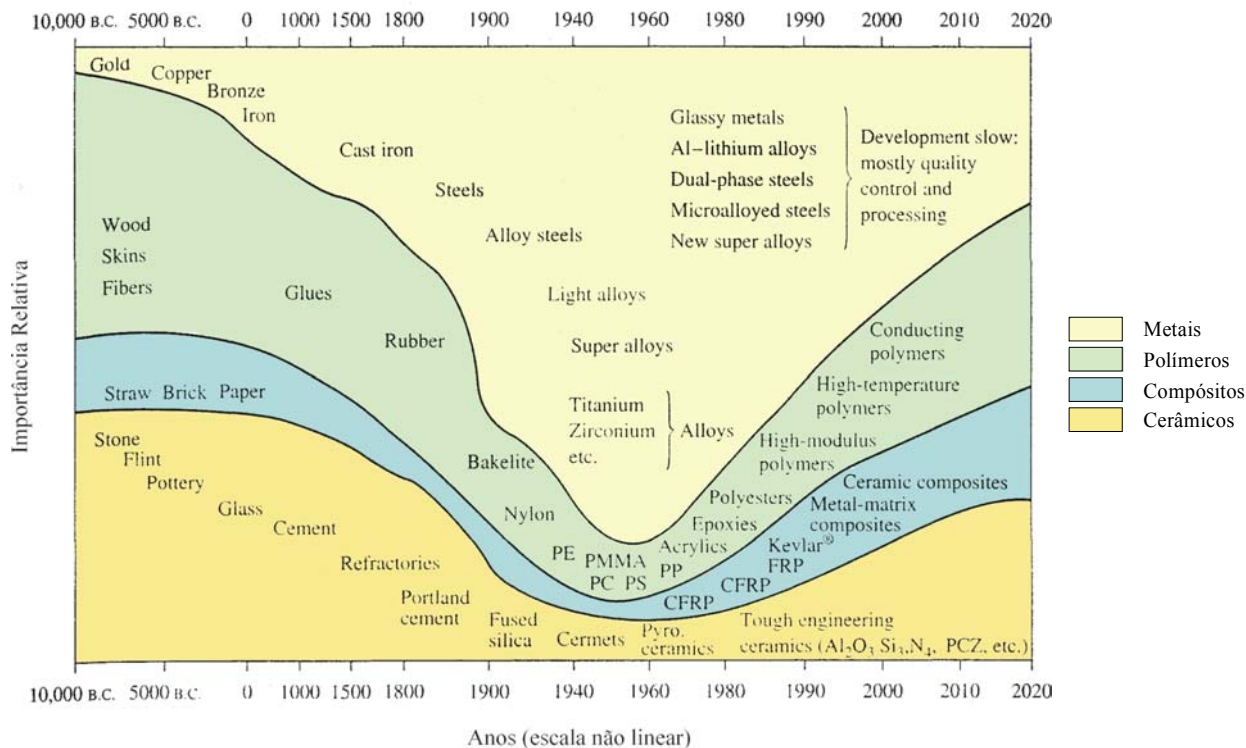


Figura 2.2 – Importância relativa dos materiais básicos ao longo do tempo (Ashby, 1987).

Desde 1940, que os *materiais compósitos* desempenham funções estruturais importantes no campo das engenharias militar, aeroespacial, náutica, ferroviária e automobilística. A 24 de Março de 1944, a aeronave BT-15 com fuselagem em polímero reforçado com fibras de vidro, executada por “Wright-Patterson Air Force Base Structures and Materials Laboratory, Dayton, Ohio”, consistiu no primeiro sucesso comercial da família dos compósitos reforçados (Taly, 1998). Estes materiais têm obtido uma significativa receptividade em diversas aplicações de *reparação e reforço* de estruturas a nível mundial. A construção civil é, sem dúvida, uma das áreas com o maior interesse em explorar os novos materiais, principalmente do tipo FRP (Compósitos Reforçados com Fibras), como o demonstram as publicações existentes nesta última década e referidas no item 2.1.1. Um número elevado de investigadores e organizações têm vindo a trabalhar no processo de integração, com êxito, destas matérias nas aplicações de engenharia civil (Saadatmanesh e Ehsani no prefácio de ICCI'98, 1998). Consta-se que, a nível mundial, este assunto despertou frentes de trabalho com algumas conotações geográficas peculiares. Sendo assim, destacam-se três potenciais frentes de trabalho: o Japão interessado na pré-fabricação, no pré-esforço por pré-tensão e no reforço aos sismos; a América do Norte motivada pelas soluções de problemas de durabilidade e a Europa preocupada com a necessidade de preservar e reabilitar o património histórico.

O reforço de estruturas pela *técnica de colagem*, em particular com *armaduras não metálicas*, foi testado, desde 1984, em centros de investigação como o “Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research” (EMPA) na Suíça, o “Federal Institute for Materials Testing” (MPA) e o “Institute for Building Materials, Concrete Construction and Fire Protection” (iBMB-Technische Universität Braunschweig) na Alemanha. Posteriormente, as suas potencialidades foram confirmadas em centros como o “Massachusetts Institute of Technology” (MIT) nos EUA e ainda noutros, no Canadá e no Japão. As armaduras de material compósito surgiram, na Europa, com a forma de *laminados* pré-fabricados de FRP e, no Japão e EUA, sob a forma de *mantas* e *tecidos* que só adquirem a consistência de um FRP após polimerização na colagem “in situ” ao elemento de betão. Estas formas irão ser abordadas detalhadamente no item 2.2.1.

Segundo Meier (1997-a), a primeira aplicação de um sistema de reforço com FRP ocorreu na Europa, na ponte “Kattenbusch Bridge” (Alemanha) entre 1986 e 1987, onde se utilizaram 20 tiras de laminados de polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP). Outro exemplo pioneiro consiste na ponte “Ibach Bridge” (Suíça), através da execução, pela primeira vez, de um reforço com a colagem de laminados de polímero reforçado com fibras de carbono (CFRP) através de uma resina de epóxido (Juvandes et al., 1996-a). De novo citando Meier (1997-a), desde 1991 que, aproximadamente, 250 estruturas de médio e grande porte foram reforçadas na Suíça com a adição de laminados de CFRP, correspondendo a cerca de 17.000 kg de compósito em substituição do equivalente em peso a 510 000 kg de aço (trinta vezes mais).

Na Alemanha e na Suíça, este sistema de FRP suscitou confiança ao nível da produção, do projecto e até da aplicação, a partir da publicação dos primeiros documentos de homologação de construção e de recomendações de projecto de sistemas laminados de CFRP (D0128, 1995; Rostásy, 1997-a; Homologação Nr. Z-36.12-29, 1997; D0144, 1997; Rostásy, 1998; Homologação Nr. Z-36.12-54, 1998). Consequentemente, o campo de aplicação dos laminados estendeu-se à reabilitação de edifícios de carácter histórico na Grécia (Triantafillou, et al., 1993; Triantafillou, 1996) e ao reforço ao sismo de paredes de alvenaria, muros e lajes em Itália (Spena et al., 1995). A experiência de outros países da Europa está descrita em várias comunicações incluídas nas actas da conferência editadas por Taerwe (FRPRCS-2, 1995) e em alguns artigos mais recentes (Meier, 1997-b; Taerwe, 1997; Seible, 1998).

O sistema de FRP desenvolvido nos finais dos anos oitenta pelos Japoneses, foi aplicado pela primeira vez em 1992 no processo de reforço e confinamento de elementos, numa ponte em Tokyo (Meier, 1997-a). Depois disso, os sistemas de FRP, contínuos e unidireccionais em forma de *manta* ou multidireccionais em forma de *tecidos*, foram empregues em situações de reforço ao sismo, à flexão e ao corte através do confinamento total ou parcial de pilares, paredes ou vigas de edifícios e de pontes de betão armado ou pré-esforçado (consultar a Tabela 2.2). A reconstrução da cidade de Kobe, após ter sido alvo do devastador sismo de Hanshin em Janeiro de 1995, é um exemplo da grande importância destes materiais na reparação e/ou reforço estrutural com FRP. Este caso, como muitos outros, estão descritos com pormenor na publicação de 1998 do “Japan Concrete Institute” (JCI), que retrata a experiência deste país na área do reforço de elementos de betão com sistemas contínuos de FRP (JCI TC952, 1998).

Paralelamente, os EUA e o Canadá têm investido na exploração de benefícios resultantes da reabilitação de estruturas de betão com os sistemas de FRP. O sistema CALTRANS de reforço exterior de pilares por encamisamento de mantas de fibra de vidro tem sido incrementado em áreas sísmicas. Entre 1993 e 1994, apenas nas cidades de Los Angeles e de Santa Mónica, esta técnica foi aplicada em, aproximadamente, 200 pilares (ACI 440R-96, 1996). Priestley et al. (1992) referem, na sua publicação de 1992, outras situações de revestimento exterior de pilares de pontes e edifícios, para aumentar as suas capacidades ao corte, em casos de ocorrências sísmicas. Um dos primeiros exemplos de reabilitação de uma ponte nos EUA com mantas de CFRP foi executada em 1994 e conduzida por Chajes et al. (1993). Actualmente, Nanni (ICCI'98, 1998) tem aplicado o sistema MBrace mantas no reforço de pontes, com sucesso.

Em Portugal, este assunto tem despertado algum interesse à indústria da construção, graças, por um lado, à publicação de um número cada vez maior de trabalhos de investigação nesta área e, por outro, à integração dos novos materiais nas áreas temáticas de discussão em congressos nacionais.

Em relação ao primeiro aspecto, evidencia-se a publicação pioneira de Brito (1986) no LNEC; os vários trabalhos experimentais de reforço de vigas e faixas de lajes de betão com compósitos unidireccionais de CFRP realizados na FEUP por Juvandes et al. (1997-b; 1998-a; 1998-b; 1998-c; 1998-d; 1998-e); a investigação no IST a nível do reforço de vigas com laminados (um caso) e com tecidos (outro caso) de CFRP realizados por Nsambu (1997) e por De Souza et al. (1998), respectivamente; o programa de análise numérica de previsão do comportamento de vigas reforçadas com CFRP desenvolvido na FEUP por Costeira Silva (1999); o trabalho de Ripper et al. (1998) sobre a utilização de folhas (mantas) flexíveis de CFRP; alguns projectos de investigação I&D em

consórcio entre a FEUP, o INEGI, a UNL e o LNEC (Praxis XXI-3/3.1/CEG/2572-95, 1995; CarboPonte, 1996).

No segundo caso, destaca-se a apresentação de vários artigos sobre materiais compósitos de CFRP (Juvandes, 1996; Juvandes et al., 1997-a; Nsambu et al., 1998; Ripper et al., 1998; Juvandes et al., 1998-f) incluídas nas 1ª e 2ª Jornadas de Estruturas de Betão, designadas por "Betões de Elevado Desempenho - Novos Compósitos" (1996) e por "Comportamento em Serviço de Estruturas de Betão" (1998), bem como nas Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas - JPEE 98 (1998).

Desta primeira abordagem à história do reforço com a *técnica da colagem* de armaduras de FRP, conclui-se que os sistemas com fibras de carbono (CFRP) são os mais adequados para a construção civil (Meier, 1997-b; Seible, 1998) e que os seus percursos passado, presente e futuro podem ser traduzidos pela curva da Figura 2.3 (com base numa informação do sistema ZOLTEK).

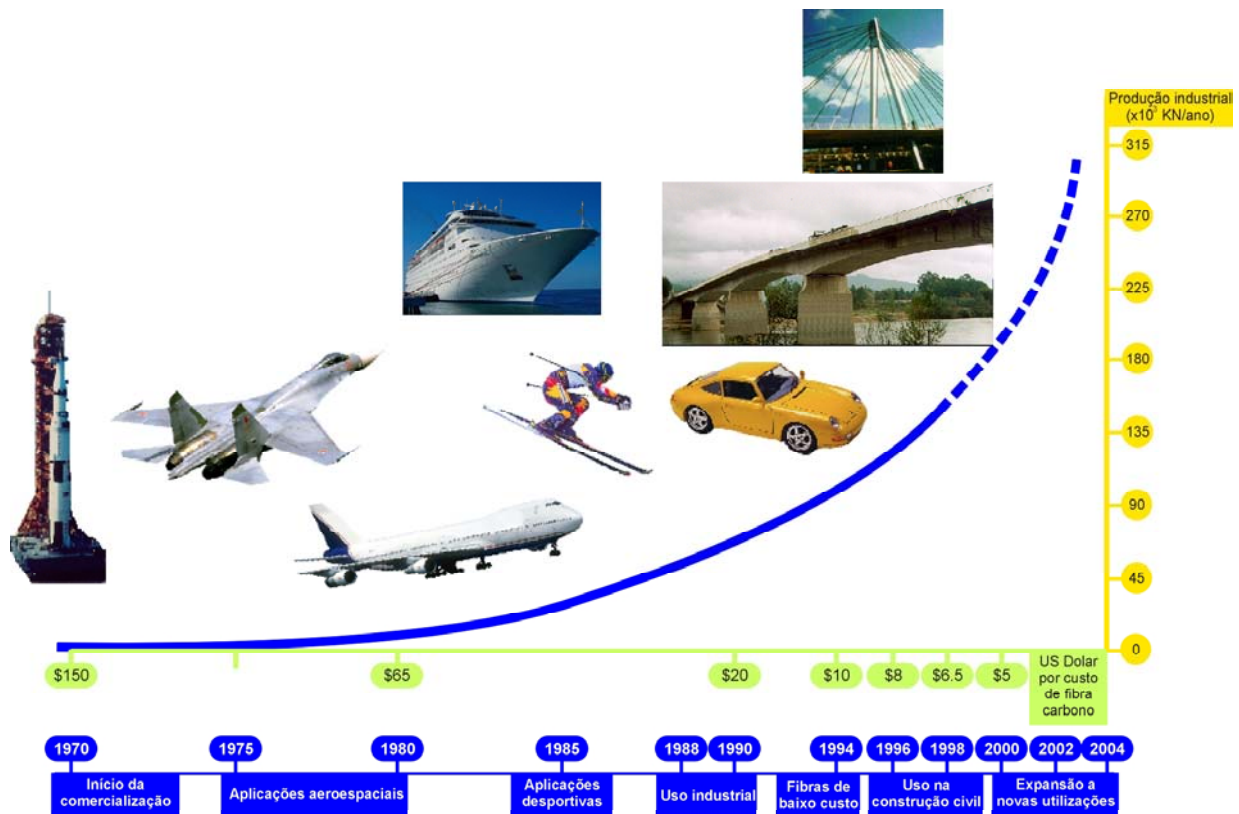


Figura 2.3 - Evolução no tempo da utilização da fibra de carbono em função do preço, da produção e do campo de aplicação.

Constata-se, também, que a perspectiva universal sobre a *técnica de colagem* com armaduras, quer *metálicas* ou de *FRP*, consiste num sistema que envolve um factor de risco potencial. A viabilidade de um reforço, nestas circunstâncias, fica obrigado a medidas adicionais de segurança, traduzidas na verificação das condições seguintes:

- i) O betão deve estar em boas condições, isto é, com adesão superficial superior a  $1.5 \text{ MPa}$  (CEB-GTG21, 1990), excluindo-se os casos de betão deteriorado, de corrosão das armaduras e de betão delaminado;
- ii) Um reforço à flexão deve ter capacidade para mobilizar uma camada de compressão efectiva e a resistência ao esforço transversal, através da armadura existente ou por adição de outra exteriormente;
- iii) Seleccionar um sistema de reforço suficientemente conhecido no mercado;
- iv) Intervenção de técnicos com experiência a nível do projecto, da execução/aplicação e do acompanhamento no tempo.

## 2.2 - SISTEMAS DE MATERIAIS COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS (FRP)

Resultando de um princípio de heterogeneidade, os materiais compósitos são constituídos essencialmente por duas fases. Uma apresenta grande resistência, elevado módulo de elasticidade e tem a forma de filamentos de pequeno diâmetro - AS FIBRAS. A outra é macia e tem características sinérgicas - A MATRIZ. Esta última, sendo relativamente dúctil, envolve completamente a primeira fase, permitindo boa transferência de tensões entre as fibras interlaminares e no plano (conceito de sinergia).

Da conjugação destas duas fases nasce a verdadeira força geradora da família dos “*Fiber Reinforced Plastic (Polymer)*” e as suas relevantes propriedades mecânicas, físicas e químicas quando comparados com os materiais homólogos tradicionais (Figura 2.4). Não obstante existirem outros sectores de investigação na linha geral dos compósitos, na engenharia civil, para se distinguir a técnica dos *betões de elevado desempenho com fibras curtas (FRC)* da técnica de uso dos “*Fiber Reinforced Polymer*”, a literatura internacional passou a designar os últimos pela sigla FRP, de acordo com as ISO 8930 (EUROCOMP, 1996). Esta família é empregue no reforço e/ou reabilitação de estruturas da construção civil como armaduras não metálicas, cuja denominação em língua portuguesa é de *Polímeros Reforçados com Fibras* (ou Compósitos Reforçados com Fibras). Uma vez

que não serão tratados quaisquer outros materiais ao longo deste trabalho, referir-se-ão sempre estes compósitos pela sigla FRP por comodidade de exposição. Curiosamente, o Japão como um dos maiores produtores destes materiais adoptou na sua literatura técnica a designação de “Continuous Fiber Reinforcing Materials” e a sigla CFRP (JSCE, 1997).

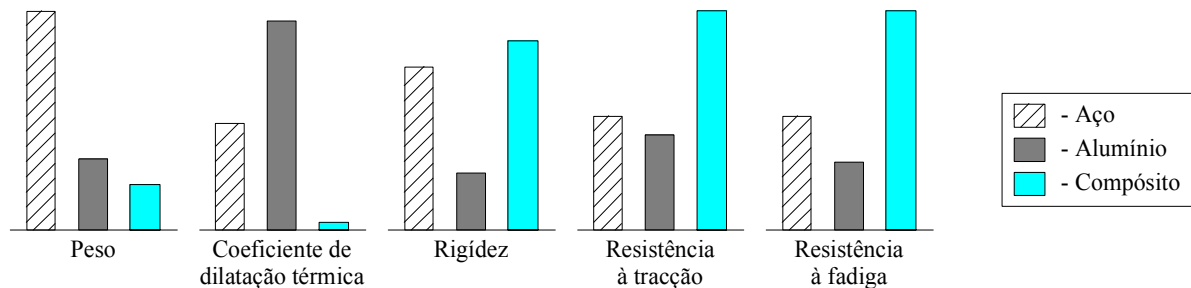


Figura 2.4 – Comparação de algumas propriedades entre o aço, o alumínio e o compósito (Taly, 1998)

Embora o comportamento global de um compósito esteja condicionado pelo critério de composição, pelo processo de fabrico e pelos objectivos estruturais na fase de utilização, apresenta propriedades interessantes para a engenharia como as elevadas resistência e rigidez, o baixo peso específico, a excelente resistência à agressividade ambiental, bem como a possibilidade em admitir propriedades direccionais a nível estrutural, eléctrico e magnético, variáveis de acordo com a conveniência (Hull, 1981; EUROCOM, 1996). À partida, estas propriedades podem ser seleccionadas conforme as considerações específicas definidas no projecto de confecção do FRP, através da escolha adequada dos constituintes dentro da gama variada de materiais disponíveis no mercado (fibras e matriz).

Nesta secção, propõe-se introduzir e discutir a composição, a forma e as principais propriedades (a *curto* e a *longo prazo*) dos compósitos de FRP. Sem pretender ser exaustiva, a exposição é limitada aos sistemas actualmente empregues nas técnicas de colagem (descritos nos itens 2.1.1 e 2.1.2) e à informação técnica estritamente necessária à sua aplicação pelos engenheiros civis. Nesta perspectiva, introduzir-se-ão, também, as terminologias empregues na área dos novos materiais e estabelecidos na literatura internacional.

Estes temas têm sido fundamentados com ensaios em materiais e em estruturas, documentados em publicações de editores como Nanni (1993) e Taerwe (FRPRCS-2, 1995) Clark (EUROCOMP, 1996) e Benmokrane e Rahman (CDCC'98, 1998) ou por instituições como o ACI (ACI 440R-96, 1996) e o JCI (FRPRCS-3, 1997; JCI TC952, 1998), também resumidos em 1996 pela FEUP num trabalho de Juvandes et al. (1996-a).



### 2.2.1 - Materiais

O reforço de estruturas de betão já existentes, com compósitos de FRP, utiliza a *técnica de colagem* destes ao betão por meio de um adesivo. No final, o desempenho geral do reforço vai ser condicionado pelo comportamento a curto e longo prazo dos dois materiais (FRP e adesivo).

Em virtude de existirem vários condicionantes procede-se, em seguida, a um levantamento dos conceitos fundamentais na área da composição destes materiais e proporciona-se a familiarização com a gama de constituintes e produtos derivados disponíveis no mercado, nomeadamente, a nível da *fibra*, do *compósito de FRP* e do *adesivo de colagem*.

#### Fibras

Citando Malek (1997), a “American Society for Testing Materials (ASTM) - Committee D30” define fibras como materiais alongados com dimensão na razão de  $10/1$ , no mínimo, com uma secção transversal de  $5 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$  e uma espessura máxima de  $0.25 \text{ mm}$ .

Nos FRP, as fibras representam as componentes de resistência e rigidez do compósito, justificando a existência de um critério de selecção, função de parâmetros como o tipo de fibra disponível (composição química), o seu grau de concentração, o seu comprimento (curtas ou longas) e a forma como se dispõem no seio da matriz. Desta última, conclui-se que a resistência à tracção e o respectivo módulo de elasticidade são máximos para a direcção principal das fibras e reduzem progressivamente de valor, quando o ângulo em análise se afasta daquela direcção. As fibras exibem um comportamento perfeitamente elástico, sem presença de tensão de cedência e deformação plástica, ao contrário dos metais.

De um modo geral, as fibras em filamento de configuração contínua, designadas “Continuous Fibers” (ACI 440R-96, 1996; JCI TC952, 1998), são as mais apropriadas para o reforço de estruturas de betão, devido à possibilidade de orientação numa direcção específica com vista à optimização do seu desempenho estrutural.

As principais *fibras contínuas* (em algumas publicações também designadas por “fibras longas”) comercializadas em aplicações de engenharia civil, principalmente no reforço com sistemas de FRP, são o *vidro* (G), o *carbono* (C) e a poliamida aromática (*aramida* (A) ou *Kevlar*<sup>®</sup>(K)).

A título particular, refira-se o exemplo do Japão como um dos mercados principais de produção de fibras contínuas e a sua classificação quanto aos tipos e características das fibras mais correntes nas situações de reforço estrutural, traduzidas na Figura 2.5 e na Tabela 2.3 (JCI TC952, 1998). Como destaque fundamental, sublinha-se a elevada resistência à tracção e o maior valor do módulo de elasticidade das fibras de carbono em relação às restantes em confronto (Figura 2.6).

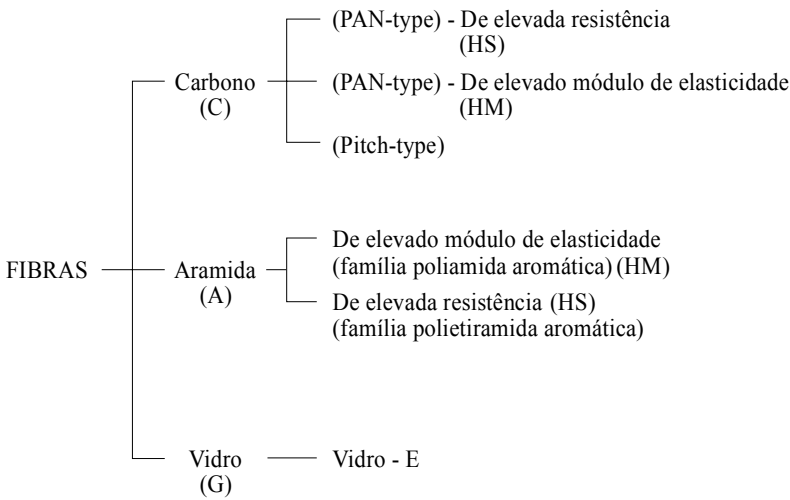


Figura 2.5 - Classificação das fibras segundo o JCI (JCI TC952, 1998).

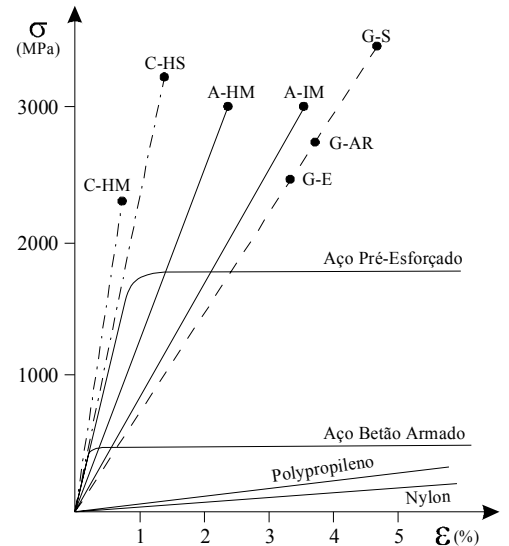


Figura 2.6 – Comportamento à tracção de fibras e metais (ACI 440R-96, 1996).

Tabela 2.3 – Características principais das fibras segundo o JCI (JCI TC952, 1998).

Tipo de fibras		Res. tracção (MPa)	Mod. Elast. (GPa)	Alongamento último (%)	Peso específico
<b>Carbono (C)</b>	elevada resistência	3430 - 4900	230 - 240	1.5 - 2.1	1.8
	elevado mód. elast.	2940 - 4600	392 - 640	0.45 - 1.2	1.8 - 2.1
<b>Aramida (A)</b>	elevado mód. elast.	2900	111	2.4	1.45
	elevada resistência	3500	74	4.6	1.39
<b>Vidro (G)</b>	vidro-E	3500	74	4.7	2.6

### **Compósitos de FRP**

A família dos compósitos de FRP resulta, sobretudo, da conjugação de *fibras contínuas* de reforço orgânicas ou inorgânicas, com a *resina* termoendurecível (matriz) e com as *cargas* de enchimento designadas por “fillers”. Para constituintes secundários, estes materiais recorrem a *aditivos* e a outros produtos, como por exemplo, os agentes catalizadores, os promotores ou os aceleradores, referidos em “Introduction to Composites” (1992) e “Structural Design of Polymer Composites” (EUROCOMP, 1996). A partir das principais fibras comercializadas como o *vidro (G)*, o *carbono (C)* e a *aramida (A)*, constroem-se os respectivos compósitos reforçados denominados internacionalmente por *GFRP* (Glass Fiber Reinforced Polymer), *CFRP* (Carbon Fiber Reinforced Polymer) e *AFRP* (Aramid Fiber Reinforced Polymer). O comportamento final de um FRP é acentuadamente dependente dos materiais que o constituem, do teor e da disposição das fibras principais de reforço, da interacção entre os referidos materiais e do processo de fabrico do componente final. Os factores intervenientes nesse comportamento são a orientação, o comprimento, a forma e a composição das fibras, as propriedades mecânicas da resina da matriz, assim como a adesão ou ligação entre as fibras e a matriz (Juvandes et al., 1996-a).

Sem retirar importância à fibra já referida, a *matriz* polimérica (resina termoendurecível) tem como funções transmitir os esforços entre as fibras e a estrutura envolvente e, ainda, proteger as fibras da agressividade ambiental e dos danos mecânicos. Do mesmo modo, as propriedades da matriz influenciam a resistência ao corte, interlaminar e no plano, do FRP. Representa, também, o suporte físico contra a instabilidade das fibras sob acções de compressão. Por estes motivos, a selecção da matriz deve ser criteriosa, justificando-se, geralmente, a opção pelas resinas termoendurecíveis do *tipo epóxido*, no caso dos sistemas de FRP mais utilizados na técnica de reforço por colagem (ACI 440R-96, 1996).

Neste contexto, os compósitos de FRP são considerados materiais não homogêneos e anisotrópicos. Em rigor, as suas propriedades devem ser determinadas por via experimental, através de ensaios com provetes representativos do produto final de FRP. Contudo, a diversidade de formas disponíveis no mercado dificulta este procedimento. Não existindo informação experimental ou especificações do fornecedor destes sistemas, algumas propriedades elásticas podem ser calculadas, aproximadamente, pelo método “Halpin-Tsai Method” (EUROCOMP, 1996), a partir do conhecimento dos valores característicos das propriedades direccionais e da percentagem de combinação (em peso ou volume) dos constituintes na mistura (fibra e matriz). Por exemplo, no caso específico dos sistemas contínuos unidireccionais de FRP, as propriedades na direcção principal das fibras podem obter-se, com boa aproximação, pela aplicação da “regra das misturas”. Entretanto,

estas propriedades podem variar com a composição, o processo de fabrico e as condições futuras de trabalho (temperatura, agressividade do ambiente e o tempo). Sendo assim, a informação necessária para o projecto de aplicação dos sistemas de FRP, envolve a consideração destes factores no conhecimento “a priori” de dois níveis:

- i) A caracterização estática a curto prazo do estado final do compósito a aplicar (geralmente obtido no fornecedor);
- ii) A definição de factores de redução para atender à exposição ambiental a longo prazo (temperatura, humidade, agressão química, fluência, fadiga, etc).

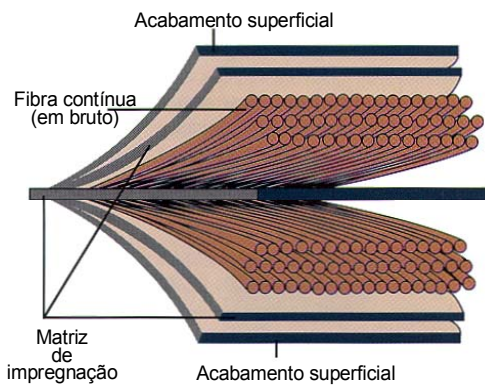
As principais formas comercializadas para os FRP, admitindo como parâmetros de base a configuração geométrica espacial e a disposição das fibras no produto final, podem ser classificadas em três grandes grupos: *unidireccionais* (1D); *bidireccionais* (2D); *multidireccionais* (3D). No caso específico deste trabalho, interessará distinguir duas formas principais de FRP incluídas nesses três grupos: os *sistemas pré-fabricados* e os *sistemas curados “in situ”*.

(i) - *Sistemas pré-fabricados*

A forma mais comum usada nas aplicações de reforço estrutural e desenvolvida na Europa (Suíça e Alemanha) tem a designação geral de “*Laminate*”, apesar de, em algumas publicações, referirem-se a “*Plate*” ou “*Strip*”.

Consiste na substituição das tradicionais chapas metálicas rígidas, por *sistemas laminados* semi-rígidos de FRP do tipo unidireccional. Estes resultam da impregnação de um conjunto de feixes ou camadas contínuas de fibras por uma resina termoendurecível (Figura 2.7-a), consolidadas por um processo de pultrusão com controlo da espessura e da largura do compósito. A orientação unidireccional das fibras confere ao *laminado* a maximização da resistência e da rigidez na direcção longitudinal. Em contraste, os casos de arranjos bidireccionais e multidireccionais das fibras no plano repartem as propriedades mecânicas pelas várias direcções. Como tal, estes casos ainda não são seguramente aplicados e controlados pela construção civil. Tratando-se de produtos finalizados de FRP, com as características mecânicas e físicas garantidas pelos seus produtores, neste trabalho, designar-se-á por *laminado* à classe dos *sistemas de FRP pré-fabricados* nestas condições.

O aspecto geral de um exemplo deste sistema é o *laminado* seleccionado para o estudo experimental deste trabalho e que se ilustra na Figura 2.7-b.



a) Constituintes do *laminado* (Ray Publishing, 1998).



b) Componentes de um sistema *laminado* de CFRP. (Sistema Sika - CarboDur)

Figura 2.7 – Aspecto geral de um *sistema de FRP pré-fabricado* (unidireccional).

(ii) - *Sistemas curados “in situ”*

Actualmente, outro processo credível nas aplicações de colagem a elementos de betão consiste na aplicação de feixes de fibras contínuas, com a forma de *firos*, *mantas* ou *tecidos* em estado seco ou pré-impregnado, sobre um adesivo epóxico previamente espalhado na superfície a reforçar. O adesivo tem as funções de impregnar o grupo de fibras, proporcionar a polimerização do conjunto num composto de FRP e, por fim, desenvolver propriedades de aderência na ligação do FRP ao material existente (JCI TC952, 1998). Segundo o conceito de FRP, este sistema só o será fisicamente após a execução do reforço, isto é, polimerizado ou endurecido “in situ” e deverá ter um comportamento semelhante ao dos *laminados pré-fabricados*, desde que a superfície a reforçar esteja convenientemente regularizada (Meier, 1997-a).

Este sistema tem sido promovido pelo Japão e é identificado tecnicamente por “Fiber Reinforced Plastic Sheet (FRP sheet)” (JCI TC 952, 1998; JSCE, 1997). A América do Norte (EUA e Canadá) e a Europa (em menor escala) têm investido, também, neste sistema, mas sem a preocupação da uniformização dos termos por parte dos autores. Assim, é comum surgir alguma dispersão de designações como os de “FRP laminate”, de “FRP plate” e de “FRP sheet” (FRPRCS-2, 1995; ACMBS-II, 1996; ICCT'98, 1998).

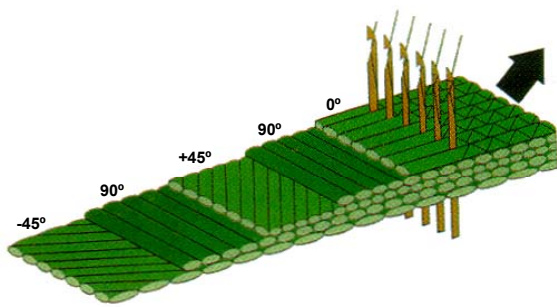
Futuramente, estes produtos classificar-se-ão como *sistemas de FRP curados “in situ”* e a sua correcta caracterização deve reportar-se a ensaios de provetes executados, igualmente, nas condições de aplicação “in situ”. Quanto ao critério de agrupamento das fibras no plano, distinguir-se-ão os dois casos mais citados na literatura internacional, a *manta* e os *tecidos*, resumidos na Tabela 2.4 (consultar também a Tabela 2.2), a partir das designações citadas no “EUROCOMP Design Code and Handbook” (EUROCOMP, 1996), no JCI (JCI TC952, 1998) e na futura publicação do “ACI Committee 440F” (ACI 440F, 1999-versão provisória). O aspecto geral dos componentes de um destes sistemas está ilustrado nas Figuras 2.8-a e 2.8-b, sendo esta última representativa do compósito usado no estudo experimental deste trabalho.

Tabela 2.4 - Descrição das *mantas* e *tecidos* empregues nos sistemas FRP curados “in situ”.

DESIGNAÇÃO		DESCRIÇÃO	ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS	ESTADO
MANTAS “sheets”		Disposição de faixas contínuas e paralelas de fibras sobre uma rede de protecção.  (200 – 300 g/m <sup>2</sup> )	unidireccionais	secas
				pré-impregnadas [i]
TECIDOS	“Woven roving” [ii]	Entrelaçamento direccionado de dois fios ou faixa de fibras.  (600 – 800 g/m <sup>2</sup> )	bidireccionais: 0/90° 0/+45° 0/-45°	secos
	“Mat” [ii]	Espalhamento aleatório das fibras num tapete rolante que, depois, é pulverizado com resina para adquirir consistência.	multidireccional	
	“Cloth” [ii]	Fios contínuos tecidos por um processo têxtil convencional.  (150 – 400 g/m <sup>2</sup> )	unidireccional ou bidireccional ou multidireccional	pré-impregnados [i]

[i] – aplicação de uma camada suave de resina sem a cura total, de modo a criar alguma coesão entre as fibras (estado “prepreg”);

[ii] – designação internacional para o arranjo das fibras no plano.

a) Sistema de *tecido* (Ray Publishing, 1998).b) Componentes de um sistema de *mantas flexíveis* de CFRP.Figura 2.8 – Aspecto geral de um *sistema de FRP curado “in situ”*.

Das várias fibras disponíveis no mercado, os sistemas reforçados com fibras de carbono CFRP apresentam as características que melhor se ajustam aos compromissos exigidos pelo reforço de estruturas de betão com a técnica de colagem. Esta conclusão é partilhada por vários autores com artigos publicados em conferências internacionais, quer no domínio da investigação quer na área da construção, sobre o comportamento de sistemas de CFRP com as formas aqui descritas. No confronto com as restantes fibras destacam-se factores decisivos como as maiores resistências à tracção e à compressão, o valor do módulo de elasticidade longitudinal mais próximo do do aço (Figura 2.9), o bom comportamento à fadiga e a boa resistência alcalina (Meier, 1997-b).

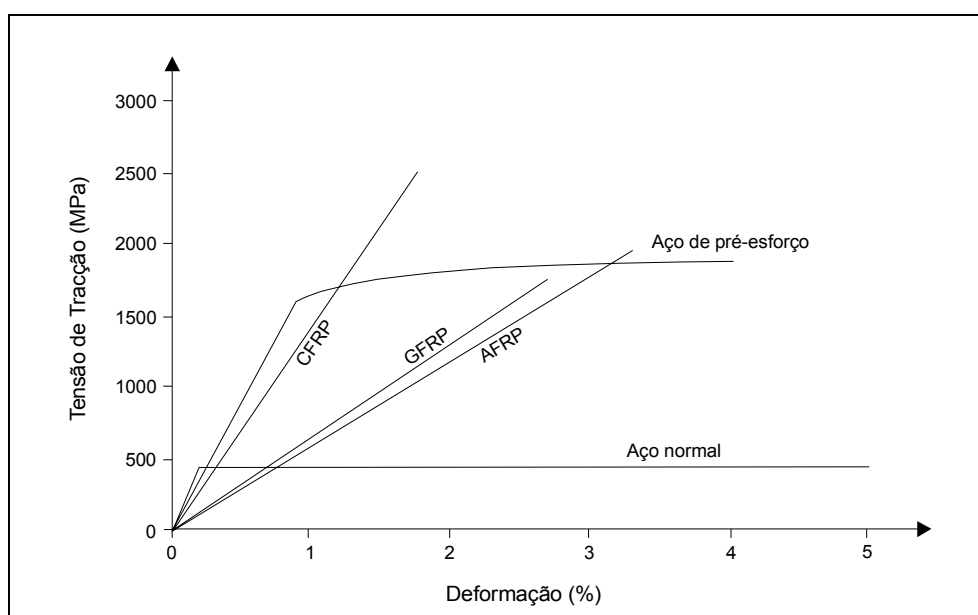


Figura 2.9 – Comportamento à tracção de vários sistemas de FRP e aço (Abdelrahman et al., 1997).

## Adesivos

A selecção de um sistema de FRP inclui, para além do compósito de FRP, o estabelecimento do agente responsável pela sua colagem aos elementos a reforçar, designado por *adesivo* ou cola.

Os sistemas avaliados utilizam *adesivos* que têm sido formulados, especificamente, para otimizar o seu comportamento estrutural, na vasta gama de condições ambientais a que possam estar sujeitos. Os *adesivos* principais nestes sistemas são da classe geral dos *epóxidos*, dos *vinilester* e dos *poliester insaturados*, cujas características podem ser consultadas em publicações como ACI (ACI 440R-96, 1996), o EUROCOMP (1996) e o JCI (JCI TC952, 1998).

No caso dos laminados pré-fabricados, o agente *adesivo* é um material distinto do compósito de FRP sendo, nas aplicações realizadas na Europa, do tipo epóxido. Nestes, são usados sistemas de resinas de dois componentes, a resina de epóxido e um endurecedor e, regra geral, a primeira é livre de solventes e tem enchimento mineral (por exemplo quartzo) (D0144, 1997; Juvandes et al., 1998-a e 1998-e). Um desses exemplos está ilustrado na Figura 2.7-b.

Nos sistemas de FRP curados “in situ”, o agente *adesivo* é a própria resina de impregnação das fibras e de polimerização em compósito de FRP. Neste caso, a literatura internacional atribui o termo “Saturating Resin” para distingui-lo da designação corrente de adesivo (situação anterior dos laminados). Este apresenta o papel de matriz do FRP e promove a transferência de esforços entre as fibras e destas para a superfície colada. O sistema, normalmente, recorre a resinas de saturação do tipo epóxido composto por dois componentes devidamente doseados (a resina e o endurecedor) (JCI TC952, 1998), como se ilustra na Figura 2.8-b (Juvandes et al., 1998-b).

Em qualquer dos dois casos, a polimerização do epóxido é traduzida pela reacção química entre o oxigénio da resina e o hidrogénio das aminas contidas no endurecedor. Para se obter um bom produto epóxido, a mistura dos componentes, resina de epóxido e endurecedor, deve ser adequada de modo a que qualquer molécula do segundo estabeleça ligação com as moléculas da primeira. A densidade destas ligações e, conseqüentemente, o grau de endurecimento do adesivo são funções da estrutura química da resina ainda líquida, do agente de endurecimento e das condições de reacção, como o tempo, a temperatura e a humidade.

As reacções são lentas a baixas temperaturas, obrigando a tratamentos apropriados abaixo dos 5°C e melhoradas em ambientes quentes (Täljsten, 1994; Malek, 1997). O aumento do número de ligações no adesivo traduz-se num incremento do módulo de elasticidade, da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), da estabilidade térmica e da resistência química. Refira-se, ainda, que após uma cura



à temperatura ambiente, as propriedades do adesivo podem ser implementadas com uma pós-cura a quente (Juvandes et al., 1998-a e 1998-e).

Para as aplicações de reforço em engenharia civil, é muito difícil ajustar um só tipo de adesivo que satisfaça todos os casos desejados. Por isso, no mercado existe uma grande variedade de formulações de epóxico, com possibilidade de modificação para melhorar a resposta do adesivo às especificações de aplicação, bem como, a possibilidade da junção de uma quantidade de adições, tais como, cargas, solventes, flexibilizantes e pigmentos. O sucesso do adesivo irá depender da correcta preparação e aplicação da mistura, baseada nas especificações do fornecedor.

As principais características de um *adesivo de epóxico* não endurecido consistem na viscosidade, no tempo de utilização, no tempo de cura, na toxicidade e no endurecimento em contacto com a humidade ou água (Ribeiro, 1996). Neste contexto, são importantes as noções dos *tempos de utilização e de contacto* descritas na publicação de Ribeiro (1996), tais como:

- i) *Tempo de utilização* (pot life): intervalo de tempo, após a mistura da resina base e restantes componentes, durante o qual o material líquido é utilizável sem dificuldade. Esgotado o tempo de utilização, qualquer formulação de resina perde drasticamente as suas características de aderência, pelo que não deve ser utilizada. Os valores podem variar entre uns minutos e várias horas. O tempo de utilização diminui com o aumento da temperatura e da quantidade de material a preparar, uma vez que há libertação de calor durante a cura. A presença de cargas (inertes) aumenta o tempo de utilização, pois estas absorvem parte do calor libertado na reacção, diminuindo a temperatura atingida pela resina;
- ii) *Tempo de contacto* (open time): termo aplicado às formulações para colagem. É o intervalo de tempo que decorre entre o momento em que a formulação é aplicada na superfície a colar e o instante em que esta principia a endurecer e deixa de ser possível efectuar a colagem. A junção das peças deve ser realizada neste intervalo de tempo para que a colagem apresente as características desejadas. O tempo de contacto é influenciado pela temperatura ambiente e pela temperatura do suporte. A natureza da superfície a colar condiciona também as características da colagem.

O tipo de agressividade a que o adesivo se submeterá posteriormente condiciona as principais características da formulação endurecida, designadamente, a resistência mecânica (tracção, compressão e flexão), a aderência às superfícies, a retracção durante a cura, o módulo de elasticidade, a extensão na rotura, o coeficiente de dilatação térmica, a resistência química, a resistência à

temperatura e o comportamento a longo prazo. Informações mais detalhadas podem ser consultadas no trabalho de Ribeiro (1996).

A título informativo, na Tabela 2.5 expõe-se os valores correntes das principais propriedades mecânicas dos *adesivos de epóxido*, comparáveis com os correspondentes valores no betão e no aço.

Tabela 2.5 - Propriedades mecânicas do *adesivo*, do *betão* e do *aço* segundo Täljsten (1994).

<b>Propriedades</b>	<b>Adesivo [i]</b>	<b>Betão</b>	<b>Aço</b>
Resistência à compressão (MPa)	55 - 110	25 - 150	200 - 2000
Resistência à tracção (MPa)	9 - 20	1 - 4	200 - 2000
Módulo de elasticidade (GPa)	0.5 - 20	20 - 50	200
Coef. de dilatação térmica ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	25 - 30	8 - 16	10 - 15
Densidade ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1450 - 1550	2300	7800
Coefficiente de poisson	0.3	0.2	0.3

[i] – Adesivo do tipo epóxido.

Apesar de não serem formulações do tipo adesivo, devem destacar-se os produtos com capacidade para completar e melhorar o desempenho daquele e que se designam por *primários* e por *regularizadores de superfície*. O *primário* apresenta a característica de penetrar na superfície do betão por capilaridade, de modo a melhorar a propriedade adesiva da superfície, para a recepção da resina de saturação ou do adesivo. Por seu lado, o *produto de regularização* elimina pequenas irregularidades na superfície com vista a evitar a formação de bolhas de ar e garantir uma superfície lisa para a colagem do FRP. Estes dois produtos são indispensáveis, principalmente, para as aplicações de sistemas de FRP endurecidos “in situ” (fios, mantas e tecidos).

### 2.2.2 - Comportamento a longo prazo

Como já foi referido no item 2.2.1, as propriedades de um sistema de FRP variam de um produto para outro em função de aspectos como o tipo de fibra e de resina seleccionados, a percentagem em peso na combinação do sistema e a orientação geral estabelecida para as fibras. Uma vez caracterizado o sistema a *curto prazo*, torna-se fundamental conhecer qual a evolução destas propriedades, ao longo do período de vida útil esperado para uma dada aplicação (*longo prazo*).

Em termos de contribuição a *longo prazo*, neste trabalho realçar-se-ão os aspectos considerados mais relevantes e que possam pôr em causa a variação das propriedades físicas, mecânicas e químicas dos sistemas de FRP, no reforço de estruturas de betão. Nesta área, como não há registos de aplicações com mais de 15 anos, as informações aqui descritas reportam-se às conclusões retiradas de estudos publicados sobre o acompanhamento de exemplos de reforço efectuados até hoje, a várias simulações de ensaios acelerados em laboratório e à história conhecida noutras aplicações industriais como a aeronáutica e automobilística.

A identificação das situações mais críticas que interessam às estruturas de betão podem ser distribuídas por três níveis de intervenção: a *durabilidade*, a *história de carga* e a hipótese do *comportamento ao fogo* perante uma acção de acidente no período de vida da estrutura.

#### Durabilidade

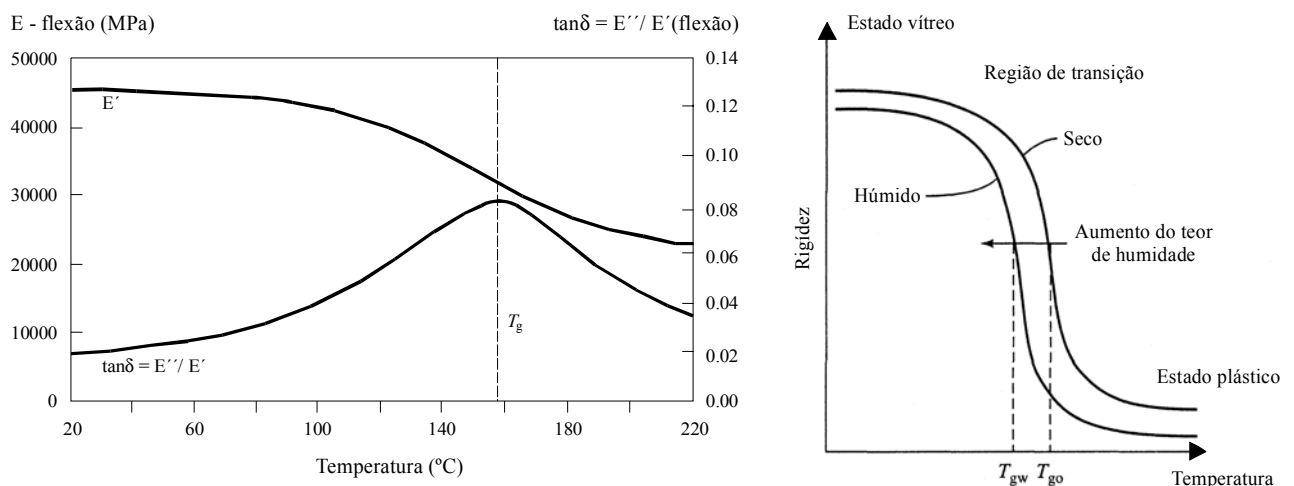
Os agentes de intervenção são de origem ambiental, em consequência da natural exposição do sistema de FRP à envolvente esperada para a estrutura de betão.

##### (i) - Temperatura

As resinas de formulação epoxídica (resinas de saturação ou adesivos) são as menos deformáveis quando sujeitas a variações de temperatura ( $\alpha_M \cong 40$  a  $60 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ ) e diferentes da deformação do betão ( $\alpha_c \cong 10 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ ) (Ribeiro, 1996). A adição de cargas permite baixar o coeficiente de dilatação térmica para valores mais próximos dos do betão. Os compósitos de FRP apresentam, também, coeficientes de dilatação térmico ( $\alpha_L$ ) distintos do betão e diferentes segundo a direcção das fibras de reforço e transversalmente a estas. Por exemplo, os compósitos CFRP e AFRP (carbono e aramida) têm valores próximos de zero, em comparação com  $\alpha_L \cong 5 \times 10^{-6}/^{\circ}C$  do GFRP (vidro) na direcção das fibras. Na direcção transversal, o coeficiente de dilatação térmica pode ser da ordem de  $\alpha_L \cong 30 \times 10^{-6}/^{\circ}C$  (Rostásy, 1998; EUROCOMP, 1996; ACI 440F, 1999). A experiência dos autores Green et al. (1998) indica que a diferença de coeficientes entre os materiais não parece afectar significativamente a ligação dos materiais, aquando de pequenas oscilações da

temperatura ( $\pm 50^{\circ}\text{F}$  ou  $\pm 27.8^{\circ}\text{C}$ ). Por seu turno, a constrição da expansão térmica pode proporcionar alguns problemas de instabilidade nas fibras do FRP, devido ao surgimento de tensões internas de compressão.

O efeito da acção de *temperaturas elevadas* nos polímeros (resinas e adesivos) e nos compósitos de FRP é fundamental, principalmente, em relação aos primeiros. Nestes, existe uma temperatura limite designada por *temperatura de transição vítrea* ( $T_g$ ) que proporciona a passagem dum estado vítreo e frágil para um sólido elástico e dúctil (Marques, 1982). A aproximação da temperatura para o nível do valor  $T_g$ , do adesivo ou do FRP, torna a componente polimérica muito macia e as principais propriedades mecânicas, como a resistência e a rigidez, diminuem acentuadamente. Este facto está representado na Figura 2.10-a, através das curvas típicas de variação do módulo de elasticidade  $E'$  (módulo de ganho) e do desenvolvimento do coeficiente de perda  $\tan \delta = E''/E'$  (razão entre o módulo de perda e o de ganho) com a temperatura. O traçado destas curvas e a determinação do valor do  $T_g$  obtêm-se recorrendo a ensaios de “Differential Scanning Calometry” (DSC) ou de “Dynamic Mechanic Thermal Analyses” (DMTA - normas ISO 6721-5, 1995), de acordo com o EUROCOMP (1996). Este código de projecto recomenda a fixação de um valor inferior ao  $T_g$ , reduzido de  $10^{\circ}\text{C}$  a  $20^{\circ}\text{C}$ , para o limite superior da amplitude térmica esperada numa aplicação normal na construção. Esta temperatura limite depende do tipo de resina e o seu valor efectivo tende a aumentar, no caso dos compósitos de FRP, devido à presença das fibras.



a) Efeito da temperatura no comportamento dinâmico da resina S560Z (EUROCOMP, 1996).

b) Variação da rigidez e do  $T_g$  com os efeitos higrotérmicos (Taly, 1998).

Figura 2.10 - Efeito da temperatura e do teor de humidade no comportamento corrente de um polímero.

Por outro lado, as *baixas temperaturas* tornam os polímeros (matriz) menos flexíveis e com tendência a danos por fadiga mas, geralmente, mantêm inalteráveis a resistência e a rigidez do compósito. Neste contexto, são importantes as conclusões referidas por Rostásy (1998) em relação aos ensaios realizados por Terrasi no “Swiss Federal Institute of Technology” (ETH), sobre o efeito do abaixamento de temperatura para  $-60^{\circ}\text{C}$  e para  $-133^{\circ}\text{C}$  em ligações coladas de laminados de CFRP a superfícies de betão e de alumínio, respectivamente. Apesar de em ambos os casos não se constatarem danos assinaláveis na ligação e na instabilidade à compressão das fibras de carbono, Rostásy sublinha que as diferenças de expansão térmica dos materiais a ligar não depreciam a capacidade de uma estrutura reforçada. Como medida de segurança nestas situações, o autor avança com a proposta de se admitir uma redução de 10% do valor da resistência efectiva de uma ligação colada com laminados de CFRP.

(ii) - *Humidade*

Todas as formulações poliméricas são susceptíveis de absorver humidade. Em geral, isto resulta numa redução do valor da temperatura de transição vítrea e das suas propriedades mecânicas. Por exemplo, um  $T_g$  pode diminuir 25% o seu valor base ( $T_{go}$  - seco) devido ao efeito de uma concentração de humidade de 4% ( $T_{gw}$  - húmido) e a resistência à flexão ser reduzida para 50% da correspondente em estado seco, devido ao efeito da concentração de humidade de 1.5% (EUROCOMP, 1996). Segundo Taly (1998), os efeitos higrotérmicos no  $T_g$  e na rigidez de uma matriz polimérica podem ser representados no esquema da Figura 2.10-b. Na perspectiva do autor, as consequências destes e de outros agentes do ambiente sobre os compósitos estão retratados numa publicação de 1982 de Staunton e, sobretudo, os casos com matrizes epóxicas analisados experimentalmente por autores como Browning et al. (em 1977) e Gibson et al. (em 1982).

Contudo, uma resina pode ser escolhida de modo a apresentar a melhor resistência aos efeitos da humidade num compósito. Em concreto, Rostásy (1998) refere que as resinas epoxídicas podem absorver teores de água de cerca de 0.3% (em peso), após quatro dias de aplicação a  $23^{\circ}\text{C}$  e 0.5% (em peso) ao fim de dez dias. Depois, verificou-se que o sistema de absorção era reversível, os efeitos de encurtamento e alongamento muito pequenos e a influência destes parâmetros nas propriedades mecânicas da resina desprezáveis, para os níveis de tensão empregues no funcionamento em serviço.

A aplicação de compósitos de FRP em regiões sujeitas a Estios e Invernos rigorosos, ou seja, com grandes amplitudes higrotérmicas, o efeito do ciclo gelo-degelo pode intervir, igualmente, no comportamento futuro destes produtos e, particularmente, nos casos da sua aplicação em confinamento de elementos de betão. A experiência do comportamento de laminados de CFRP nestas circunstâncias é citada nos trabalhos de Meier (1997-a) e de Rostasy (1998), a propósito dos ensaios

efectuados no EMPA por Kaiser (1989) sobre duas séries de vigas de betão armado reforçadas (12 modelos), sendo uma delas pré-fendilhada em primeiro lugar. Foram submetidas a 100 ciclos de gelo-degelo com temperaturas a variar entre  $-25^{\circ}\text{C}$  a  $20^{\circ}\text{C}$  e com duração de 8 horas/ciclo (5 para gelo e 3 de degelo). Durante as fases de congelação, as vigas foram saturadas com água de modo a possibilitar-se o estudo do comportamento do compósito a temperaturas baixas e do impacto eventual de alguma incompatibilidade térmica entre o CFRP e o betão. O resultado dos ensaios de flexão, após os ciclos dessas séries, foram comparados com outra série idêntica mas sem ter sido sujeita aos ciclos mencionados (estudos de 1995 de Terrasi e Kaiser). Como conclusão, as duas séries de Kaiser não manifestaram perda significativa de capacidade no estado limite último, em relação às anteriores, apesar do estado de pré-fendilhação introduzido pelos ciclos de gelo-degelo no betão armado.

### (iii) - Ambiente de trabalho

O termo genérico “ambiente de trabalho” pretende cobrir os efeitos da *temperatura* e da *humidade* referidos, além dos efeitos da *radiação ultra-violeta* (UV), das *agressões químicas* de ambientes alcalinos e ácidos, das *reações alcalis-silica* dos constituintes do betão, da *condutividade eléctrica* e das acções do *vento* e de *poeiras* ambientais, sobre as propriedades dos compósitos. Neste ponto, procura esclarecer-se a acção isolada e, também, a participação simultânea dos vários efeitos na estrutura.

Estes agentes traduzem-se em mecanismos de agressividade aos constituintes químicos e de erosão, com degradação, no tempo, das resinas (matriz ou adesivo). Posteriormente, o efeito da acção do ambiente refletir-se-á nas fibras do compósito, provocando consequências adversas na estrutura.

A presença de *raios ultra-violetas* (UV), provenientes da luz solar, origina reacções químicas na matriz de um compósito e a consequente degradação das suas propriedades. Este facto deve ser analisado, nomeadamente, em aplicações de reforço estrutural exterior, devido à forte probabilidade de exposição solar. Contudo, um técnico pode exigir a introdução de aditivos apropriados na matriz, para proteger o compósito desse efeito. Só assim se entende o crescente aumento da aplicação de materiais compósitos no revestimento de aeronaves, em substituição do aço, visto que o risco de dano por exposição solar é muito significativo.

Baseado na experiência mundial e na investigação efectuada no EMPA, Meier (1997-b) afirma que os compósitos de CFRP, por serem relativamente bons condutores, podem apresentar dois efeitos na sequência de uma elevada exposição solar. Primeiro, o corpo principal do compósito pode aquecer ao ponto de permitir a vaporização de componentes da resina de epóxico. Após o arrefecimento, o segundo efeito traduz-se na deterioração da integridade estrutural, ou seja, retém uma considerável resistência à tracção (as fibras) mas perde as resistências à compressão e ao corte interlaminar. O autor conclui que, nestas situações, são necessários mecanismos exteriores de protecção contra a exposição directa dos laminados. Por norma, na construção civil as situações de reforço com CFRP não são tão gravosas, porque geralmente não há exposição solar directa sobre o compósito. Em edifícios, o reforço é executado no interior destes e no caso de pontes, os compósitos são colados na face inferior das vigas.

Em termos de *agressão química* por ambientes alcalinos, ácidos ou solventes orgânicos, a matriz e o adesivo devem ser os principais agentes de oposição à instalação da corrosão num sistema de FRP. Como tal, devem possuir a sua formulação correctamente ajustada às condições de serviço ambientais, previstas para uma dada aplicação. Porém, nos sistemas laminares, deve atender-se à hipótese de ocorrência de situações designadas por “tensão de corrosão”, isto é, a ruína catastrófica dum compósito a baixas tensões devido ao acesso directo da agressividade ambiental às fibras, por difusão ou por formação de mecanismos de fendilhação (delaminação) na matriz (EUROCOMP, 1996). Daqui se conclui ser necessário escolher, igualmente, fibras com confirmada resistência química, como os valores elevados das fibras de carbono e satisfatórios das fibras de vidro-C (ACI 440R-96, 1996; EUROCOMP, 1996; ACI 440F, 1999). Em síntese, a durabilidade no tempo dos sistemas de FRP dependem, não só do comportamento individual dos componentes, como também da interacção entre eles no compósito.

A importância dos factos mencionados tem vindo a alertar as várias comunidades de investigação, para se estabelecerem requisitos de durabilidade a nível de projecto com sistemas de FRP. Com base em ensaios acelerados de envelhecimento dos materiais, recentemente constata-se a ascensão do número de publicações com informações sobre algumas respostas quanto à previsão do comportamento a longo prazo dos compósitos, face aos casos específicos de agressividade do meio. Neste âmbito, inserem-se as contribuições de autores como Sheard et al. (1997) e Saadatmanesh et al. (1997-a) a nível da durabilidade de varões de GFRP e FRP; Gangarao et al. (1997) sobre a resposta de compósitos de GFRP (varões e laminados) e de CFRP (mantas e tecidos) em circunstâncias adversas; Chajes et al. (1994-a) quanto ao desempenho de mantas e tecidos de FRP (aramida, vidro-E e grafite) em vários ciclos higrotérmicos sobre soluções de cloreto de cálcio; Yagi et al. (1997) e outros autores referidos pelo JCI (JCI TC952 1998) acerca da determinação de níveis de deterioração

de mantas de CFRP coladas ao betão e sujeitas a exposições agressivas (naturais e aceleradas); Rostásy (1997-b) e Sasaki et al. (1997) relativamente ao comportamento de cabos de pré-esforço de GFRP, CFRP e AFRP, sobretudo em ambientes húmidos, alcalinos e marítimos.

A opinião geral dos autores coincide no facto de que existe deterioração da generalidade dos sistemas de FRP, particularmente, o deficiente desempenho dos GFRP em meios alcalinos. Contudo, em termos globais os compósitos são mais duráveis no tempo do que os materiais tradicionais, salientando-se a melhor resistência global registada pela família dos compósitos de CFRP.

### **História de carga**

Nesta área, destacam-se os agentes relacionados com o *tempo de duração* e o *tipo de solicitação*, natureza estática, dinâmica ou sistema cíclico das acções que possam intervir nas estruturas e nas propriedades dos materiais.

#### *(i) - Comportamento à fluência e à relaxação*

Os compósitos reforçados com fibras, devido às propriedades viscoelásticas do material (polímeros termoendurecíveis), podem apresentar diferentes comportamentos à *fluência* e à *relaxação* quando sujeitos a acções constantes no tempo. Estas variações de deformação e de tensão num compósito são, fundamentalmente, dominadas por ocorrência de mecanismos de alteração na matriz, a nível das forças internas de ligação. Dependem de factores como o grau de cura da resina, o volume e a orientação das fibras, o processo de fabrico do FRP e, ainda, de agentes do meio, como a temperatura e a humidade. Neste contexto, as fibras de carbono, aramida e vidro têm excelente resistência.

Quanto maior for o  $T_g$  do compósito, maior é a resistência do material à *fluência*. Os compósitos reforçados unidireccionalmente apresentam melhor comportamento na direcção das fibras, do que os bidireccionais e os multidireccionais. O aumento de tensões de tracção, combinado com ambientes de elevada amplitude higrotérmica e agentes químicos agressivos, pode conduzir ao amolecimento da resina, à diminuição da ligação interlaminar e, por último, à antecipação no tempo da ruína por fluência (EUROCOMP, 1996). A Figura 2.11 ilustra o comportamento típico de um compósito à fluência. Para deformações baixas, a estrutura recupera o estado inicial, após a eliminação da carga. Em oposição, para tensões de tracção elevadas, a rotura pode surgir ao fim de um certo tempo, através da formação de mecanismos progressivos de ruína, por instabilidade da matriz e fendilhação laminar (pontual), até ao limite do esgotamento da capacidade da fibra (roturas sucessivas de grupos de fibras).



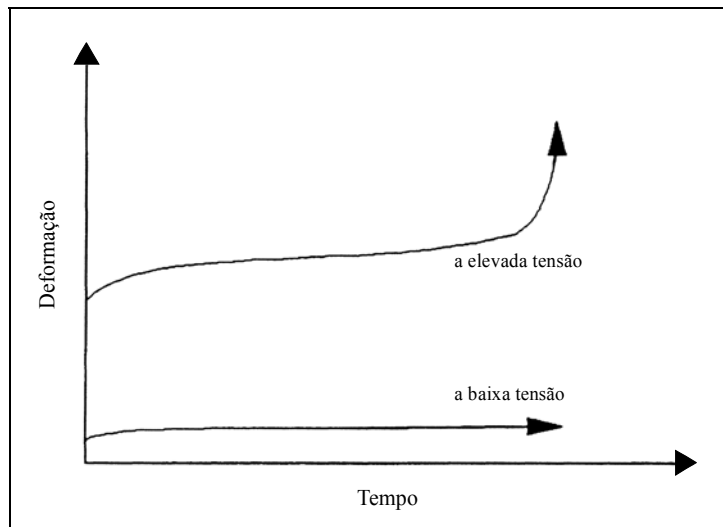


Figura 2.11 - Comportamento à fluência de um FRP a baixas e altas tensões (EUROCOMP, 1996).

Num projecto, é fundamental definir critérios de correcção e limitação de determinados parâmetros, afectos à *fluência* e à *relaxação* dos materiais, de modo a traduzirem a deformação e a tensão esperadas no compósito, ao longo do tempo. Como exemplo, para os primeiros salienta-se a redução do módulo de elasticidade e da resistência à tracção e, para os segundos, menciona-se a limitação da deformação e da tensão aplicada e o controlo da temperatura ambiente.

Visto que, na área dos novos materiais cada situação é um caso a analisar, estes critérios devem resultar da avaliação da informação experimental sobre casos específicos, disponíveis até hoje. Neste âmbito, a base de dados é reduzida e dispersa, mas no entanto, alguns trabalhos experimentais deverão servir de referência.

Um estudo efectuado na Alemanha, sobre o comportamento à fluência dos compósitos de GFRP, permitiu concluir que a ruína não ocorre no compósito, se for sujeito à acção constante de uma tensão limitada a 60% da resistência do material a curto prazo (Budelmann et al., 1993). Numa publicação recente de Rostásy (1998) acerca do comportamento geral de laminados de CFRP unidireccionais, o autor refere-se à sua experiência e de outros investigadores sobre a resistência à fluência desses produtos. De uma maneira geral, conclui que os laminados colados com resina de epóxido não apresentam resposta significativa por fluência ou relaxação, às acções contínuas normalmente esperadas em serviço, para aplicações de reforço deste tipo.

Recentemente, foram realizados ensaios de investigação das propriedades à fluência de varões de GFRP, CFRP e AFRP, com 55% de volume de fibras, durante um período de 1000 horas

à temperatura ambiente de  $22 \pm 1^\circ\text{C}$  (Yamaguchi et al., 1997). Os resultados do comportamento geral desses compósitos resumem-se nos diagramas de variação da tensão de tracção e da deformação, com o tempo de solitação (até à ruína), ilustrados nas Figuras 2.12 e 2.13, respectivamente. Neste trabalho, conclui-se que cada tipo de FRP tem um modo próprio de ruína à fluência dependendo do nível de carga e que, ao inverso do GFRP e do AFRP, nos sistemas de CFRP não se observou praticamente nenhuma deformação por fluência, nem perda significativa de tensão por relaxação no período em análise. Conclusões idênticas discriminam-se nas especificações técnicas do sistema Replark (1996) após a realização de testes à fluência e à relaxação em compósitos de CFRP (varões e mantas), no período de 10000 horas.

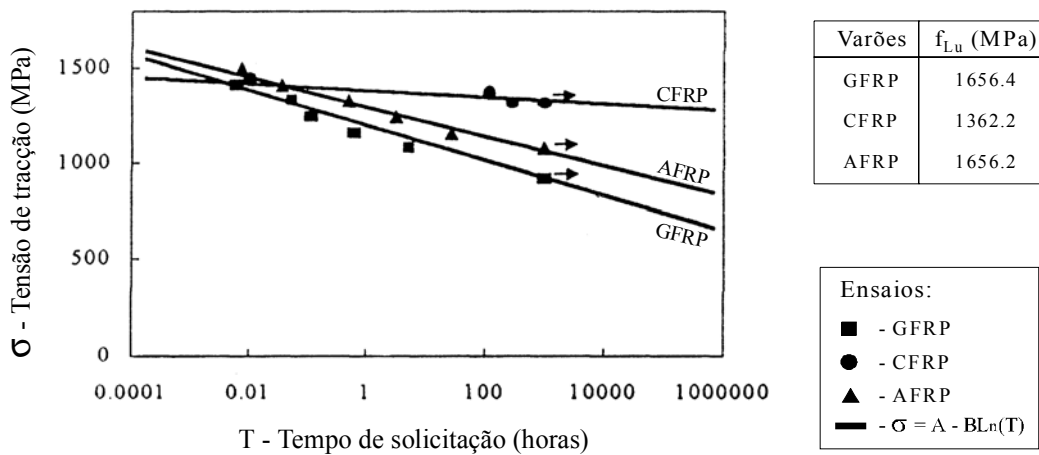


Figura 2.12 - Tempos de colapso de varões de FRP (Yamaguchi et al., 1997).

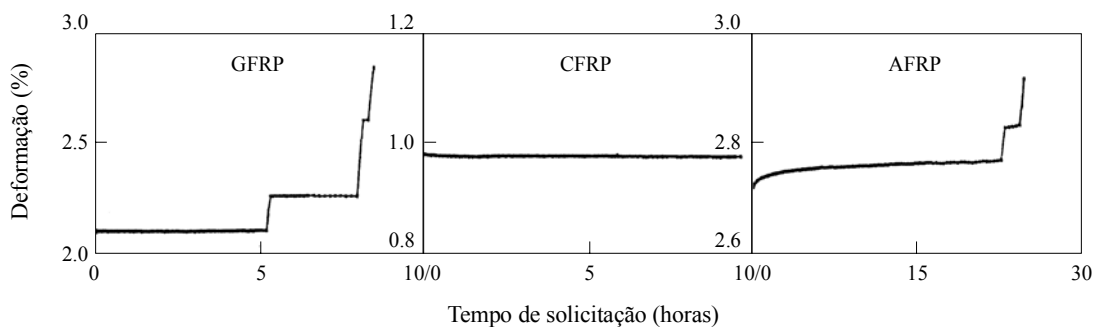


Figura 2.13 - Deformação de varões de FRP, por fluência (Yamaguchi et al., 1997).

A nível de cabos compósitos, os autores Ando et al. (1997) levaram a efeito um conjunto de ensaios sobre o seu comportamento a longo prazo, principalmente, a nível da ruína por fluência e da variação da relaxação com a temperatura. A partir dos resultados dos vários cabos de AFRP e CFRP ensaiados, os autores deduzem que a resistência à ruína por fluência é de 66% e de 79% da capacidade última estática de cada um dos sistemas, respectivamente, no termo do período

esperado de 50 anos. Os mesmos autores prevêm para esse período, que os cabos de AFRP e de CFRP tenham um teor de relaxação cerca de 18% e de 2% para cada um, à temperatura de 20°C. Entretanto, o aumento da temperatura para 60°C parece interferir na relaxação dos cabos de CFRP, ao contrário dos outros em aramida.

(ii) - *Comportamento à fadiga*

O tipo de solicitação, natureza estática, dinâmica ou sistema cíclico, pode intervir nas propriedades dos compósitos, sobretudo ao nível da *fadiga*.

A resistência à *fadiga*, nos produtos derivados dos compósitos de FRP, é relativamente pouco conhecida, como consequência da escassa informação disponível nesta área. Constituem excepção alguns artigos publicados sobre a investigação da fadiga em varões e cabos de pré-esforço aplicados normalmente na execução de pontes e parques de estacionamento, cujas estruturas possam estar sujeitas a um vasto número de acções cíclicas. Verificou-se, nestas aplicações, que a generalidade dos compósitos reforçados com fibras de elevado desempenho (grafite, carbono e aramida), quando submetidos a acções cíclicas, apresentam melhor resistência à *fadiga* do que os equivalentes em aço. Quando o reforço é executado com fibras de vidro, estes produtos comportam-se pior do que os anteriores (Schwartz, 1992), havendo uma redução significativa de resistência a baixos níveis de tensão. A ruína por *fadiga* de um compósito de FRP é progressiva, ao contrário do aço, cuja ruína surge rápida e no fim do tempo de fadiga estabelecido para o material.

A elevada resistência à fadiga de varões de CFRP foi também confirmado por Uomoto et al. (1995), depois de submeter vários varões de FRP a ensaios de fadiga de  $4 \times 10^6$  ciclos à máxima tensão de 87.5% da resistência média à tracção do material, independentemente da amplitude dos ciclos. Numa outra investigação sobre ensaios desta natureza, com variação de tensão entre 5% a 50% da resistência última do compósito, os autores Adini et al. (1998) concluíram que as variações de temperatura (20°C para 40°C) e de frequência (0.5Hz para 8Hz) provocam a redução em nº de ciclos, do período de fadiga. Ao nível de cabos para aplicações de pré-esforço, as conclusões são semelhantes relativamente ao bom desempenho dos compósitos de carbono experimentados até  $3 \times 10^6$  ciclos de carga (Gorty, 1994; Horiguchi et al., 1995).

Entretanto, ainda são diminutas as informações sobre o comportamento à *fadiga* de laminados ou de mantas de FRP aplicados a reforços colados ao betão. Contudo, no EMPA foram já testados vários laminados colados a modelos de betão, uns sob a forma híbrida de fibras de vidro e de carbono (Kaiser, 1989) e outros com a geometria de tiras de carbono (Deuring, 1993) e descritos por Meier (1997-a). Os resultados gerais indicam que a resistência à fadiga das estruturas aumenta,

sublinhando-se o facto de os laminados expressarem mais insensibilidade do que os equivalentes em aço à denominada “corrosão por fricção”, como consequência do efeito cíclico e do estado de fendilhação que vai surgindo na estrutura (Deuring, 1996). Outros autores, como Chajes et al. (1995-a) e Shahawy et al. (1998), têm estudado, recentemente, o comportamento da ligação colada compósito-adesivo-betão sob o efeito de ensaios cíclicos e submetida a várias condições ambientais de temperatura, humidade e agressividade química. Segundo Rostásy (1998), nas aplicações deste tipo com laminados pré-fabricados ou mantas flexíveis de CFRP unidireccionais, a máxima tensão esperada para serviço é da ordem de 20% da resistência do material a curto prazo. Sendo assim, não será a resistência à fadiga do FRP o factor decisivo num reforço, mas sim, o comportamento da estrutura de betão armado ou pré-esforçado.

As propriedades à *fadiga* de um material compósito são bastante boas quando as solicitações actuam na direcção das fibras, mas insuficientes para carregamentos transversais ou de corte. Na ausência de modelos matemáticos de caracterização destas propriedades, a sua obtenção é, normalmente, determinada por via experimental, definindo-se curvas de relação tensão-ciclos de carga ( $\sigma$ -N). Depois, procuram atingir-se os objectivos de projecto, geralmente por limitação das tensões ou das deformações por fadiga, abaixo dos valores estabelecidos nessas curvas pelo número de ciclos desejado para tempo de fadiga da estrutura (EUROCOMP, 1996).

### **Comportamento ao fogo**

O comportamento ao fogo pode tornar-se num “ponto crítico” nas aplicações de sistemas de FRP à construção civil.

Apesar de se verificar que a maioria dos compósitos não é directamente inflamável e que apresenta comportamento satisfatório a elevadas temperaturas (Franke, 1981; Schwartz, 1992), deve existir alguma preocupação, por parte do projectista, de se informar com o fornecedor sobre esta matéria. A resina utilizada na composição da matriz de um produto de FRP pode comprometer o elemento estrutural onde foi aplicada, quando sujeita a um incêndio durante um certo período de tempo.

Por exemplo, no caso de *compósitos inseridos* em elementos de betão, a estrutura tem um comportamento de risco reduzido, semelhante ao exigido para as estruturas de betão armado e pré-esforçado em situações de incêndio. Para isso, é conveniente estudar a espessura de recobrimento dos varões, das grelhas ou dos cabos utilizados no reforço, assim como a matriz constituinte do compósito, para se garantir o tempo de resistência ao fogo estabelecido no projecto (ACI 440R-96, 1996).

Na hipótese de *exposição directa* dos sistemas compósitos às acções do fogo, como por exemplo as colagens exteriores de laminados ou mantas de FRP, o reforço estrutural pode ficar comprometido. Nestes casos, o comportamento ao fogo do sistema deve ser analisado segundo três níveis, ou seja, o efeito das elevadas temperaturas próximas ou superiores à temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), o efeito da combustividade dos materiais e o efeito da toxicidade e desenvolvimento de fumos.

Sob o ponto de vista da resistência, o *efeito da temperatura* e o seu *tempo de permanência* constituem factores deveras preocupantes. As consequências da elevação da temperatura na matriz do compósito de FRP e no adesivo de colagem estão directamente ligadas com o valor do  $T_g$  do material e traduzem-se nos efeitos referidos anteriormente, aquando da análise deste parâmetro na durabilidade da estrutura.

Apesar das publicações que abordam este assunto serem em número reduzido, deve salientar-se as preocupações expressas em dois artigos sobre os ensaios experimentais efectuados neste domínio.

No EMPA, em 1994, foram realizados ensaios de comportamento ao fogo de seis vigas de betão armado, sujeitas à flexão em quatro pontos. Cinco destes modelos estavam reforçados por colagem de chapas de aço num caso e por adição de laminados de CFRP nos restantes quatro casos. A sexta viga actua como referência e sem reforço exterior. Sob flexão, os modelos foram aquecidos até o forno atingir a temperatura de  $925K$  ( $651.85^\circ C$ ), de acordo com as normas ISO 834, durante uma hora. A viga reforçada com a chapa metálica cedeu ao fim de 8 minutos por incapacidade do adesivo. Nas outras com CFRP assistiu-se, primeiro, ao início da inflamação das fibras de carbono na superfície do laminado e depois, à redução gradual da secção útil e consequente diminuição de rigidez do compósito. Em termos médios, ao fim de uma hora o laminado acabou por destacar-se da viga. Na perspectiva do autor deste artigo (Meier, 1997-b), ambos os casos de reforço cederam pela ligação, mas com vantagem para os compósitos de CFRP porque apresentaram um desempenho superior ao reforço metálico, devido à baixa condutividade térmica transversal do compósito. A publicação da série “Documentation SIA” D0128 (1995) analisa detalhadamente este estudo realizado no EMPA.

A publicação JCI TC952 (1998) destaca, também, um estudo experimental realizado no Japão pelos autores Tanaka et al. (1996), em que as mantas de FRP mantêm 70% da resistência à tracção a  $260^\circ C$ , se estiverem convenientemente protegidas do fogo. Além disso, não há registo de redução da resistência à tracção após arrefecimento até à temperatura ambiente, após um aquecimento a  $320^\circ C$  durante duas horas.

Normalmente, a literatura internacional recomenda que, nos casos de *exposição directa* ao fogo, não se deva executar reforços com sistemas de FRP, a menos que se apliquem procedimentos adicionais de prevenção. Estes procedimentos devem ser estudados em conformidade com as informações dos fornecedores dos sistemas (compósitos de FRP e colas) e de acordo com as exigências estabelecidas no projecto (Regulamento de Segurança contra Incêndios). Dependendo do tempo desejado para resistência ao fogo, salientam-se as propostas de revestimento directo dos laminados com cartões de gesso (Rutz, 1995) ou com painéis de sílica do tipo PROMAT (Wendel, 1995) e, ainda, as aplicações de qualquer um destes materiais sob a forma de tectos falsos suspensos pelas lajes de pavimento (Figura 2.14). Nestas situações, a espessura de dimensionamento dos materiais dependerá do recobrimento da armadura interna no betão existente, da percentagem de reforço a executar e da extensão superficial colada com FRP a proteger ao fogo.

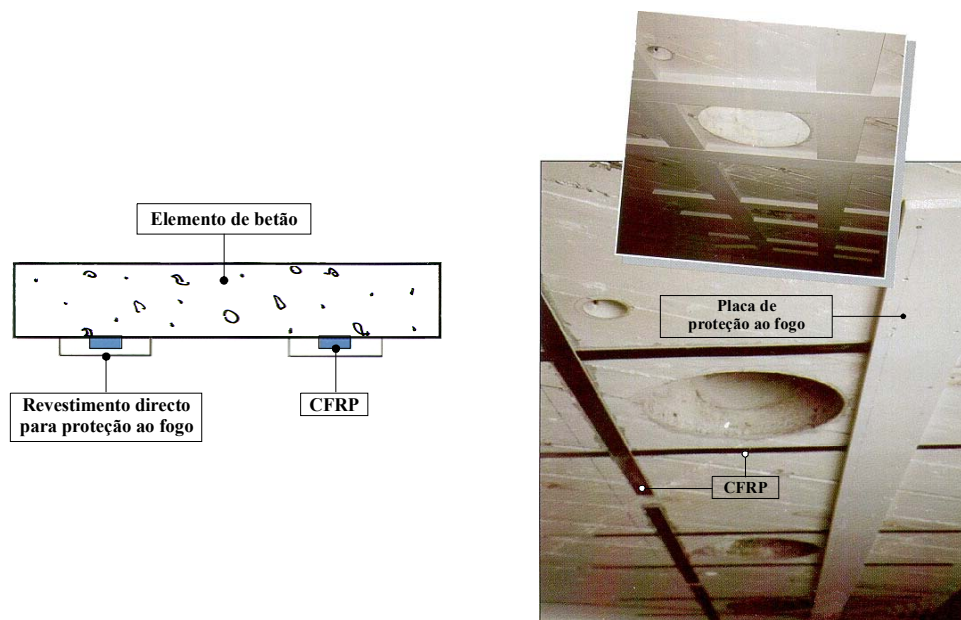


Figura 2.14 – Protecção adicional ao fogo por revestimento directo dos laminados de CFRP com cartões de gesso ou placas de sílica (S&P, 1998).

Em qualquer dos casos, as consequências da rotura do reforço devem ser sempre encaradas como uma situação de risco possível (fogo, vandalismo, explosão). Geralmente, exige-se que a estrutura, com a ruína do reforço, possa suportar a combinação de acções estabelecida nesta situação (*coeficiente de segurança* maior que a unidade), isto é, resista às acções permanentes e a uma percentagem das acções variáveis. Desde o início da década de setenta recomenda-se que o reforço posterior de estruturas existentes não exceda mais de 50% da sua resistência actual e que, no caso da ruína accidental do reforço, a estrutura remanescente tenha uma *segurança residual* superior ou igual a 1.2 para se evitar o colapso geral (Meier, 1997-a).

## 2.3 - COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS REFORÇADAS COM COLAGEM DE COMPÓSITOS DE CFRP UNIDIRECCIONAIS

A aplicação da técnica da colagem com armaduras de material compósito, sobretudo do tipo CFRP (Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono), consiste actualmente numa realidade credível na indústria da construção civil. Surge na sequência de um critério de alternativa à comprovada aplicação de chapas metálicas, como consequência da oferta de vantagens únicas em resposta às dificuldades manifestadas pelos materiais tradicionais e expostas no item 2.1.

Na linha de orientação dos principais trabalhos efectuados por vários autores, esta secção propõe caracterizar os aspectos mais importantes do comportamento de estruturas de betão (vigas e lajes) reforçadas à flexão com compósitos de CFRP unidireccionais, nomeadamente os *laminados pré-fabricados* e as *mantas* (e/ou tecidos) *flexíveis pré-impregnados*, e avaliar a eficiência destes no desempenho das estruturas à flexão.

Exclui-se, aqui, a análise dos trabalhos sobre o desempenho da técnica de colagem de sistemas de FRP (fios, mantas e tecidos) usados no reforço por confinamento de pilares, de paredes ou de chaminés em betão armado. Apesar disso, esclarece-se que estes critérios apresentam um notável desenvolvimento em países como o Japão e os EUA, reflectindo-se no número elevado de artigos publicados em actas de conferências internacionais referidas no item 2.1.1, como por exemplo o ICCI'96 (1996), o FRPRCS-3 (1997) e o ICCI'98 (1998).

### 2.3.1 - Principais contribuições experimentais

Meier (1987) expôs, pela primeira vez, a viabilidade do uso de armaduras de material compósito de CFRP no reforço exterior de elementos de betão armado. Como experiência piloto, apesar do número reduzido de modelos ensaiados, o autor apresenta resultados em que se compromete a substituir o aço pelo compósito com redução de custos na ordem dos 25%. Estes valores são promissores e conduzem a uma investigação posterior coroada de êxito. As conclusões iniciais vão sendo detalhadas e ajustadas a aplicações concretas de reforço, através de uma série de contributos experimentais e numéricos relatados pelo mesmo autor ao longo dos últimos dez anos (Meier et al, 1991; Meier, 1992; Meier et al, 1992; Meier, 1995; Meier, 1997-a).

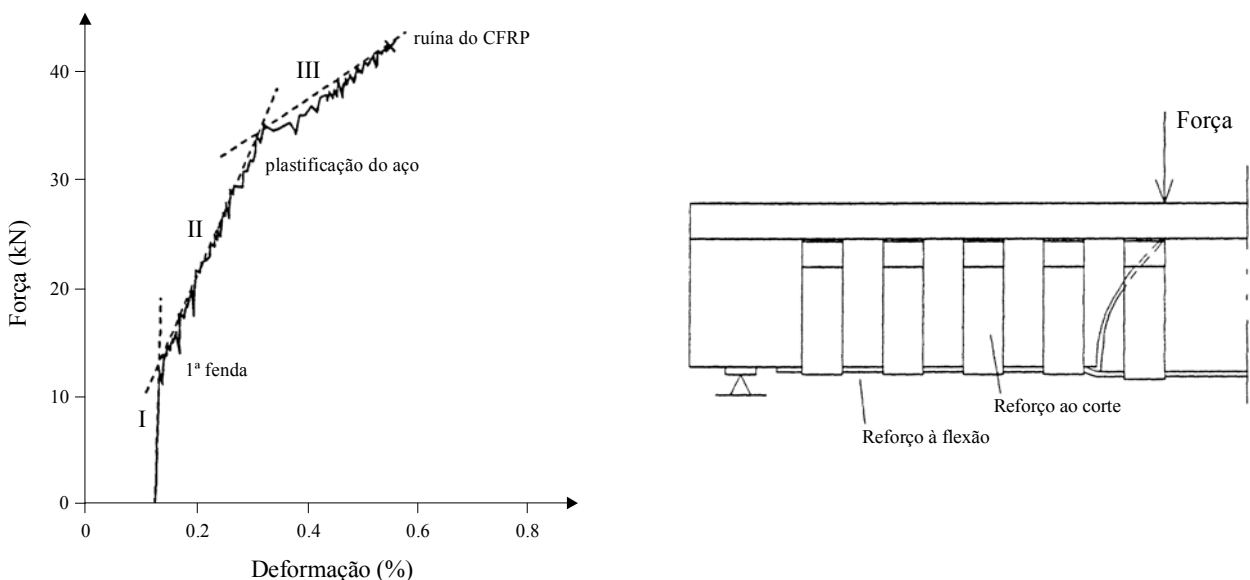
Esta sequência desencadeou a criação internacional da primeira chapa não metálica de CFRP, obtida por pultrusão e normalizada na construção civil com a designação de *laminados pré-fabricados*. Paralelamente a esta modalidade, outros autores investigaram o processo de reforço

de estruturas existentes por polimerização "in situ" de *mantas* ou *tecidos* flexíveis de FRP (vidro, carbono ou *Kevlar*<sup>®</sup>) em estado inicial seco ou pré-impregnado. Estes sistemas de FRP foram já identificados nos itens 2.1 e 2.2.

Durante esta década, têm sido vários os investigadores interessados em estudar as implicações do uso dos modernos compósitos de FRP nas modalidades laminados, mantas e tecidos, para o reforço e/ou reabilitação de estruturas de betão existentes (vigas, lajes, paredes, pilares).

### **Período até 1994**

O primeiro trabalho completo de análise experimental e analítica consiste na tese de doutoramento de Kaiser (1989). O autor realizou ensaios em vigas de betão armado (com 2 m de comprimento) reforçadas por colagem de laminados de CFRP e mistos de GFRP/CFRP, com adesivos epóxicos. Os resultados permitiram concluir que a resistência última aumentou 22% e que houve algum incremento de rigidez, sobretudo se o laminado for pré-esforçado antes da colagem. O comportamento geral da estrutura, durante o carregamento, apresenta três estados distintos (Figura 2.15-a), correspondendo o primeiro ao estado não fendilhado da secção de betão armado (*Estado I*). O segundo caracteriza-se pela fendilhação da secção de betão e pelo comportamento elástico do aço (*Estado II*) e o último compreende o início de plastificação da armadura até ao colapso por tracção do CFRP (*Estado III*) (Meier et al, 1991).



a) Relação força vs deformação.

b) Redução da propagação de uma fenda.

Figura 2.15 - Comportamento de vigas de betão reforçadas com armaduras exteriores (Meier et al., 1991; Kaiser, 1989).



A colagem do laminado conduziu a uma maior distribuição do padrão de fendilhação e a um menor valor da largura total de abertura de fendas, em relação ao modelo de referência de betão armado e para o mesmo nível de carga. Após plastificação da armadura interna (*Estado III*), o desenvolvimento das fendas é controlado pelo comportamento elástico do CFRP até à ruína.

Kaiser alerta para que se preste especial atenção à formação das fendas de corte no betão, uma vez que podem ser responsáveis pelo destacamento prematuro do laminado e, conseqüentemente, pelo insucesso do reforço. No sentido de controlar a propagação das fendas na viga, o autor propõe o reforço à flexão e ao corte através da colagem de laminados nas faces inferior e laterais como se demonstra na Figura 2.15-b.

O trabalho realizado demonstrou ser válida a utilização do "método da compatibilidade de deformação" na análise do comportamento de uma secção reforçada nestas condições. Este estudo inclui, ainda, o desenvolvimento de um modelo analítico de interpretação da zona de amarração do compósito, em concordância com o critério de Ranisch estabelecido nas normas Alemãs.

A utilização de mantas e laminados pré-esforçados, antes de colados à superfície de elementos de betão (Figura 2.16), foi investigado inicialmente em trabalhos como os de Meier et al. (1991), Deskovic (1991) e Triantafyllou et al. (1992-a) e posteriormente completados no importante trabalho de doutoramento de Deuring (1993) com o título "Verstärken von Stahlbeton mit Gespannten Faserverbundwerkstoffen" (Reforço de betão armado com colagem de FRP pré-esforçado). Neste período foi estudado, analítica e experimentalmente, um modelo de cálculo de controlo da força de pré-esforço compatível com o sistema, de modo a evitar-se o colapso das extremidades do laminado devido ao surgimento da ruína por corte no betão. Deuring verificou ser fundamental introduzir um sistema de ancoragem nas extremidades do CFRP, podendo consistir no envolvimento da secção por uma faixa adicional em manta ou tecido (de AFRP ou CFRP), com a forma de "U", colada em toda a sua extensão e encastrada na zona comprimida da viga (Figura 2.16). A aplicação deste método a ensaios de vigas em flexão estática, à fadiga e sob cargas mantidas constantes permitiu concluir que o comportamento em serviço das estruturas é melhorado e que o destacamento prematuro do FRP devido às fendas por corte pode ser evitado, quando comparado com a técnica do simples reforço à flexão das vigas (Meier et al., 1992). Como os laminados de CFRP não têm deformação plástica, Deuring deduziu que a máxima resistência à flexão é obtida quando a ruína do compósito ocorre em simultâneo com a plastificação da armadura e antes do esmagamento à compressão do betão.

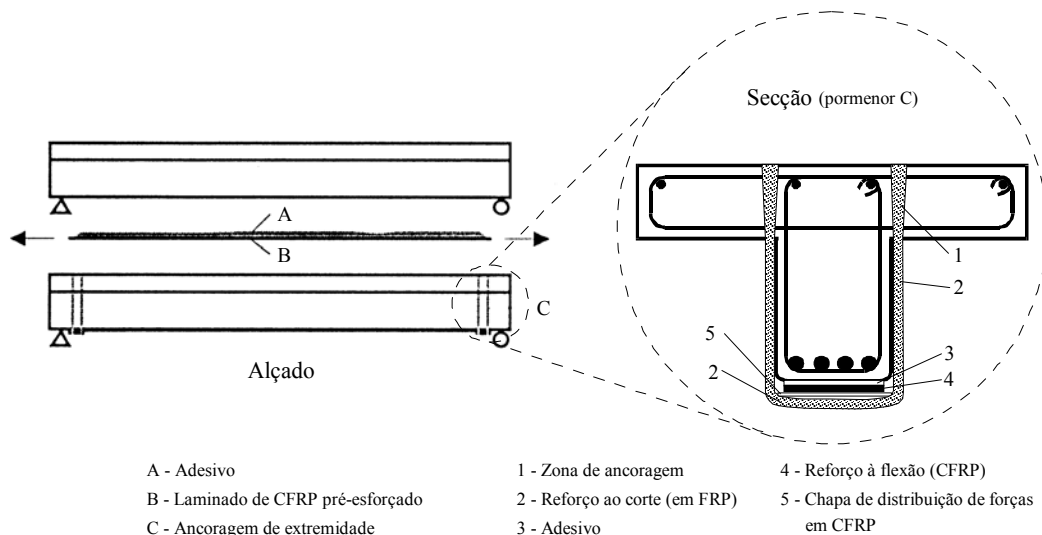


Figura 2.16 - Reforço de uma viga com um laminado pré-esforçado e um sistema de ancoragem (Meier et al., 1992).

Em 1994, é possível afirmar que o EMPA adquiriu os conhecimentos fundamentais sobre a substituição das armaduras metálicas por laminados semi-rígidos de CFRP (pré-esforçados ou não), na técnica de colagem a elementos de betão existentes. Ficou por concluir o comportamento a longo prazo e os pormenores de optimização e de exequibilidade dos laminados em aplicações futuras. Esta primeira fase de compreensão dos principais mecanismos de comportamento está claramente resumida no artigo de Meier (1995), apresentado em Londres na conferência do "NAFEMS-Research Working Group".

Simultaneamente, entre 1990 e 1994 outros grupos de investigação foram confirmando as principais deduções até agora discriminadas. Além disso, foram contribuindo com conhecimentos acerca do comportamento de estruturas reforçadas com *mantas* e *tecidos* de FRP, sobretudo com fibras de vidro, aramida, *Kevlar*<sup>®</sup> e carbono. Nesse grupo, descrito com algum detalhe na compilação de Juvandes et al. (1996-a), incluem-se as contribuições fundamentais de autores como Ritchie et al. (1991), Saadatmanesh et al. (1990; 1991), Triantafillou et al. (1992-b), Rostásy et al. (1992), Sharif et al. (1994) e Chajes et al. (1994-b).

Através destes estudos, concluiu-se que para melhorar a eficiência da aplicação dos compósitos de CFRP a elementos de betão e perspectivar o estabelecimento de critérios de dimensionamento, é necessário compreender melhor alguns dos mecanismos da ligação, sem consenso geral até este momento. Alguns destes mecanismos estão directamente ligados à definição dos critérios gerais de ruína, em particular, à identificação e controlo dos modos prematuros de colapso; à caracterização da aderência na interface da ligação betão-adesivo-compósito; ao comportamento das extremidades livres do compósito na zona de ancoragem dos esforços; à implementação do reforço adicional ao

corte de vigas; à caracterização do comportamento a longo prazo dos novos materiais e da ligação. Estas interrogações surgiram nos principais trabalhos de investigação dos últimos cinco anos, dispersos pela Europa, América do Norte e Japão, como o vão demonstrar as publicações seleccionadas seguidamente.

### **Período após 1994**

Täljsten (1994) publica em 1994 um trabalho teórico e experimental sobre o comportamento da técnica de colagem de chapas (metálicas e laminados de FRP) a estruturas de betão existentes. O autor elabora um estudo detalhado da distribuição de tensões de corte e de tracção (efeito designado por "peeling") na interface e, sobretudo, nas extremidades da ligação. Desenvolve fórmulas lineares elásticas, para a fase não fendilhada do betão, e ajusta um novo conceito à mecânica da fractura não linear (de sigla NLFM), para a caracterização das tensões após a fendilhação do betão.

Na sequência das investigações realizadas no EMPA por Kaiser, Deuring e outros autores, na Suíça publicam-se dois documentos que realçam os contributos fundamentais para o manuseamento do reforço com laminados de CFRP obtidos por pultrusão. Primeiro, surge a edição do "documento SIA" D0128 (1995) e, dois anos mais tarde, as informações contidas na publicação D0144 (1997) da mesma série.

Da Alemanha provêm as primeiras institucionalizações e normalizações acerca da optimização da técnica de aplicação de laminados pré-fabricados de CFRP. Com base em trabalhos minuciosos experimentais e analíticos, salientando-se os estudos de aderência, o modelo de cálculo e os critérios de ancoragem dos compósitos desenvolvidos neste período por Holzemkämpfer (1994), Rostásy et al. (1996; 1997-b), Rostásy (1997-a; 1998) e Neubauer et al. (1997) no iBMB da "Technical University Braunschweig" e ainda o "Deutsches Institut für Bautechnik" (DIBt) com a oficialização, pela primeira vez, dos documentos de homologação sobre os laminados de CFRP do tipo Sika (Homologação Nr. Z-36.12-29, 1997) e do tipo S&P (Homologação Nr. Z-36.12-54, 1998).

Paralelamente nos E.U.A., em 1996 divulgaram-se os resultados do estudo experimental efectuado por Chajes et al. (1996), sobre o comportamento da aderência e o sistema de transmissão de esforços na interface das ligações coladas de grafite-epóxido-betão (usando mantas pré-impregnadas, laminados e mais tarde tecidos), após ensaios de corte simples. Neste trabalho, estabelecem-se relações e limites para as ligações quanto ao comprimento e à força máxima de transferência. Destacam-se, também, a importância do tipo de preparação da superfície, as características do betão e a variação das propriedades do adesivo na determinação do valor da aderência.

Varastehpour et al. (1995; 1996) estudam, igualmente, um modelo experimental de caracterização da interface betão-adesivo-compósito (mantas), que propõe informar sobre os modos de ruína possíveis e, em especial, adiantar uma interpretação analítica para dois casos de rotura prematura comuns nas ligações coladas. A este nível o documento D0144 (1997) é o mais completo relativamente a laminados pré-fabricados. Salientam-se ainda as contribuições experimentais sobre modos de ruína de reforços de vigas de betão com mantas e tecidos polimerizados "in situ" de Saadatmanesh et al. (1997-b), Wu et al. (1997), Brosens et al. (1997) e resumidos por Büyüköztürk et al. (1997; 1998). Estes trabalhos, além de apresentarem uma visão sobre os modos de ruína antecipados, prestam especial destaque aos fenómenos de concentração de tensões nas zonas específicas da interface. Nesta matéria, apesar da dificuldade da língua, os Japoneses têm contribuído imenso com a experiência de mantas e tecidos, como o prova a recente publicação do JCI (JCI TC952, 1998).

Al-Sulaimani et al. (1994) confirma o benefício que se pode extrair do valor da rigidez e da ductilidade de uma viga de betão armado reforçada ao corte, através da colagem de sistemas compósitos flexíveis do tipo pré-impregnado (mantas unidireccionais ou tecidos). Desde o início da realização da técnica de colagem com armaduras metálicas que vários estudos sublinham a importância que tem o reforço adicional ao corte, principalmente em elementos lineares sujeitos a esforços transversos (vigas). Para além do corte, otimiza-se a componente de reforço à flexão (Täljsten, 1994). Estas conclusões são aplicáveis ao uso de compósitos, com a vantagem de a execução ser facilitada na aplicação, sobretudo, de sistemas flexíveis pré-impregnados em lugar de sistemas laminados pré-fabricados. Actualmente, existem poucos trabalhos publicados neste domínio expondo ideias claras quanto à forma prática de concretizar um reforço ao corte com compósitos de FRP. Contudo, salientam-se os estudos com mantas e tecidos de FRP de Chajes et al. (1995-b), Norris et al. (1997), Taerwe et al. (1997) e os citados pelo JCI TC952 (1998), além das investigações recentes com laminados de Chaallal et al. (1997).

Em Portugal, os compósitos de CFRP apresentam alguma expressão a dois níveis. No primeiro, indicam-se os contactos iniciais de nível experimental, com o comportamento à flexão de vigas e lajes reforçadas com laminados pré-fabricados de CFRP do tipo Sika *Carbodur S 512* e *S 812* apresentados por Nsambu (1997), Juvandes (1996) e Juvandes et al. (1997-a; 1997-b; 1998-g). O trabalho destes últimos é complementado em 1999 com o programa de análise numérica de previsão do comportamento de ligações coladas betão-CFRP, desenvolvido por Costeira Silva (1999). No outro nível, referem-se os conhecimentos adquiridos nos trabalhos experimentais de reforços com colagem de sistemas flexíveis do tipo manta unidireccional Replark e do tipo tecido bidireccional TFC Freyssinet, ambos de fibras de carbono. O primeiro caso foi testado no reforço à flexão de faixas

de laje (Juvandes et al., 1998-f e 1998-b) e o segundo adicionado a vigas para melhoramento à flexão e ao corte (De Sousa et al., 1998).

### 2.3.2 - Modos de ruína gerais

A generalidade dos estudos experimentais sobre a colagem de reforços de material compósito FRP (sistemas laminados, mantas ou tecidos) referem os modos de ruína observados nos ensaios. A identificação destas ruínas é fundamental para a compreensão global do comportamento dos novos materiais e para o posterior desenvolvimento de critérios de dimensionamento e de prevenção da técnica de reforço de estruturas existentes.

Os modos de ruína podem ser interpretados de duas formas. A primeira responde às situações de comportamento estático a curto prazo referidas num grande número de trabalhos. A segunda traduz os casos relatados por um número ainda reduzido de autores, sobre as ruínas obtidas no comportamento dinâmico e a longo prazo de estruturas reforçadas. Esta última foi referida anteriormente (item 2.2.2), retratando-se, agora, os casos ligados ao comportamento a curto prazo.

Os ensaios com laminados de CFRP analisados por alguns investigadores do EMPA, nomeadamente Kaiser (1989), Deuring (1993) e Meier et al. (1993), podem conduzir à observação dos seguintes *modos de ruína* (Figura 2.17):

- 1 - Rotura violenta e brusca na secção mais traccionada do laminado de CFRP. Este limite é precedido por sons crepitantes no laminado e por fendilhação e deformações elevadas no betão (pode ser detectada por sonda acústica);
- 2 - Esmagamento da zona comprimida da viga (ruína clássica no betão);
- 3 - Ocorrência de escorregamento de uma secção de betão por esforço transversal, situação observada como um segundo efeito que pode conduzir ao colapso do laminado;
- 4 - Destacamento do laminado devido a deslizamentos do betão na zona traccionada (efeito secundário). Esta situação proporciona o destacamento antecipado do laminado, de forma contínua ou brusca, sem qualquer benefício para a estrutura, em consequência de quatro situações possíveis: [1] superfície irregular do betão; [2] fendilhação de corte ("sudden peel-off"); [3] estado avançado das fendas de flexão ("continuous peel-off"); [4] efeito de extremidade do laminado;

- 5 - Corte interlaminar ou delaminação da chapa de CFRP, observados como uma segunda situação de ruína;
- 6 - Ruína por cedência da armadura interna na zona mais traccionada ou quando se esgota a sua resistência à fadiga.

Contudo, há outros *modos de ruína* teoricamente possíveis, embora ainda não observados por esses autores, e que são originados por:

- 7 - Ruptura na coesão interna do adesivo;
- 8 - Ruptura na aderência da superfície de ligação (ruína adesiva) entre o laminado e o adesivo;
- 9 - Ruptura na aderência da superfície de ligação (ruína adesiva) entre o betão e o adesivo (improvável se a superfície fôr tratada convenientemente).

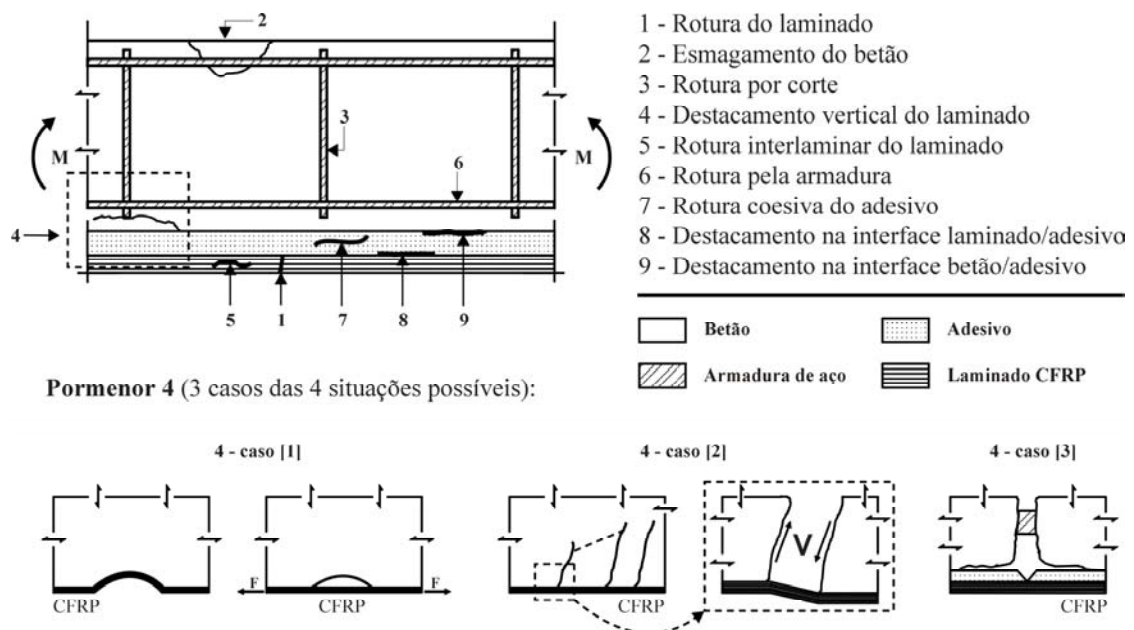


Figura 2.17 – Modos de ruína possíveis (com base em Deuring, 1993).

Na Suíça instituíram-se estes modos nos critérios de interpretação e de dimensionamento dos reforços com laminados de CFRP, como o demonstra o artigo de Thomas Vogel publicado na série "documento SIA" D0144 (1997) e resumido aqui na Tabela 2.6. Apesar de a ruína por esforço transversal estar ausente, *modo nº 3* da Figura 2.17, nesta tabela avalia-se a importância dos oito modos de ruína observados por Deuring (1993) e descrevem-se as medidas de verificação e prevenção destes a nível de projecto.

Tabela 2.6 - Mecanismos de ruína e medidas de verificação para evitar a sua ocorrência.

Nº [i]	MECANISMO [ii]	IMPORTÂNCIA [ii]	MEDIDAS DE VERIFICAÇÃO [ii]
1	Rotura da chapa ou do laminado por tracção.	É desejável no caso de chapas de aço, porque a rotura é precedida de grandes deformações resultantes da existência de um patamar de cedência no aço.	- Critério de rotura na verificação em estado limite último.
		É de evitar em laminados CFRP, porque se trata de uma rotura brusca (frágil).	- Limitação das extensões nos laminados CFRP.
2	Esmagamento do betão na zona mais comprimida.	Surge quando no bordo comprimido é atingida a máxima extensão de compressão no betão ( $\epsilon_{cu}$ ).	- Critério de rotura na verificação em estado limite último.
4	Delaminação do betão na zona traccionada ou na extremidade do laminado (zona de ancoragem).	Pode acontecer quando existem tensões de tracção elevadas no betão resultantes de escorregamentos verticais (ex: numa fenda), de traçados côncavos do laminado, de excentricidades na introdução de cargas (em especial na extremidade do laminado). Forma-se uma fenda no betão paralela ao laminado, que se propaga e pode levar ao destacamento de todo o laminado.	- Limitação da extensão do laminado; - Evitar laminados côncavos, ancorar laminados côncavos; - Preparação da base de colagem; - Dimensionamento das ancoragens.
5	Rotura interlaminar do laminado.	Só pode ocorrer em laminados CFRP e quando é ultrapassada a sua tensão de corte.	- Evitar deslizamentos e pressões transversais no laminado.
6	Cedência ou rotura das armaduras interiores em aço.	Pode suceder devido à extensão existente no aço antes de aplicado o reforço, mesmo quando neste o braço é menor e a tensão de cedência é superior relativamente à armadura de reforço. Quando a armadura atinge a tensão de cedência, é possível um aumento adicional da curvatura e simultaneamente uma redução da rigidez à flexão (estado III).	- Limitação da tensão em estado limite de utilização.
7	Rotura coesiva no adesivo.	Surge quando a tensão de corte do adesivo é ultrapassada, mas só é determinante no caso de falhas na colagem (ex: presença de bolhas de ar).	- Controlo da qualidade na execução.
8	Rotura adesiva na superfície do laminado.	É determinante quando existem erros de aplicação (eliminação defeituosa de gorduras no laminado), mecanismo de deterioração (laminados corroídos) e, eventualmente, solicitações de fadiga.	- Controlo da qualidade na execução; - Protecção contra a corrosão; - Verificação periódica e manutenção.
9	Rotura adesiva na superfície do betão.	É importante nos casos de erros de aplicação ou de baixa resistência à tracção na superfície de base da colagem.	- Preparação da superfície de betão; - Orientação da qualidade na execução.

[i] - O nº do mecanismo está em conformidade com os indicados na Figura 2.17, evidenciando-se a ausência nesta tabela do modo de ruína nº 3;

[ii] - Interpretações feitas para chapas metálicas e para laminados pré-fabricados de CFRP.

A interpretação destes modos de ruína tem sido realizada desde o início da aplicação da técnica de reforço estrutural por colagem de chapas metálicas até à substituição por adição de armaduras de material compósito, propostos recentemente. Algumas conclusões apresentam-se nos trabalhos de vários autores como por exemplo Oelhers et al. (1990), Täljsten (1994), Arduini et al. (1995), Rostásy et al. (1996; 1997-b), Juvandes et al. (1997-b) e Nsambu (1997). Alguns destes trabalhos analisam as consequências, em estado limite último, do reforço de vigas pré-fendilhadas inicialmente.

A investigação dos modos de ruína em reforços com sistemas flexíveis curados "in situ" (mantas ou tecidos) tem sido acompanhada por vários autores como Ritchie et al. (1991), Saadatmanesh et al. (1991), Triantafillou et al. (1991), Sharif et al. (1994), Varastehpour et al. (1996) e, recentemente, por Büyüköztürk et al. (1997; 1998). Todos eles dispensam especial atenção aos modos bruscos e súbitos, associados a mecanismos da ligação betão-compósito, que culminam com o colapso prematuro do reforço. Neste contexto, Büyüköztürk e Hearing resumem o comportamento de vigas reforçadas com FRP a seis modos de ruína distintos, representados nos diagramas de força vs deslocamento a meio vão da Figura 2.18. Segundo estes, os mecanismos de ruína da junta são do tipo frágil e resultam do destacamento localizado do compósito (efeito designado por "peeling"), a partir da sua zona de ancoragem ou de zonas com fendas instaladas no betão (flexão (a) ou flexão e corte (b)), como se ilustra na Figura 2.19.

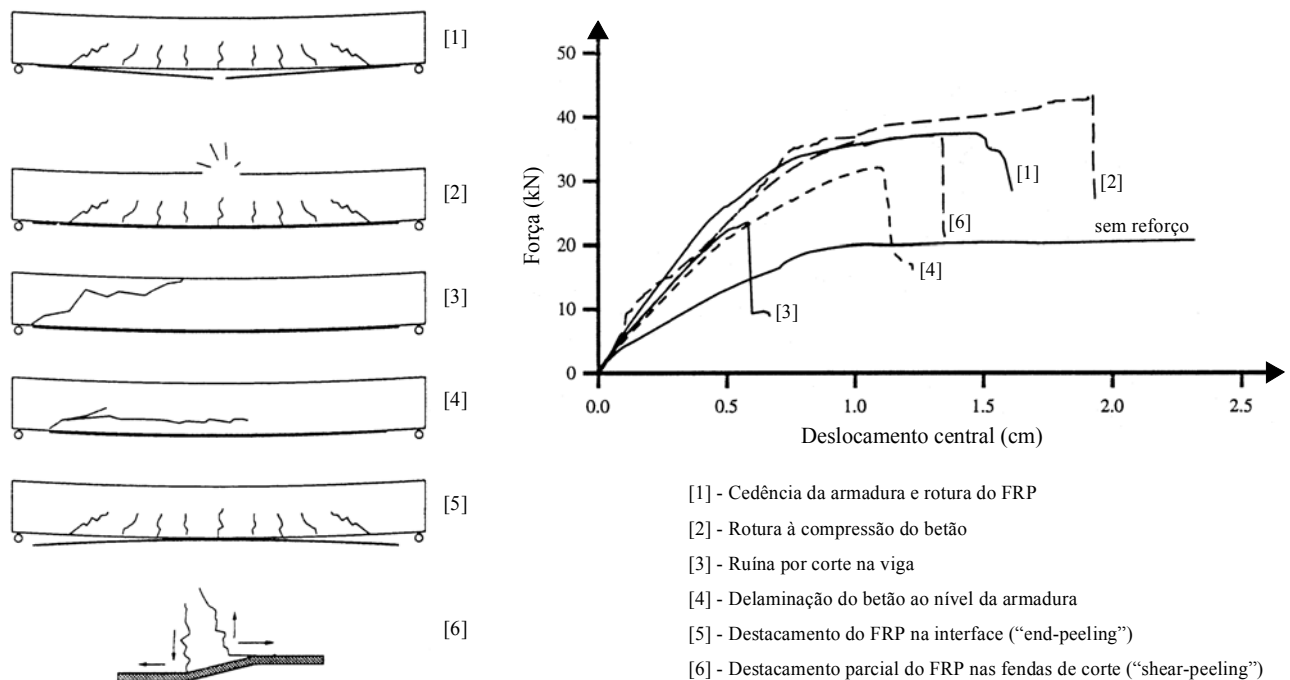


Figura 2.18 - Modos de ruína observados por Büyüköztürk et al. (1997; 1998).



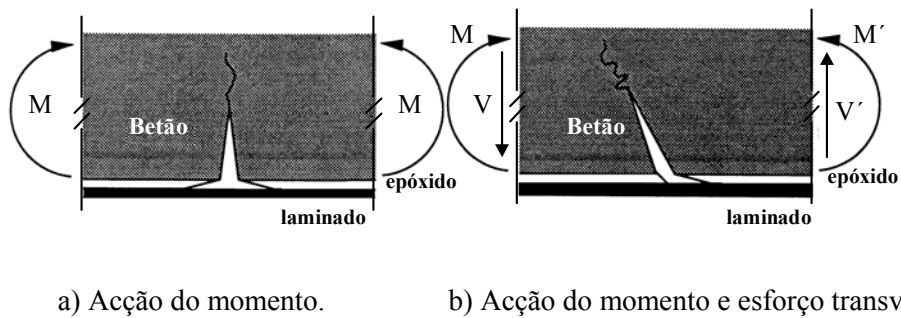


Figura 2.19 - Efeito de "peeling" na interface betão-compósito (Büyükoztürk et al., 1997).

A zona crítica de amarração das extremidades dos sistemas de FRP tem sido estudada no iBMB por autores como Rostásy et al. (1996) e Neubauer et al. (1997), através da interpretação de ensaios de aderência com modelos de corte duplo, tipo tracção-compressão. Nas condições estabelecidas pelos autores para os ensaios, foram observados vários modos de ruína, podendo coexistir mais do que um modo no comprimento de colagem estabelecido no estudo. Esses modos podem estar distribuídos pela ligação, como se ilustra na Figura 2.20, e podem assumir a forma de ruína interlaminar do CFRP, ruína adesiva na interface adesivo-CFRP e ruína por corte no betão na zona adjacente à junta.

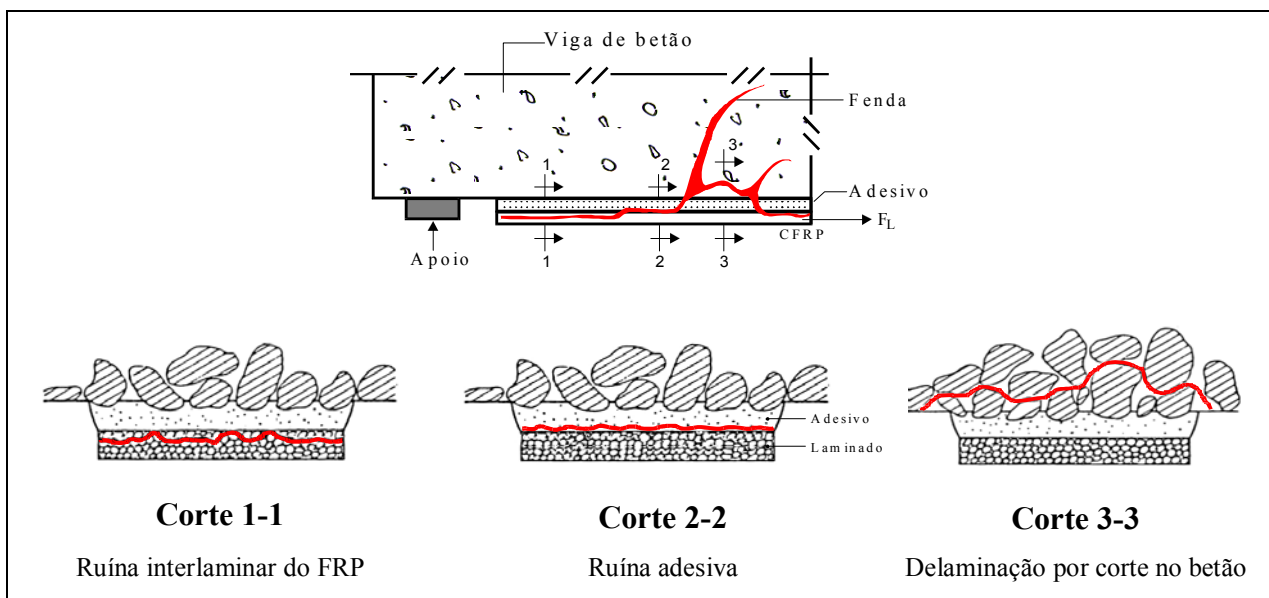


Figura 2.20 - Modos de ruína possíveis para a zona de amarração dos laminados de CFRP (baseado na informação de Neubauer et al. (1997)).

Após esta exposição, os *modos de ruína* podem sintetizar-se em três grupos admissíveis para as estruturas reforçadas com colagem de elementos metálicos ou compósitos e que se apresentam na Figura 2.21:

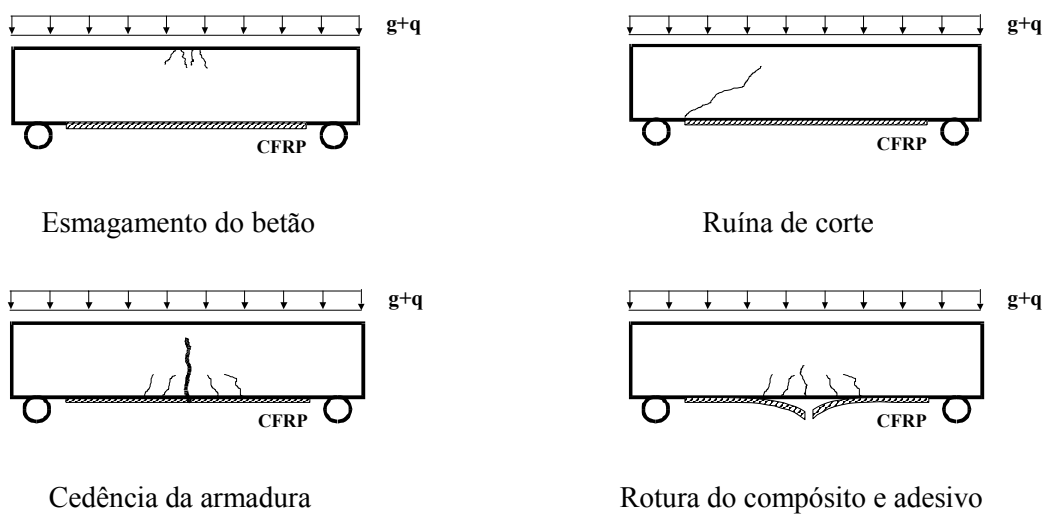
- i) *as ruínas clássicas das estruturas de betão armado ou pré-esforçado*, isto é, a cedência da armadura, o esmagamento do betão à compressão e a ruína por corte;
- ii) *a ruína dos novos materiais que são adicionados* (coesiva no adesivo e tracção no CFRP ou aço) e que, geralmente, são acompanhados por outro modo de ruína;
- iii) *as ruínas de cedência da ligação na interface betão-adesivo-laminado*, designadas na literatura específica por efeito de "peeling" e referidas neste trabalho pelo termo "destacamento" ou "cedência".

Os dois primeiros, *modo (i)* e *modo (ii)*, estão perfeitamente claros e caracterizados na literatura sobre reforço estrutural, ao contrário do *modo (iii)* que apresenta alguma dispersão de opiniões, sobretudo na experiência com sistemas laminados ou com sistemas de mantas e tecidos.

Em consequência da distribuição de esforços e respectiva propagação da fendilhação no betão, presentes na demarcação de três zonas específicas numa estrutura (Zona I - com elevados esforços transversos; Zona II - com momentos flectores moderados e esforços transversos razoáveis; Zona III - com momentos flectores elevados e esforços transversos reduzidos), pode surgir uma cedência repentina e brusca da ligação betão-laminado, *modo de ruína (iii)*.

Este modo (iii), apesar de frequente, torna-se indesejável porque proporciona a cedência prematura do reforço de uma estrutura. Segundo Triantafillou et al. (1991), este processo pode ser desencadeado por propagação acentuada de fendas na interface, por movimentos verticais e horizontais associados a uma fenda de corte no betão e por delaminação do betão ao corte na espessura de recobrimento da armadura de aço. Os autores deduzem, também, que no primeiro caso a fendilhação na interface pode dever-se a imperfeições na aplicação e espalhamento do adesivo, à existência de fendilhação de flexão no betão no acto da colagem, ao destacamento parcial do CFRP quando a face traccionada do betão não é perfeitamente plana e, ainda, a efeitos de fadiga.

## RUÍNAS DE BASE



## RUÍNAS PREMATURAS

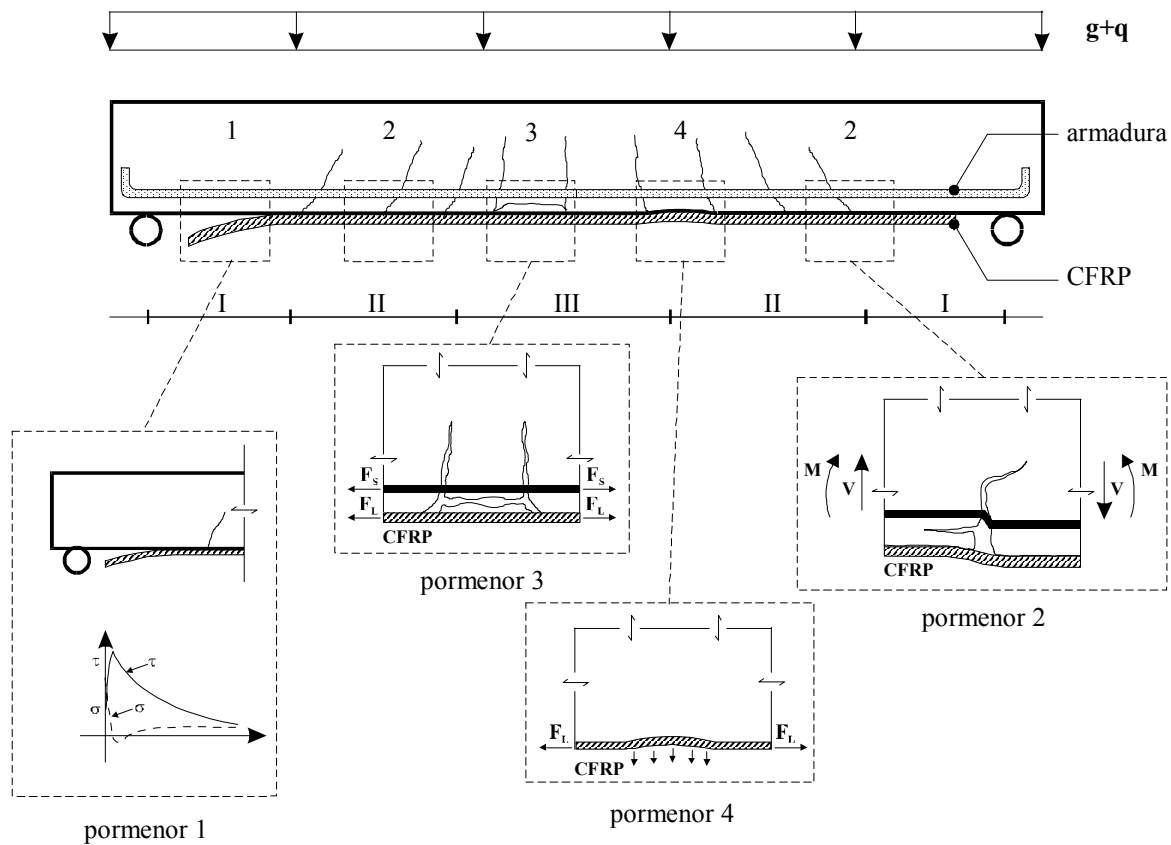


Figura 2.21 - Resumo dos modos de ruína principais.

Assim, pode concluir-se que o destacamento prematuro do CFRP ("peeling") assume formas diferentes, conforme a sua localização, e que se expõem no alçado da viga da Figura 2.21 (inspirado em Blaschko et al., 1998):

- (1) - destacamento do compósito na zona de ancoragem sem fendilhação no betão, resultado da interacção das tensões de corte e tensões normais de tracção (*pormenor 1* e Figura 2.20):
- (2) - destacamento do compósito na zona com fendilhação de flexão e de corte devidos a movimentos verticais e horizontais das secções (*pormenores 2 e 4-caso [2]* da Figura 2.17), situação designada por "shear peeling" (Zhang et al., 1995);
- (3) - destacamento do compósito e possível arrancamento do betão adjacente à ligação, provocado pela abertura significativa das fendas de flexão na zona de momentos flectores máximos (*pormenores 3 e 4-caso [3]* da Figura 2.17);
- (4) - destacamento do compósito causado por irregularidades pontuais na superfície do betão, principalmente, se esta ocorrer na secção mais traccionada do laminado (*pormenores 4 e o observado no 4-caso [1]* da Figura 2.17).

Cada um destes tipos, que compõe o grupo de ruínas prematuras (*modo (iii)*), pode iniciar o destacamento total do laminado segundo mecanismos de delaminação teoricamente possíveis em seis locais de propagação de fendas (Büyükoztürk et al., 1997), isto é, delaminação do betão ao nível da armadura, corte do betão na espessura de recobrimento e as ruínas ilustrados na Figura 2.17 com os *modos n° 5, n° 7, n° 8 e n° 9*. Como a resistência à tracção dos adesivos usados (resinas de epóxido) é, geralmente, superior à do betão, a ruína surge quase sempre por corte do betão na camada adjacente à ligação betão-compósito ou na camada próxima da armadura de tracção.

Os factos apresentados até este momento reportam-se, praticamente, a casos correntes de reforços à flexão de elementos de viga de betão armado. Quando este reforço é executado em lajes, onde os esforços transversos têm pouco significado, permite-se eliminar do cenário geral dos modos de ruína os derivados da fendilhação de corte no betão.

Na finalização deste ponto, alerta-se para o facto de os casos gerais dos modos de ruína aqui relatados referirem-se a estruturas reforçadas à flexão, sem presença adicional de elementos exteriores de restrição dos fenómenos de destacamento do reforço, nomeadamente, sistemas de constrição das extremidades (ancoragens de fixação) ou sistemas adicionais de reforço ao corte (com ou sem envolvimento da chapa de reforço à flexão) (Consultar Tabela 2.2).

Na conjugação dos dois casos, a técnica de colagem com sistemas compósitos de FRP encontra-se pouco esclarecida pela literatura internacional, devido ao número reduzido de trabalhos conclusivos publicados até ao momento e à dificuldade de definição de um sistema exequível para as situações concretas da construção civil. Nesta fase, torna-se difícil definir os modos de ruína adicionais aos já descritos. Contudo, devem ser destacados trabalhos como os de Rostásy et al. (1996; 1997-a), Poulsen et al. (1997-a) e de Neubauer (1998), indicando alguns critérios para fixação das zonas de ancoragem, como também, as contribuições de Al-Sulaimani et al. (1994), Chaallal et al. (1997), De Souza (1998) e os recentes artigos publicados no encontro FRPRCS-3 (1997) sobre situações de reforço à flexão e ao corte de vigas por adição de sistemas laminados ou sistemas flexíveis (manta unidirecional ou tecido). Constata-se que os modos de ruína, nos casos de reforços ao corte, variam com o tipo de FRP (laminado, manta ou tecido), com a disposição nas faces (orientação das fibras, largura e afastamento entre faixas de FRP coladas) e com o critério de ancoragem das extremidades dos FRP utilizados. Um cenário possível para estes modos de ruína é o exemplo apresentado recentemente no trabalho de Taerwe et al. (1997), sobre o comportamento de vigas reforçadas ao corte por adição de mantas de CFRP do tipo Replark. Na Figura 2.22 expõe-se o esquema de reforço das vigas ensaiadas e os respectivos modos de ruína observados com base na formação de uma fenda de corte de colapso.

### **2.3.3 - Ligação entre o betão, o adesivo e o compósito**

Qualquer publicação sobre reforço ou reabilitação de estruturas de betão, através da técnica de colagem de armaduras exteriores, atribui especial atenção à zona de interface de ligação dos materiais betão-adesivo-armadura exterior. O caso das armaduras de material compósito FRP não difere substancialmente das situações estudadas anteriormente para as armaduras metálicas. A compatibilidade de deformações entre os materiais é a coluna dorsal do comportamento de uma ligação e a responsável pelo estabelecimento do critério de reforço de estruturas (aumentos de resistência, de rigidez e de ductilidade).

Pelo que foi exposto no item anterior conclui-se, também, que é na zona da junta betão-adesivo-compósito que podem surgir os denominados modos de ruína prematuros, apesar de indesejados. Estes modos precipitam o colapso da estrutura através do insucesso do reforço de modo frágil e sem pré-aviso, como referiram Büyüköztürk et al. (1997).

**VIGAS REFORÇADAS AO CORTE COM MANTAS UNIDIRECCIONAIS DE CFRP**

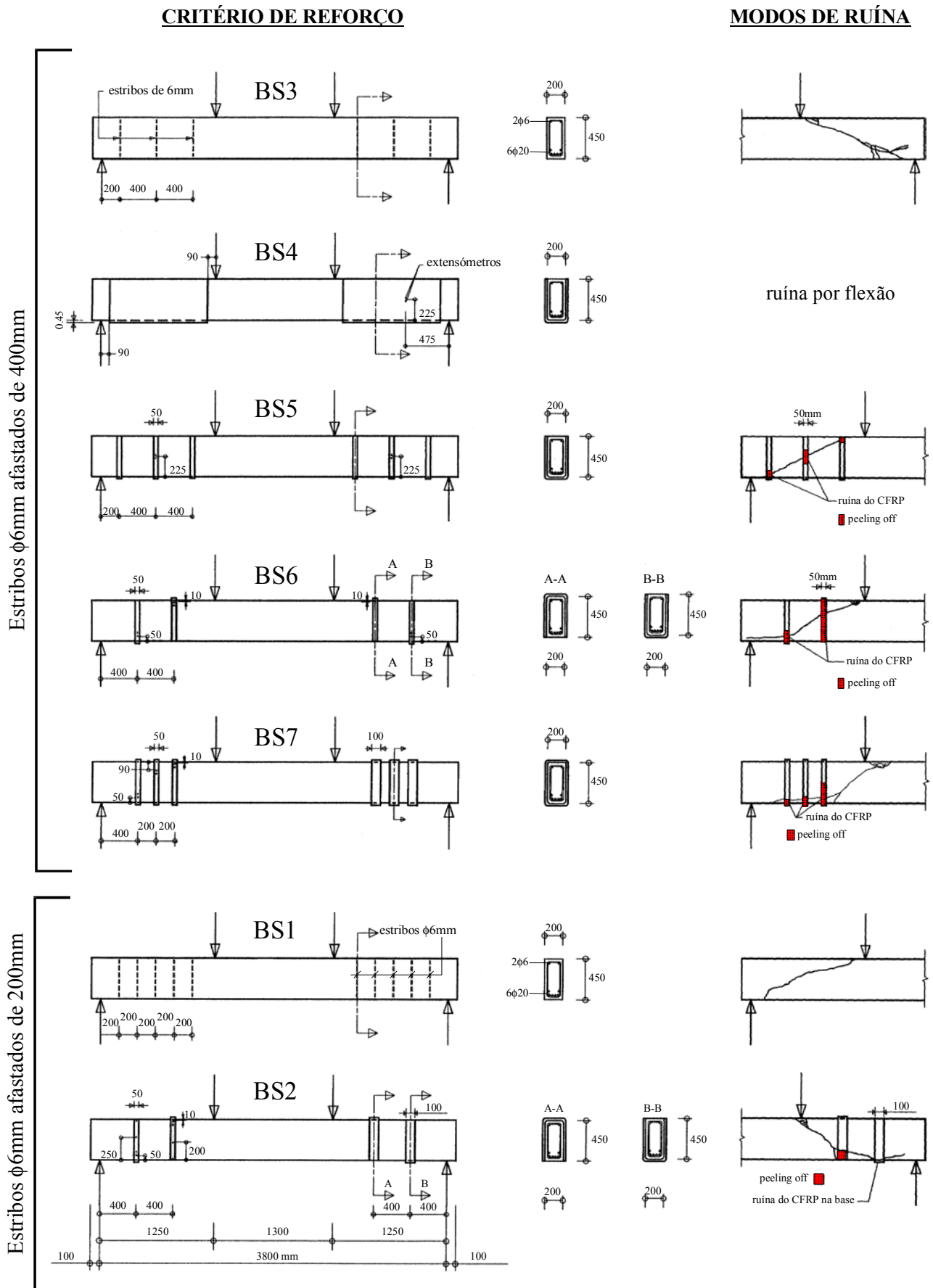


Figura 2.22 - Modelos de viga reforçados ao corte e respectivos modos de ruína (Taerwe et al., 1997).

Os parâmetros intervenientes nos mecanismos que decorrem nesta zona têm sido objecto de algumas investigações realizadas até à data, embora as conclusões não sejam suficientemente claras quanto ao estabelecimento de uma lei de comportamento e de critérios de resistência da aderência para a interface de ligação.

Apesar de existirem algumas propostas numéricas e analíticas de estimativa do comportamento na interface, a generalidade dos autores considera ser indispensável a realização de ensaios experimentais de aderência para se entender melhor os parâmetros intervenientes no mecanismo de transferência de esforços entre os materiais envolvidos no reforço.

Nesta perspectiva, ao longo desta secção procura-se resumir as contribuições experimentais de vários autores de modo a esclarecer sobre o comportamento geral, a aderência e a zona de ancoragem relativamente à interface betão-adesivo-compósito.

### 2.3.3.1 - Comportamento geral

Para que se possa investir em critérios de prevenção e eliminação dos mecanismos de ruína prematuros, localizados na interface de colagem, torna-se inquestionável conhecer melhor o que se passa ao nível do comportamento geral nesta zona. É a partir de três princípios básicos que se projecta e executa um reforço à flexão de uma secção pela técnica da colagem de armaduras metálicas ou compósitos de FRP (Juvandes et al., 1996-a):

- i) é válido o *princípio da compatibilidade de deformações* entre os materiais, isto é, admite-se que os materiais estão perfeitamente solidarizados entre si;
- ii) verifica-se o *princípio de Navier-Bernoulli*, onde as secções planas se mantêm planas depois de deformadas;
- iii) em qualquer instante, é satisfeito o *princípio do equilíbrio* entre forças na secção.

Admitindo estes factos e o conhecimento das leis constitutivas dos materiais e dos critérios de cedência, é possível prever o comportamento de uma estrutura reforçada (D0144, 1997).

### **Esforços**

Nestas circunstâncias, os esforços envolvidos em cada secção e ao nível da junta de colagem resultam da necessidade de transferir as forças de tracção, mobilizadas na armadura externa para o

elemento de betão, através da camada de adesivo usada nessa colagem. Assim, na região entre o laminado e a camada superficial do betão manifestam-se os esforços seguintes:

- i) *esforço de tracção*, na armadura de reforço do tipo chapa de aço ou da forma laminado, manta ou tecido de CFRP;
- ii) *esforços de corte (razantes)*, na espessura dessa região devidos à variação do momento flector entre secções; ao agravamento local do esforço pela formação de fendas no betão (flexão e corte) junto à interface (Deuring, 1993); à descontinuidade localizada na extremidade do reforço, com a conseqüente necessidade de transferência do esforço de ancoragem da armadura para o betão;
- iii) *esforços de tracção de destacamento do reforço*, também designados na literatura internacional por forças de "peeling" ou "peeling-off", manifestados em casos específicos como a zona de amarração do reforço devidos aos efeitos de interrupção e de excentricidade axial do laminado em relação à superfície de betão; os traçados curvos e as zonas de imperfeição da superfície do betão porque instalam forças de desvio no laminado (Meier, 1997-b); as zonas localizadas em fendas de corte devidos a escorregamentos diferenciais no betão.

A distribuição destes esforços ao longo do comprimento da ligação e para cada etapa de carregamento da estrutura, tem sido quase sempre estabelecida teoricamente nos trabalhos de investigação a partir dos princípios já citados. Por exemplo, um desses métodos aplica a "analogia da treliça" para interpretar os esforços numa viga, método este preconizado na Alemanha por autores como Rostásy et al. (1996) e na Suíça pelo documento D0144 (1997). Contudo, a prática tem demonstrado que outros fenómenos intersectam parcialmente esta distribuição, conduzindo a mecanismos localizados de rotura precoce, descritos para a região estabelecida na interface betão-adesivo-compósito. Entretanto, sempre que possível, o equilíbrio é restabelecido para o conjunto da ligação através de nova redistribuição de esforços, com a contribuição das zonas da junta não deterioradas. Nesta altura, a exigência do princípio de compatibilidade de deformação entre materiais na secção de betão armado só é satisfeita em termos médios. Uma vez surgida uma fenda, de imediato se instala um acréscimo local de tensão nas armaduras (interna e externa) e o betão passa a colaborar só entre fendas (incluindo a junta). Este processo vai sucedendo progressivamente até que, sem pré-aviso, pode surgir o colapso brusco do sistema de reforço, segundo um dos seis modos teoricamente definidos por Büyüköztürk et al. (1997) (consultar item 2.3.2). Em resumo, as previsões teóricas para a evolução dos esforços acabam por ser aproximações grosseiras da realidade, uma vez



que, para além da não linearidade do comportamento, não contemplam estes mecanismos pontuais que, inúmeras vezes, ditam o estado limite último das estruturas reforçadas. Deste modo, conclui-se que estas lacunas só podem ser diminuídas mediante o acompanhamento com ensaios experimentais de modelos, executados em condições semelhantes às propostas num caso concreto de reforço ou reabilitação.

A avaliação experimental do comportamento da interface betão-adesivo-compósito consiste num tema de debate nos principais centros de investigação. Em termos globais, os autores recorrem a ensaios reduzidos de corte (com junta simples ou dupla) e a ensaios de flexão de vigas reforçadas, para identificarem e entenderem os diversos mecanismos intrínsecos da interface (próximo ponto 2.3.3.2). Através destes testes, estabelecem-se as leis de distribuição dos esforços a diferentes níveis de solitação, avaliam-se a resistência e a rigidez da estrutura (em serviço e em estado limite último) e, não menos importante, caracteriza-se uma lei para o comportamento geral da junta a partir das deformações observadas no laminado (FRPRCS-3, 1997).

### **Lei de comportamento**

A lei de comportamento numa interface tipo betão-adesivo-compósito, também designada por lei constitutiva ou lei de aderência da junta, estabelece-se quase sempre com base na relação local entre *tensão de corte* (aderência) vs *escorregamento da junta* (deslocamento relativo entre a chapa e a superfície do betão,  $\tau = f(s)$ , ou entre *tensão de corte* vs *distorção da junta*,  $\tau = f(\gamma)$ .

Só recentemente este tema tem vindo a ser investigado e portanto as referências são poucas. Aproveitando as leis estabelecidas para chapas metálicas, alguns autores procuram ajustá-las a modelos simples aplicáveis em análises numéricas, como as leis discriminadas na Figura 2.23. Admitem-se casos com ou sem a contribuição da resistência à tracção da junta entre fendas, expresso no primeiro caso por curvas com ramo descendente suave (efeito de "tension softening"). Inicialmente, estas leis eram calibradas (aderência e escorregamento limites) recorrendo à teoria linear elástica dos materiais (referências em Täljsten, 1994) e, recentemente, recrutando a aproximação à teoria da mecânica da fractura (Täljsten, 1994; Holzenkämpfer, 1994; Neubauer et al., 1997; JCI TC952, 1998; Costeira Silva, 1999; Brosens et al., 1999).

Um grupo de investigadores demonstrou por via experimental que a lei geral da relação tensão de aderência vs escorregamento, definida no Modelo Código 90 (CEB-FIP, 1993) para o caso de um varão de aço embebido no betão (Figura 2.23), pode ser ajustado ao comportamento das interfaces tipo betão-adesivo-chapas de aço (Wicke e Pichler e ainda Ammann (1995)) e tipo betão-adesivo-laminados de CFRP (Nsambu, 1997). Este critério foi também estabelecido na lei

constitutiva da junta que Costeira Silva (1999) integrou no modelo numérico de previsão do comportamento de vigas de betão reforçadas por colagem de armaduras exteriores, onde se concluiu existir boa aproximação entre comportamentos previsto e observado quando simulados os ensaios realizados na FEUP por Juvandes et al. (1998-a).

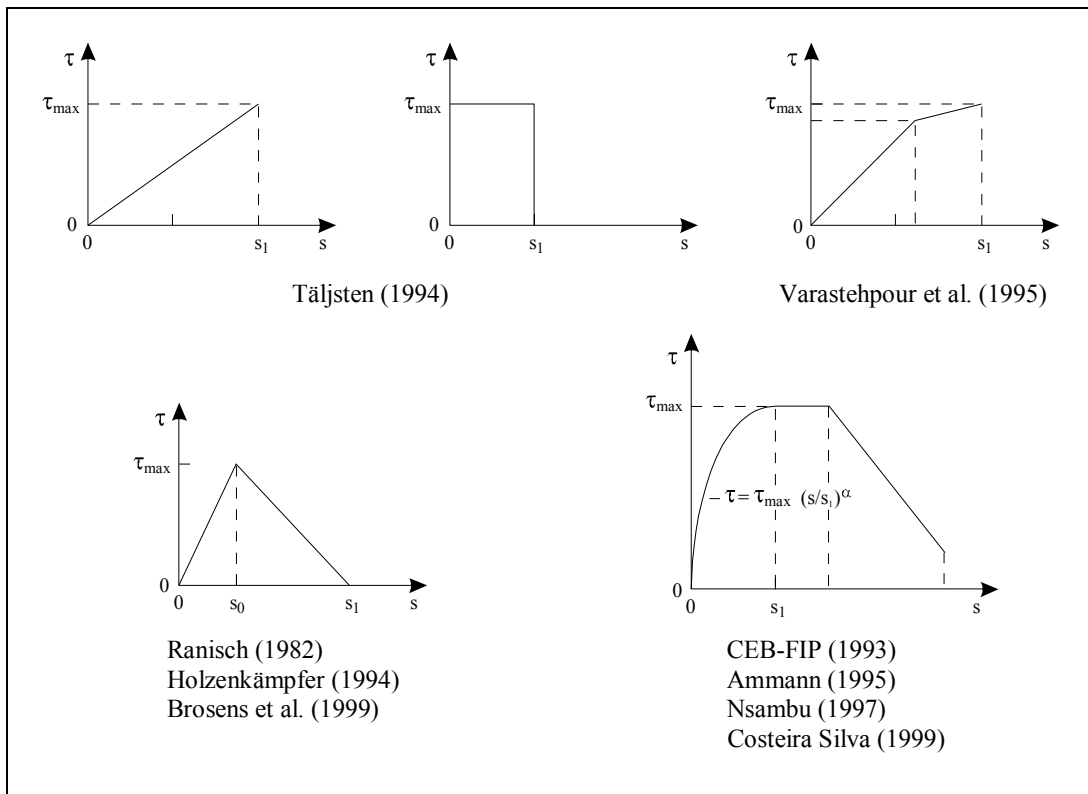


Figura 2.23 - Algumas formas da relação  $\tau = f(s)$  segundo vários autores.

### **Aspectos condicionantes**

A experiência acumulada ao longo desta última década, evidencia alguns parâmetros que condicionam o ajuste local dos modelos de comportamento teóricos (lei de aderência) aos casos práticos de execução e que justificam, igualmente, as principais ruínas prematuras. Na perspectiva de que está em causa sobretudo o reforço ou a reabilitação de estruturas existentes, mais problemáticas do que se passa com estruturas novas, os *principais condicionantes* da ligação colada em jogo podem dividir-se nos aspectos seguintes:

#### *(i) - Estado inicial do betão*

Aspectos iniciais da estrutura, como a classe do betão, o estado de deterioração, o nível de corrosão das armaduras internas e o padrão de fendilhação à superfície do betão na zona adjacente à execução da junta de colagem, podem condicionar o sistema de reforço. A superfície do betão deve

apresentar a maior resistência possível à tracção directa e ao corte, de modo a permitir a máxima transferência de forças entre si e o compósito. Nestes termos, o valor mínimo da tensão de aderência média do betão no ensaio de arrancamento por tracção (ensaio de "pull-off", item 2.3.3.2) é de  $1.4 \text{ MPa}$ , segundo o ACI 440F (1999), e de  $1.5 \text{ MPa}$ , propostos pelo CEB (CEB-GTG 21, 1990), por Meier (1997-b) e pelas homologações Nr. Z-36.12-29 (1997) e Nr. Z-36.12-54 (1998) do DIBt.

*(ii) - Preparação da superfície*

O controlo da rugosidade, da humidade, da temperatura e do padrão inicial de fendilhação da superfície a reforçar origina um critério para o despiste das ruínas por descolamentos na superfície de contacto betão-adesivo. Testes realizados sobre colagens de armaduras a superfícies de betão simplesmente escovadas, tratadas com um esmeril, picadas com um martelo de agulhas e limpas com jactos de água ou de areia apresentaram resultados diferentes de resistência à tensão de aderência (Chajes et al., 1996; Juvandes et al., 1998-b).

Como exemplo, recomenda-se o tratamento de superfícies de betão através da passagem de um esmeril para casos de colagem com sistemas flexíveis de FRP (mantas e tecidos) e a limpeza com jacto de areia ou a passagem de um martelo de agulhas no caso de reforços com laminados semi-rígidos de FRP.

*(iii) - Importância do adesivo ou resina de saturação*

O tipo, a espessura e o controlo de deficiências de espalhamento do sistema adesivo (formação de vazios) têm sido referidos por vários autores como parâmetros a reter, quanto ao controlo do comportamento na interface betão-adesivo-compósito de FRP (Saadatmanesh et al., 1990; Ritchie et al., 1991; Tu et al., 1996). Um adesivo deve ajustar-se às circunstâncias que envolve cada caso prático de reforço, através da selecção de um material com resistência à tracção e ao corte superiores ao da camada de base e capaz de diminuir as hipóteses de uma rotura frágil. Deste modo, transfere-se a condição de resistência da junta para a capacidade ao corte do betão, por ser este normalmente o material mais débil.

*(iv) - Padrão de fendilhação*

Para além das fendas iniciais, a propagação de novas fendas (flexão e corte) nas estruturas de betão armado, como consequência da natureza e intensidade de solicitação, podem originar o destacamento do FRP ou a delaminação por corte no betão adjacente à junta.

A colaboração do betão entre fendas da zona traccionada origina localmente um acréscimo das tensões de corte no adesivo. O conseqüente destacamento surge de seguida nesta zona, constatando-se que é especialmente crítico quando o elemento não está pré-fendilhado e as novas fendas ocorrem depois do reforço. Este fenómeno foi estudado por Holzenkämpfer (1994), através de ensaios uniaxiais de tracção.

Nesse sentido, é importante atrasar este efeito, propondo Rostásy et al., (1996) que se condicione a relação entre as armaduras de reforço e a interna a um valor mínimo, que se limite o destacamento para depois da cedência da armadura de aço e que se restrinja a extensão última do laminado adicionado.

Segundo Meier (1997-b), deve limitar-se a formação das fendas de corte, na medida em que são as principais responsáveis pela degradação da resistência de uma junta, que conduzem aos mecanismos de ruína antecipados mencionados. Por outro lado, a experiência do EMPA neste domínio permite concluir que as fendas de flexão são absorvidas pelo laminado, sem haver degradação da capacidade última na interface, graças a um pequeno alívio na ligação junto à fenda. A hipótese de concentração de tensões no laminado devido à abertura de uma fenda é teórica, porque só ocorrerá numa junta perfeitamente aderente (*ligação perfeita* - Figura 2.24-a). Com efeito, verifica-se que nessa zona há uma ramificação da fenda pelo betão junto ao contacto betão-adesivo, ou pela espessura do adesivo, suavizando o pico de tensão no laminado (*ligação real* - Figura 2.24-b).

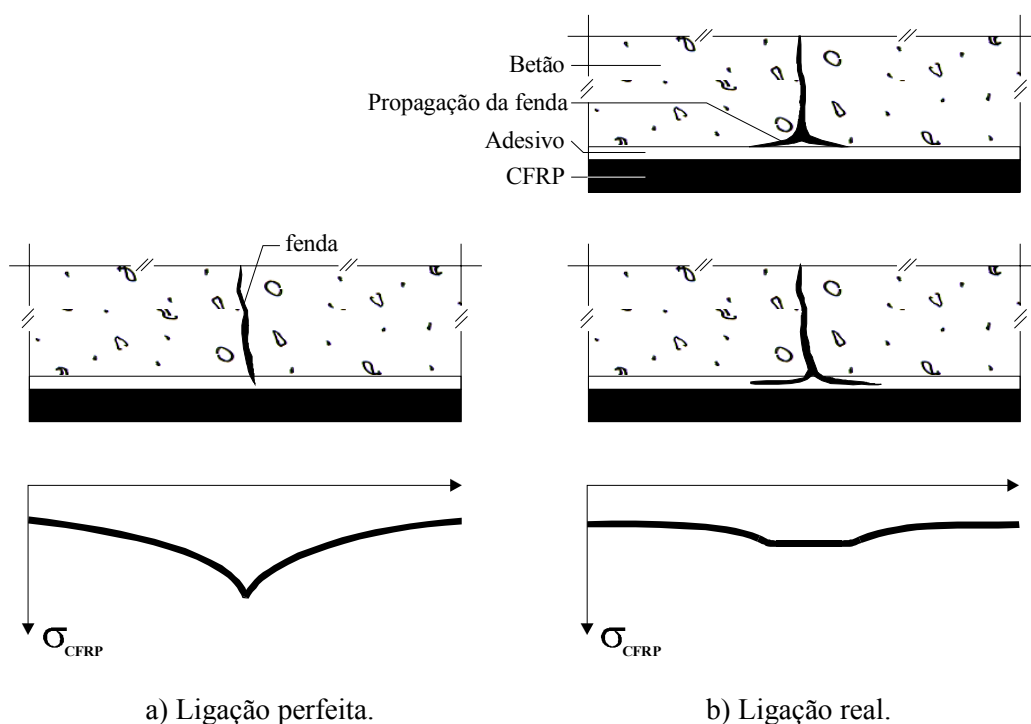


Figura 2.24- Esquema de propagação de uma fenda de flexão na interface betão-adesivo-CFRP (Meier, 1997-b).

Para atender a este aspecto, Deuring (1993) sugere o cálculo de tensões médias a partir das extensões no laminado de CFRP e corrigidos pelo coeficiente de aderência de  $K_L = 0.65$  a  $0.80$ .

(v) - *Armadura de reforço*

As regras de aplicação do sistema semi-rígido pré-fabricado (o laminado) ou do sistema flexível de cura "in situ" (as mantas ou os tecidos) são diferentes entre si (Juvandes et al., 1998-b). Como tal, os procedimentos estabelecidos nas especificações técnicas dos fornecedores devem ser rigorosamente cumpridos para evitar deficiências na aderência ou na polimerização do compósito. No segundo sistema, apesar de permitir a adição de várias camadas de mantas com fibras unidireccionais, não são reconhecidas vantagens significativas a partir de dez camadas coladas sucessivamente (JCI TC952, 1998).

De modo a prevenir o destacamento do laminado do betão junto às fendas e para se evitar que a armadura interna plastifique em serviço, Neubauer et al., (1997) e Rostásy (1997-a; 1998) propõem limitar a extensão máxima no laminado. A partir de ensaios de flexão e testes uniaxiais de tracção com laminados de CFRP colados a elementos de betão e, também, através de considerações teóricas é possível estabelecer as seguintes recomendações:

$$\begin{cases} \varepsilon_{Lud} \leq 5\varepsilon_{sy} \\ \varepsilon_{Lud} \leq \varepsilon_{Luk} / 2 \end{cases} \quad [\text{Eq-2.1}]$$

com,

$\varepsilon_{sy}$  - extensão de cedência do aço (armadura interna);

$\varepsilon_{Lud}$  - extensão última de cálculo do laminado admitida no dimensionamento à flexão;

$\varepsilon_{Luk}$  - extensão de ruína do laminado CFRP à tracção.

Tomando-se o menor dos valores, os autores verificam que o destacamento do compósito em serviço não é determinante, tendo-se em linha de conta a rotura brusca do mesmo.

(vi) - *O efeito de extremidade*

A secção de interrupção de um reforço cria, por si, uma descontinuidade estrutural que envolve alguns mecanismos desfavoráveis de transferência de esforços na junta (concentração de tensões de tracção e corte), abrangendo certa região designada por zona de ancoragem. A generalidade dos trabalhos publicados sobre esta matéria concluem que a referida zona deve merecer especial atenção. Desse modo, justifica-se até hoje o aparecimento de algumas teorias que tentam explicar este efeito

de extremidade, propondo expressões para a determinação da força máxima e do comprimento efectivo de amarração (ou ancoragem) da armadura de reforço (Roberts et al., 1989; Ranisch, 1982; Täljsten, 1994; Holzenkämpfer, 1994). Este assunto será esclarecido com mais pormenor no ponto 2.3.3.3.

### **Mecanismos de fixação externos**

A experiência com o comportamento de vigas de betão, reforçadas à flexão por adição de chapas metálicas, aponta a conveniência do uso de mecanismos de ancoragem mecânica das chapas, de modo a prevenir o fenómeno de destacamento frágil da extremidade e, simultaneamente, incrementar a ductilidade e otimizar a capacidade última da viga (Van Gemert, 1981; Jones et al., 1988; Appleton et al., 1995; Gomes et al., 1998). Esta conclusão é, também, compartilhada por autores de trabalhos recentes sobre investigação com sistemas compósitos de CFRP (laminados, mantas e tecidos) (Rostásy et al., 1996 e 1997-b; Taerwe et al., 1997).

Os resultados observados nos ensaios realizados por estes autores indicam que a adição de sistemas de fixação dos laminados traccionados, de preferência ao longo de todo o comprimento da junta, criam forças de compressão transversais à ligação com efeitos benéficos, frente aos mecanismos de delaminação e de "peeling", que se vão formando na interface durante a solicitação da estrutura (Figura 2.25).

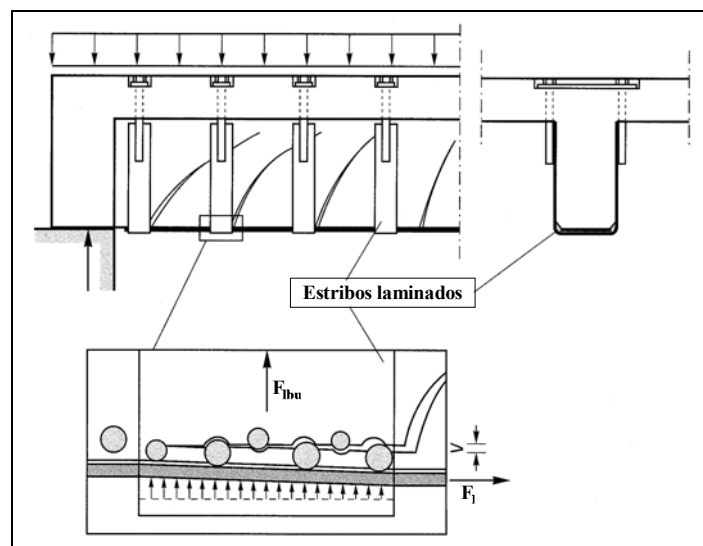


Figura 2.25 - Esquema de prevenção do colapso numa ligação por adição de estribos planos (Rostásy et al., 1997-b).

A opinião dos autores divide-se quanto à *extensão* e à *forma* como estes sistemas se devem executar. Quanto à *extensão* e *localização*, a maior parte dos trabalhos indica que este incida sobre a

zona de ancoragem do CFRP, porque evita o destacamento final do reforço, que consiste no modo de ruína mais comum nestes casos, sobretudo com laminados pré-fabricados. Contudo, na opinião de outros investigadores, além da zona de ancoragem, os mecanismos de fixação exterior devem estender-se ao longo do comprimento da junta de colagem, visto que há várias secções possíveis para antecipação da ruína, como se ilustrou na Figura 2.21. A esta vantagem, acresce-se a hipótese de se admitir uma implementação da ductilidade, da resistência ao esforço transversal e do comportamento ao fogo das estruturas nestas condições.

Quanto à *forma*, os sistemas de ancoragem mecânicos são reduzidos e muito díspares, realçando-se os sistemas metálicos "standard" e alguns sistemas de material compósito em fase embrionária. Por exemplo, na Alemanha, os documentos recentes de homologação dos laminados pré-fabricados de CFRP (Homologação Nr. Z-36.12-29, 1997; Homologação Nr. Z-36.12-54, 1998) e os estudos do iBMB (Holzenkämpfer, 1994; Rostásy et al., 1997-b; Neubauer, 1998) sugerem ancoragens com sistemas metálicos "standard" já comprovados, com a forma ilustrada na Figura 2.26 (duas sugestões possíveis). Nos outros casos, em princípio de estudo, geralmente utilizam-se mantas ou tecidos de GFRP ou CFRP, envolve-se as faces inferior (com a armadura de reforço à flexão) e laterais da viga, encastrando-se depois o sistema na zona mais comprimida do betão (Figura 2.16, Figura 2.22 e Tabela 2.2).

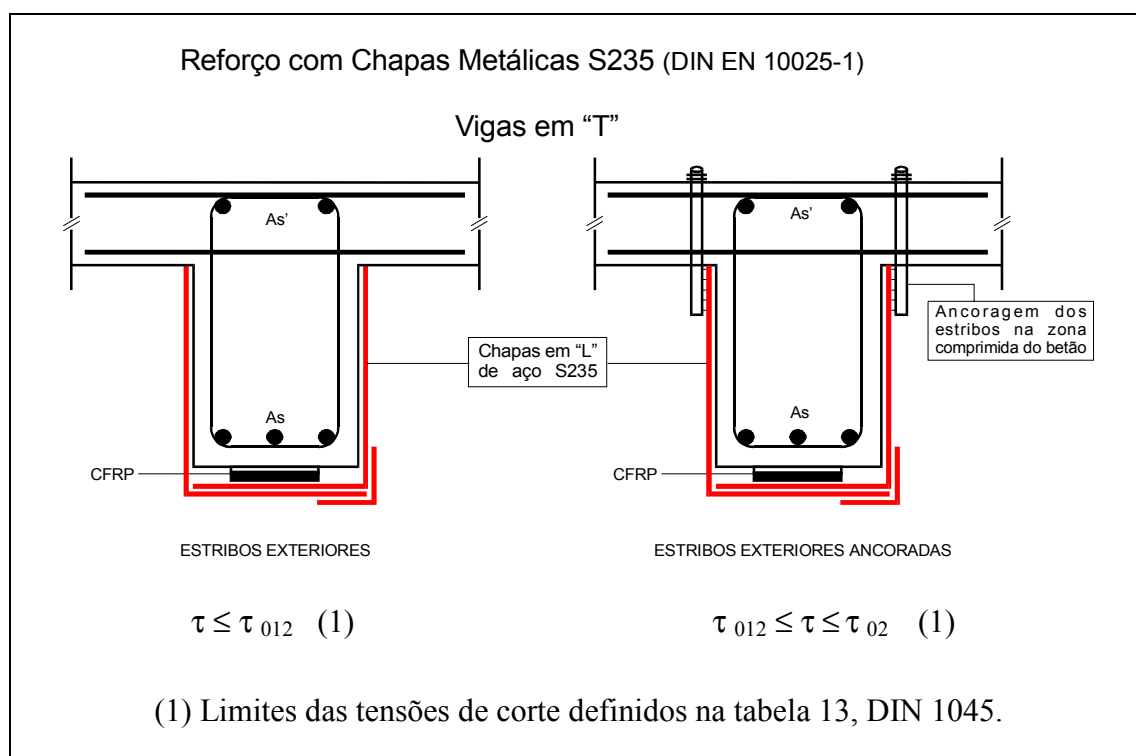


Figura 2.26 - Reforço ao corte proposto pelo DIBt (Homologações Nr. Z-36.12-29 e Nr. Z-36.12-54).

### 2.3.3.2 - Aderência da ligação

A resistência de uma ligação colada é ditada pelo valor máximo da aderência entre os materiais envolvidos na ligação. Concretamente, na interface betão-adesivo-compósito e atendendo aos modos de ruína teoricamente possíveis (item 2.3.2), o problema surge ao nível da comparação dos valores das resistências ao corte e à tracção na camada superficial do betão, da resistência coesiva do adesivo e da resistência interlaminar do compósito. Dos três casos, o condicionante será o que apresentar menor valor, adiantando-se que nos casos correntes observados o betão tem sido o principal responsável.

A determinação do valor da resistência à aderência é indispensável para a compreensão dos mecanismos de transmissão de esforços na junta e de, nestas condições, permitir estabelecer modelos de interpretação de um reforço. Assim, duas questões se podem introduzir:

1ª - *Como determinar a aderência?*

2ª - *Qual o valor da resistência a adoptar nas situações comuns de reforço com compósitos de CFRP?*

Admitindo que não estão em causa os parâmetros condicionantes de uma junta, estabelecidas no item 2.3.3.1, a resposta a estas questões depende ainda de variáveis como a classe de betão e o comprimento da junta utilizados, o tipo de ensaios seleccionados e o critério de cedência estabelecido para tratamento dos resultados medidos nos testes.

Em relação à *primeira questão*, vários investigadores concluíram que a melhor forma para a determinar é recorrer a modelos de aderência experimentais, embora a literatura não refira nenhum caso especial a adoptar. Actualmente, o critério tem sido ajustar os modelos usados em trabalhos de aderência de juntas betão-adesivo-aço às condições de uso dos materiais compósitos de FRP (laminados, mantas ou tecidos). Assim, podemos distinguir dois grupos principais de ensaios função do local indicado para a sua realização: *ensaios em laboratório* e *ensaios "in situ"*. Cada um deles integra modelos de aderência que se classificam pela natureza da acção principal do ensaio, isto é, segundo *ensaios de corte*, *ensaios de flexão* ou *ensaios directos de tracção e de torção (ensaios de arrancamento)*. Particularmente, os ensaios de corte podem realizar-se com modelos de *junta simples* ou de *junta dupla*, sendo nestes últimos estabelecidos dois casos:

- i) *Provetes tracção-tracção*, isto é, quando as chapas metálicas ou de FRP e os prismas de betão estão sujeitos a tensões de tracção;
- ii) *Provetes tracção-compressão*, ou seja, quando as chapas estão traccionadas e os prismas de betão ficam sob tensão de compressão.



Segundo esta perspectiva, na Tabela 2.7 (duas páginas) resume-se e ilustra-se os modelos de caracterização experimental da aderência, referidos nos trabalhos considerados mais importantes e publicados até à data. Para cada caso expõe-se, igualmente, as principais informações que foram obtidas pelos respectivos autores.

Do mesmo modo, a publicação do "Japan Concrete Institute" JCI TC952 (1998) distingue os modelos e métodos utilizados no Japão para caracterizar juntas betão-adesivo-FRP, realizadas com sistemas flexíveis e curados "in situ" do tipo manta ou tecido. Esses modelos são transcritos para este trabalho na Tabela 2.8. Nesta, observa-se a identificação de três modelos de base, definidos pelos ensaios de corte (junta simples ou dupla), ensaios de flexão e ensaios directos de tracção (arrancamento) já mencionados. Estão representados, igualmente, dois modelos de caracterização de juntas entre sobreposição de compósitos.

Uma das primeiras interpretações sobre a análise comparativa entre as três diferentes naturezas de testes (corte, flexão e arrancamento por tracção) é referida no trabalho de Horiguchi et al., (1997). Os autores comparam, nesses ensaios, a variação da resistência de juntas tipo betão-mantas de CFRP, construídas sobre prismas de betão de resistência à compressão compreendidos entre  $10\text{ MPa}$  a  $50\text{ MPa}$ . Os resultados estão traduzidos na Figura 2.27, deduzindo-se que os ensaios de arrancamento por tracção ("pull-off") e os de corte com junta dupla conduzem, respectivamente, a valores de aderência máxima e mínima da ligação. A resistência da ligação diminui consideravelmente com a redução da resistência do betão, caso corrente de betões em deterioração, sendo esse efeito mais sentido nos ensaios de arrancamento.

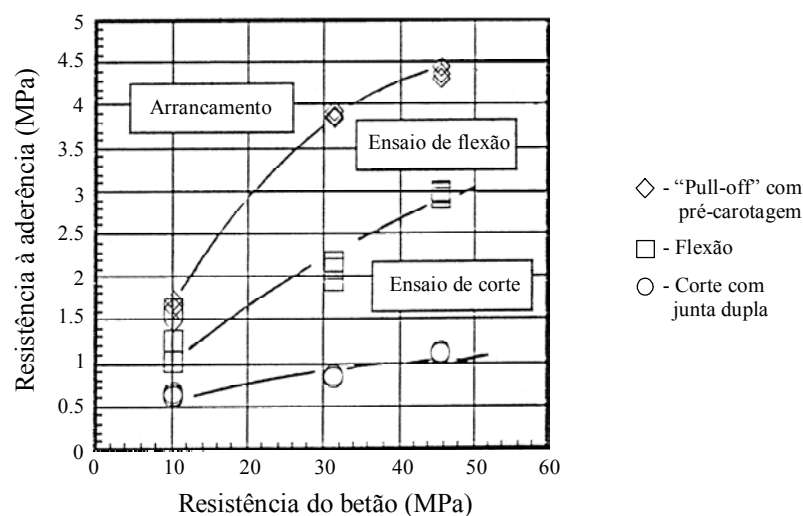


Figura 2.27 - Relação resistência de aderência vs resistência do betão medidos nos ensaios de corte, de flexão e de arrancamento por tracção (Horiguchi et al., 1997).

Tabela 2.7 - Ensaios de caracterização da interface.

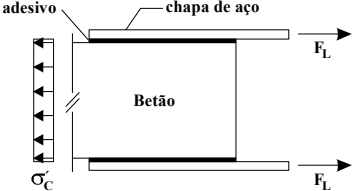
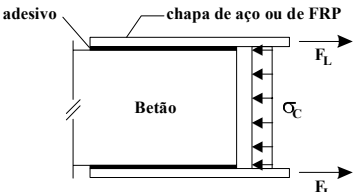
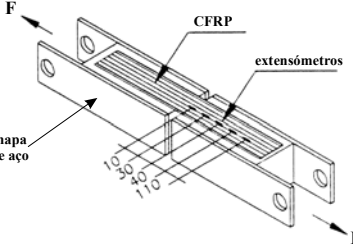
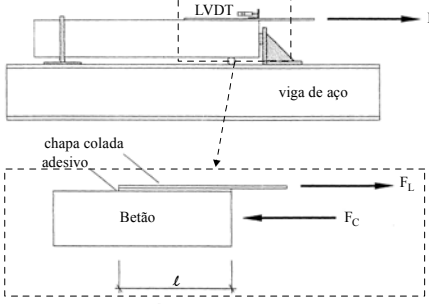
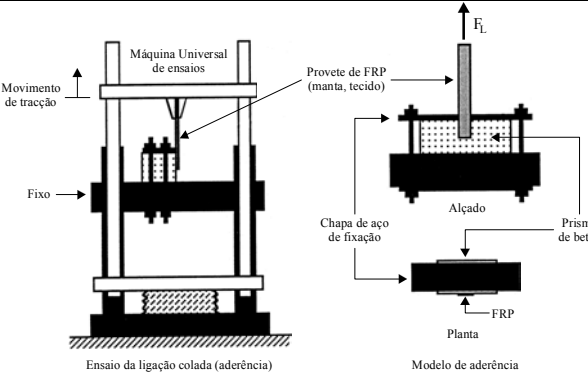
1 - ENSAIOS EM LABORATÓRIO			
Juntas	Modelos ensaiados - Autores	Informações	
1.1 - Modelos de Corte: Juntas Duplas	 <p><b>Tracção - Tracção</b></p>	<p>Destes ensaios é possível obter as informações seguintes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- força de ruína, <math>F_{Lmáx}</math>;</li> <li>- lei de distribuição dos esforços e deformações do FRP ao longo da junta;</li> <li>- lei constitutiva da junta em termos de força – deslocamento, <math>F=f(d)</math> ou aderência - escorregamento relativo da junta <math>\tau=f(s)</math>;</li> <li>- valor médio da aderência da junta.</li> </ul> <p>Alguns autores fizeram variar nos ensaios alguns parâmetros, nomeadamente o comprimento da junta de colagem. Neste caso foi possível obter-se:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- lei de variação do valor da força de ruína com esse comprimento;</li> <li>- o valor do comprimento efectivo da junta a partir do qual a força máxima de transferência é constante;</li> <li>- lei de variação da tensão média de corte (aderência) com o comprimento da junta realmente colada.</li> </ul>	
	 <p><b>Tracção - Compressão</b></p>		<p><b>Material:</b> laminados FRP, aço</p> <p><b>Trabalhos:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kaiser (1989)</li> <li>- Rodrigues (1993)</li> <li>- Holzenkämpfer (1994)</li> <li>- Rostásy (1996, 1997-a, 1998)</li> <li>- Neubauer et al. (1997)</li> <li>- Nsambu (1997)</li> </ul>
	 <p><b>Tracção - Tracção</b></p>		<p><b>Material:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- mantas de CFRP</li> <li>- chapas de aço</li> </ul> <p><b>Trabalho:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Van Gemert (1980)</li> <li>- Brosens et al. (1997, 1999)</li> </ul>
1.2 - Modelos de Corte: Juntas Simples	 <p><b>Tracção - Compressão</b></p>	<p><b>Material:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- chapas de aço</li> <li>- laminados CFRP</li> </ul> <p><b>Trabalho:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Täljsten (1994)</li> <li>- Poulsen et al. (1996)</li> <li>- Poulsen et al. (1997-a)</li> <li>- Ladner et al (1981)</li> </ul>	
	 <p><b>Tracção - Compressão</b></p>	<p><b>Material:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- laminados</li> <li>- mantas</li> <li>- tecidos</li> </ul> <p><b>Trabalho:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Chajes et al. (1995-b)</li> <li>- Chajes et al. (1996)</li> </ul>	

Tabela 2.7 - Ensaios de caracterização da interface (continuação).

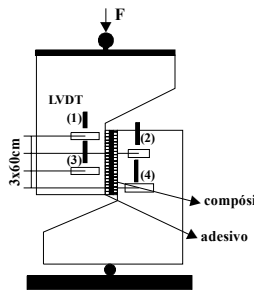
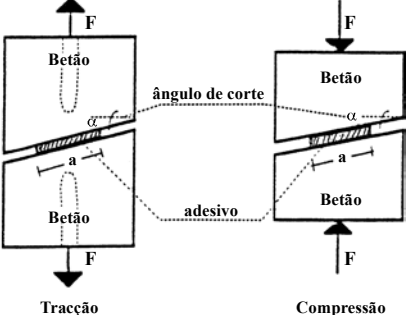
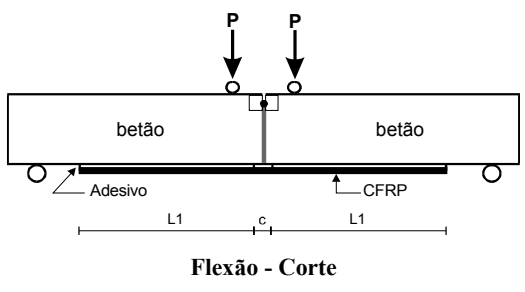
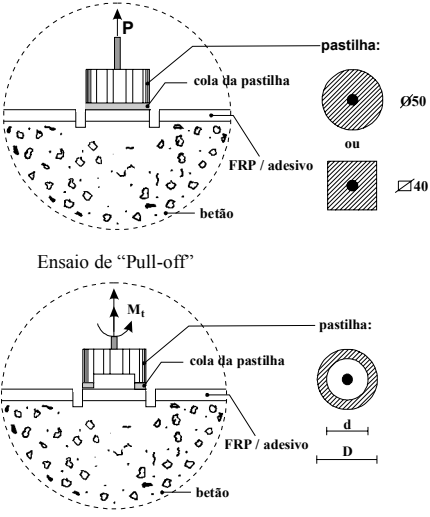
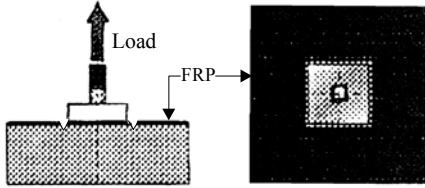
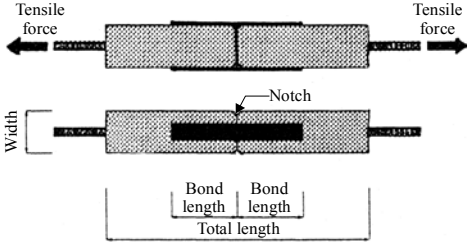
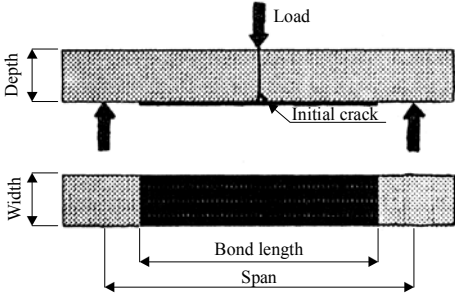
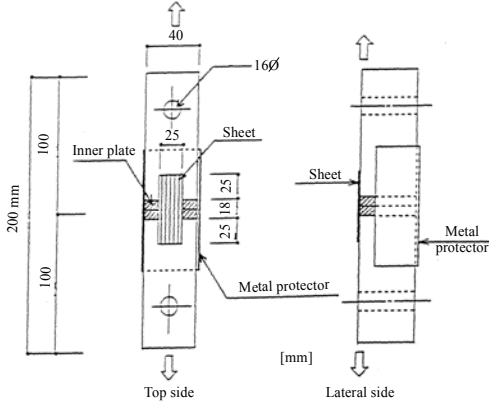
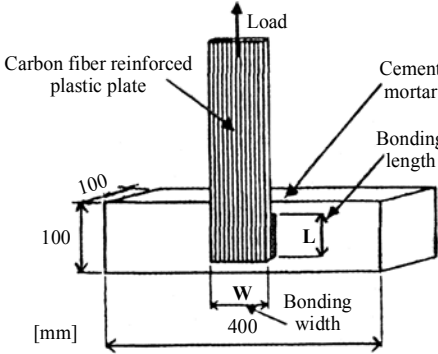
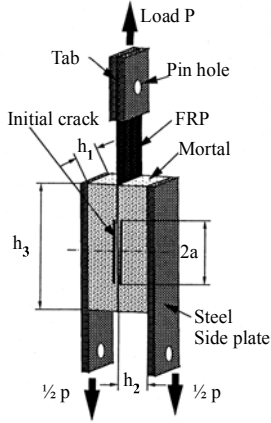
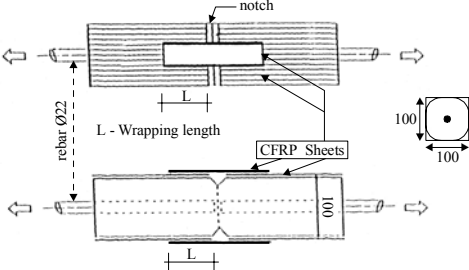
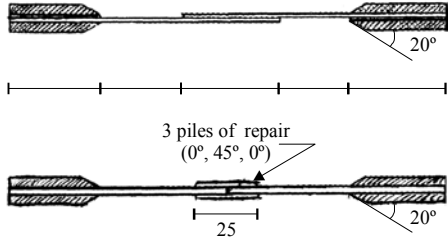
1 - ENSAIOS EM LABORATÓRIO (continuação)		
Juntas	Modelos ensaiados - Autores	Informações
1.2 - Modelos de Corte: Junta Simples	 <p style="text-align: center;"><b>Compressão - Corte</b></p> <p><b>Materiais:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- mantas FRP</li> </ul> <p><b>Trabalhos:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Hamelin et al. (1995).</li> <li>- Varastehpour et al. (1995, 1996)</li> <li>- Varastehpour et al. (1997)</li> </ul>	<p><b>Resultados:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- força de ruína, <math>F_{Lmáx}</math>;</li> <li>- tensão de aderência média <math>\tau_{med}</math>;</li> <li>- lei de comportamento tipo <math>F=f(\delta)</math>, <math>\tau=f(s)</math>, <math>\tau=f(\gamma)</math>;</li> <li>- valor da coesão para o critério de cedência de Mohr-Coulomb.</li> </ul>
	 <p style="text-align: center;"><b>Tracção - Corte</b> <b>Compressão - Corte</b></p> <p><b>Materiais:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- adesivo</li> </ul> <p><b>Trabalhos:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Arduini et al. (1997)</li> <li>- Poulsen et al. (1997-b)</li> </ul>	<p><b>Resultados:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- determina as tensões normal e tangencial de ruína (<math>\sigma, \tau</math>):</li> </ul> $\sigma = F \cos \alpha / (b \times a)$ $\tau = F \sin \alpha / (b \times a)$ <ul style="list-style-type: none"> <li>- possibilita a construção da envolvente de cedência de Mohr-Coulomb.</li> </ul>
1.3 - Modelos de Flexão	 <p style="text-align: center;"><b>Flexão - Corte</b></p> <p><b>Materiais:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- laminados, mantas</li> </ul> <p><b>Trabalhos:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Van Gemert (1980)</li> <li>- Horiguchi et al. (1997)</li> <li>- Juvandes et al. (1998-a)</li> </ul>	<p>Permite obter as mesmas informações descritas nos modelos de corte com junta dupla.</p>
2 - ENSAIOS "IN SITU"		
2.1 - Ensaios Directos	 <p><b>Materiais:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- adesivos</li> <li>- laminado FRP</li> <li>- manta FRP</li> </ul> <p><b>Trabalhos:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Van Gemert (1980)</li> <li>- Petersen et al. (1997)</li> <li>- Emmons et al. (1997)</li> <li>- Juvandes et al. (1998-a)</li> <li>- Juvandes et al. (1998-b)</li> </ul>	<p><b>Arrancamento por tracção:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- força máxima de extracção, P;</li> <li>- resistência à tracção na superfície do betão, <math>f_{ctm,p} = P / \text{Área da pastilha}</math>.</li> </ul> <p><b>Arrancamento por torção:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- momento torsor de ruína, <math>M_{tmax}</math>;</li> <li>- resistência ao corte na superfície do betão <math>\tau_{c max} = 16DM_{tmax} / \pi (D^4 - d^4)</math>.</li> <li>- <math>D = 75\text{mm}</math>, <math>d = 56\text{mm}</math></li> </ul> <p>Do conjunto (<math>f_{ctm,p}</math>, <math>\tau_{c max}</math>) é possível estabelecer a envolvente de cedência de Mohr-Coulomb.</p>

Tabela 2.8 - Ensaios de aderência ("Bond tests") (JCI TC952, 1998).

Juntas	Métodos de ensaio / Modelos	
Interface betão-compósito FRP [i]	 <p>a) Ensaio de aderência (perpendicular) entre o betão e mantas FRP (ensaio de "pull-off").</p>	 <p>b) Ensaio de tracção em prismas de betão com fenda central e mantas FRP coladas lateralmente (corte duplo).</p>
	 <p>c) Ensaio de flexão de prismas de betão com reforço na face traccionada.</p>	 <p>d) Ensaio de tracção de prismas de betão ligados numa face por uma manta FRP (corte simples).</p>
	 <p>e) Ensaio de tracção de um laminado colado na face lateral dum prisma de betão (corte simples).</p>	 <p>f) Ensaio de tracção de um provete "sandwich" formado por dois cubos de betão ligados por uma junta de FRP.</p>
Juntas entre compósitos de FRP [ii]	 <p>g) Idêntico ao caso (b) mas onde a junta de FRP é feita sobre uma primeira camada da manta FRP colada aos provetes de betão, previamente.</p>	 <p>h) Tracção directa sobre uma junta entre compósitos contínuos de FRP.</p>

Dos ensaios de corte constata-se que a tensão de tracção no laminado e a tensão de corte na interface não se distribuem uniformemente ao longo da junta de colagem. Antes do betão fendilhar, as tensões de corte têm um valor máximo junto à extremidade do compósito solicitado à tracção e estendem-se por um comprimento determinado ( $\ell_t$ ), como se ilustra na Figura 2.28-a. Quando a força de tracção do CFRP é transferida para o betão, não há praticamente tensões de corte ao longo da junta colada remanescente.

Uma vez atingida a resistência ao corte do betão, inicia-se uma fenda longitudinal no betão e o diagrama das tensões transfere-se para a zona adjacente ainda não fendilhada, apesar de poder admitir-se alguma contribuição do betão entre fendas transversais (Figura 2.28-b). A partir deste momento, verifica-se que o aumento de tracção no compósito não tem significado, sendo o diagrama arrastado à extremidade oposta da junta, até que ocorra bruscamente o destacamento total do compósito.

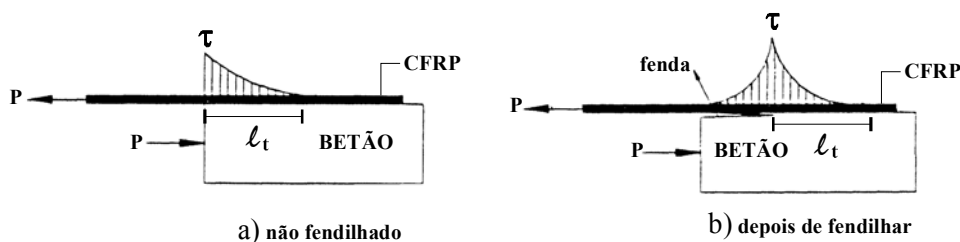


Figura 2.28 - Distribuição de tensões de corte na junta (Brosens et al., 1997).

Este facto foi confirmado experimentalmente por vários autores (Täljsten, 1994; Chajes et al., 1996; Rostásy et al., 1997-a; Maeda et al., 1997), concluindo-se que existe um comprimento crítico de aderência ( $\ell_{t,max}$ ) que uma vez excedido, a força máxima de ruína da junta mantém-se constante. A representação gráfica ilustrada na Figura 2.29 com a distribuição pontual dos ensaios de aderência de Ladner et al. (1981), Ranisch (1982) e Täljsten (1994), através da relação da força de ruína (de valores normalizados) com a variação do comprimento da junta, indica a existência desses dois limites para qualquer dos autores. Estas mesmas conclusões foram observadas, recentemente, por Costeira Silva (1999) quando simulou os ensaios de aderência destes autores através do modelo de cálculo desenvolvido.

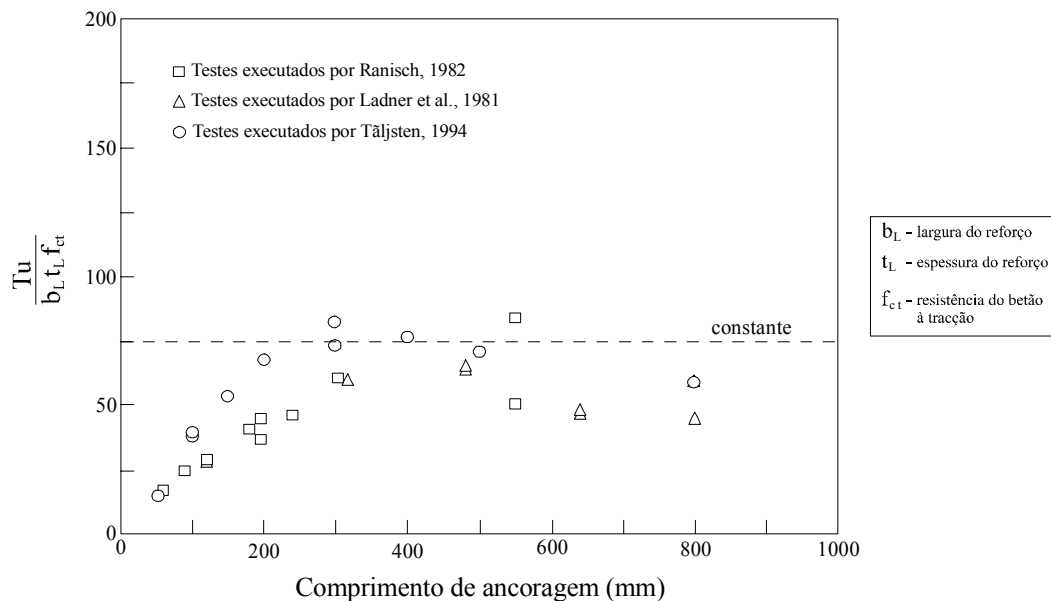


Figura 2.29 – Força normalizada vs comprimento de ancoragem dos ensaios de Ranisch, Ladner et al. e Täljsten (1994) (juntas betão-aço).

A resposta à *segunda questão*, sobre o valor da máxima aderência a introduzir nos modelos das leis constitutivas da junta, resulta da interpretação que os vários autores fizeram dos seus ensaios descritos nas Tabelas 2.7 e 2.8. Em termos gerais, verifica-se que os critérios são dispersos, variando com o autor e com o modelo de aderência adoptado. Alguns autores atribuem para tensão máxima de aderência ( $\tau_{max}$ ) os valores obtidos directamente dos ensaios de "pull-off" ( $f_{ctm,p}$ ), de torção directa ( $\tau_{c max}$ ) e de tracção simples do betão ( $f_{ctm}$ ) (Van Gemert, Ranisch, Varastehpour et al. e Peterson). A partir dos ensaios descritos, outros investigadores recorrem a critérios do tipo Mohr-Coulomb ou por aproximação à mecânica da fractura, de modo a determinarem o valor final da aderência pretendida (Arduini et al., Täljsten, Rostásy et al., Brosens et al.).

Com alguma dificuldade foi possível resumir na Tabela 2.9 alguns dos critérios adoptados para o valor da resistência de aderência da junta tipo betão-adesivo-compósito, com base no grupo de trabalhos experimentais admitidos nesta análise.

Tabela 2.9 - Alguns critérios para a resistência de aderência de juntas.

<b>Autores</b>	<b>Condições do betão</b>	<b>Resistência de aderência</b> ( $\tau_{max}$ , $\tau_{med}$ )
Van Gemert (1980)	Estado I	$\tau_{max} = f_{ctm,p}$
Brosens et al. (1997)	Estado II	$\tau_{max} = f_{ctk}$
Brosens et al. (1999)	Estado I / Estado II	$\tau_{max} = K_b \cdot 1.8 \cdot f_{ctm}$ $K_b =$ efeito da dimensão
Peterson et al. (1997)	Superfície limpa	$\tau_{max} = \tau_{cmax} = \frac{16DM_t}{\pi(D^4 - d^4)} = \text{coesão}$ com: $D = 75$ mm, $d = 56$ mm, $M_t$ - momento
Ranisch (1982)	Betões correntes	$\tau_{max} = \frac{8f_{ctm,p} - 3}{1.8}$
Kaiser (1989), Deskovic (1991), Deuring (1993)	Betão B35/25 (SIA 162 de 1989)	$\tau_{max} \cong 8$ MPa (critério de Ranisch)
Arduini et al. (1997)	$f_{cm} = 36$ MPa (cilindros)	$\tau_{max} \cong 5$ MPa (critério de Moh-Coulomb)
Varastehpour et al. (1995, 1996)	$f_{cm} = 43.5$ MPa $f_{ctm} = 6.35$ MPa	$\tau_{med} = 5.4$ MPa = coesão (ensaio de corte simples) $\tau_{med} = 4.2$ MPa (ensaio de flexão)
Chajes et al. (1996)	$f_{cm} = 47$ MPa	$\tau_{med} = 4.9$ MPa - 5.5 MPa (ensaio de corte simples)
Nsambu (1997)	$f_{cm,28} = 34.8$ MPa $f_{ctm,28} = 2.9$ MPa	$\tau_{med} = 0.8$ MPa - 1.3 MPa (ensaio de corte duplo)
JCI TC952 (1998)	Betões correntes e juntas efectivas com comprimento de 60 mm a 90 mm	$\tau_{med} = 2$ MPa - 5 MPa (ensaio de corte duplo)

$\tau_{max}$ ,  $\tau_{med}$  - valores máximo e médio da aderência definidos para as leis constitutivas;

$f_{ctm,p}$  - valor médio de resistência à tracção do betão à superfície (ensaio de "pull-off" ou arrancamento por tracção).

### 2.3.3.3 - Zona de ancoragem

Depreende-se do item 2.3.2, sobre os modos de ruína possíveis a ocorrer em estruturas reforçadas pela técnica da colagem, que a zona extrema de dispensa da armadura de reforço é crítica, quanto ao comportamento dessas estruturas em estado limite último.

Este facto mereceu a atenção devida por parte de diversos autores quando se investigou o reforço com adição de chapas metálicas. A partir daí, surgiram várias sugestões práticas de prevenção

e modelos analíticos aproximados de previsão da resistência última ao destacamento nesta zona de amarração ou ancoragem do reforço (Jones et al., 1988; Roberts et al., 1989). O modo de colapso numa extremidade foi justificado devido ao efeito conjunto de concentração da tensão de corte e da tracção normal à junta ("peeling"), como se ilustrou no pormenor 1 da Figura 2.21. Testes realizados por Jones et al. (1988) e Täljsten (1994) indicam que, próximo do colapso, as tensões de "peeling" são 50% das tensões de corte, aproximadamente.

Fenómenos semelhantes têm sucedido nos casos de reforços de vigas com materiais compósitos do tipo CFRP. Por isso, os trabalhos de investigação que relatam este assunto expressam a preocupação em ajustar as soluções anteriores, definidas para armaduras metálicas, ao caso concreto de aplicação de mantas e laminados de CFRP.

Como consequência da falta de uniformização sobre a interpretação real da aderência de juntas betão-adesivo-compósitos de FRP, como se descreveu no item 2.3.3.2, as investigações no domínio do mecanismo de ancoragem reflectem, também, essa fragmentação de opiniões. Na literatura em geral, é possível encontrar algumas propostas de previsão do comportamento na zona de amarração da armadura de CFRP com vista, principalmente, ao dimensionamento desta. Nestes casos recorre-se à definição de expressões aproximadas para o cálculo da força última de destacamento do compósito (força de "peeling-off"), a força de tracção máxima na armadura de reforço e o comprimento mobilizado para a transferência desta força ao betão de interface (Kaiser, 1989; Triantafillou et al., 1991; Deuring, 1993; Sharif et al., 1994; Täljsten, 1994).

Contudo, a dispersão de opiniões tem conduzido geralmente a que, caso não se domine o mecanismo de ancoragem, se opte por adição de sistemas exteriores de fixação das extremidades do compósito, de modo a prevenir as hipóteses de ruínas antecipadas nesta zona (consultar item 2.3.3.1).

Entretanto, na Alemanha, a evolução de conhecimentos desde o estabelecimento do critério de ancoragem de Ranisch (1989) como norma de cálculo, mais tarde sugerido para as aplicações de laminados de CFRP pelo EMPA (Kaiser, 1989; Deuring, 1993), até aos modelos mais recentes de Pichler (1993) e Holzenkämpfer (1994) testados para reforços colados com chapas metálicas, têm contribuído positivamente para a interpretação das ancoragens de reforços com compósitos, sobretudo, com os laminados de CFRP.

O artigo de Thomas Vogel, integrado no documento D0144 (1997), e o trabalho de Rostásy et al. (1996) introduzem os três critérios mencionados, concluindo-se, principalmente, que existe boa concordância entre as hipóteses de Pichler e Holzenkämpfer, visto que ambos apontam para um valor máximo da força de tracção da chapa ( $T_{u,max}$ ), confirmada experimentalmente por



autores como Täljsten (1994), Chajes et al. (1996) e Rostásy (1997-a; 1998). Pelo contrário, a hipótese de Ranisch indica que, para comprimentos de amarração crescentes (sempre maiores que 500 mm), obtém-se forças na chapa também crescentes (Figura 2.30).

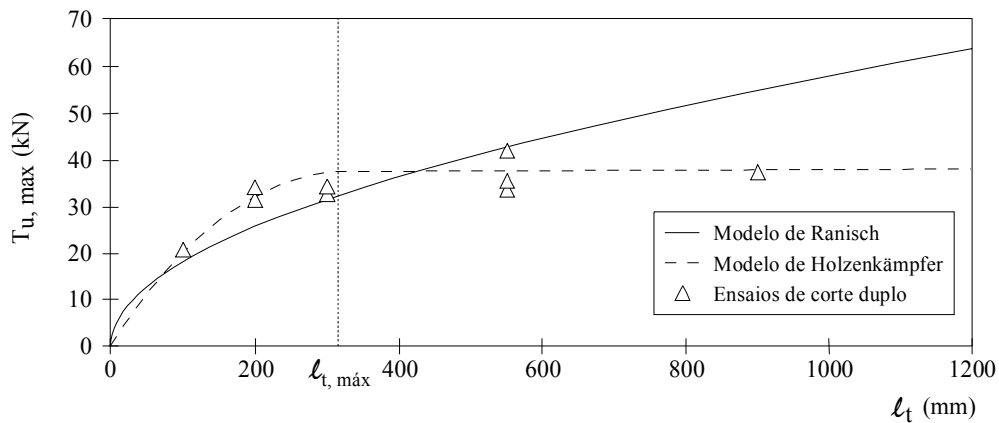


Figura 2.30 – Comparação da máxima força de tracção entre o modelo de Ranisch e de Holzenkämpfer para os ensaios de corte duplo de Blaschko et al. (1998).

O modelo de cálculo de Holzenkämpfer (1994) baseia-se na teoria não linear da mecânica da fractura e foi deduzido para chapas de material elástico. Recentemente este modelo foi objecto de investigação por parte de Rostásy et al. (1996), com vista a analisar a hipótese da sua formulação ser aplicável ao caso de laminados pré-fabricados de CFRP, apresentando estes também comportamento linear elástico.

Para isso, os autores admitem que o mecanismo da amarração destas armaduras é semelhante ao comportamento simulado em laboratório pelos ensaios de aderência de corte, com junta dupla, como se ilustra na Figura 2.31 e se incluiu na Tabela 2.7.

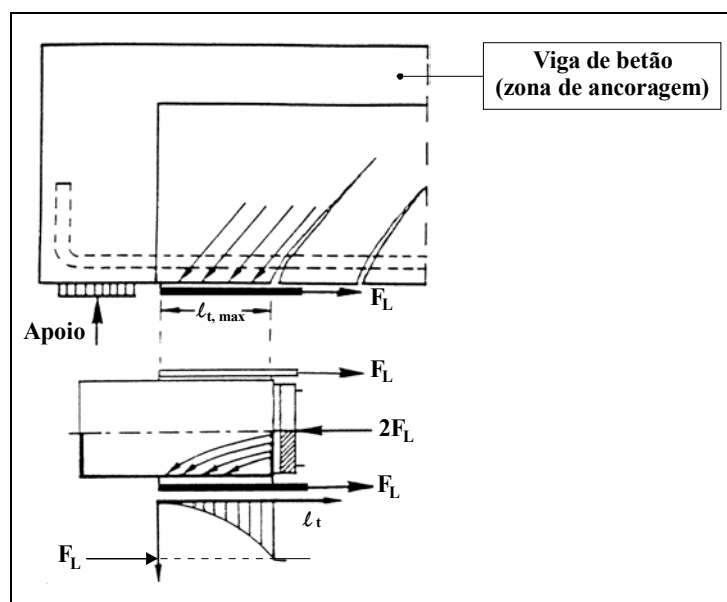


Figura 2.31 – Esquema com a ancoragem do laminado e o ensaio de aderência associado (Neubauer et al., 1997).

Na perspectiva do autor do modelo base, existe uma força máxima de tracção na chapa que provoca a ruína da ligação ( $F_L \leq T_{u,max}$ ), valor esse transponível ao betão segundo um comprimento efectivo de colagem da interface betão-adesivo-reforço ( $\ell_{t,max}$ ). Os comprimentos superiores a esse valor não se traduzem em incremento da força máxima de ruína da junta. Os valores desta força e do comprimento de amarração (ancoragem) associado são função da energia de fractura dispensada para o destacamento local da chapa em relação ao betão. Esses valores são, igualmente, dependentes da geometria e da resistência à tracção do betão adjacente à ligação.

Desse modo, a base de dados construída no iBMB, a partir de ensaios de aderência em corte duplo (tipo tracção-compressão), permitiu ajustar as expressões de Holzenkämpfer aos resultados medidos nesses ensaios, concluindo-se as expressões indicadas por [Eq-2.2], para o valor médio da força máxima de ancoragem e por [Eq-2.3] para o valor máximo do comprimento efectivo de ancoragem. Os ensaios de aderência provam que as referidas equações traduzem o comportamento dos laminados de CFRP satisfatoriamente. A ilustrá-lo está a correlação entre os valores calculados (*cal*  $T_m$ ) e os observados (*exp*  $T_u$ ) expostos no diagrama da Figura 2.32-a.

$$T_{m,max} = 0.64b_L K_b \sqrt{E_L t_L f_{ctm} K_\mu} \quad (N) \quad [\text{Eq-2.2}]$$

$$\ell_{t,max} = 0.7 \sqrt{E_L t_L / f_{ctm}} \quad (mm) \quad [\text{Eq-2.3}]$$

- $T_{m,max}$  - valor médio da força máxima de ancoragem na ruína (N)
- $\ell_{t,max}$  - comprimento efectivo de ancoragem (mm)
- $b_L$  - largura do laminado (mm)
- $E_L$  - módulo de elasticidade longitudinal do laminado (MPa)
- $t_L$  - espessura do laminado (mm)
- $f_{ctm}$  - valor médio da resistência à tracção do betão adjacente à ligação ( $= f_{ctm,p}$ , dado pelo ensaio de "pull-off"), com um máximo de 3 MPa (DIN 1048-2:1991-06) por sugestão do documento de homologação do DIBt (MPa)
- $K_\mu$  - coeficiente afecto ao tipo de ensaio e grau de reforço (caso corrente  $K_\mu = 1.0$ )
- $K_b$  - coeficiente de relação geométrica expresso por:

$$K_b = \sqrt{1.125 \times (2 - b_L / b_c) / (1 + b_L / 400)} \geq 1 \quad [\text{Eq-2.4}]$$

- $b_c$  - largura da viga ou distância entre eixos do laminado na laje (mm).

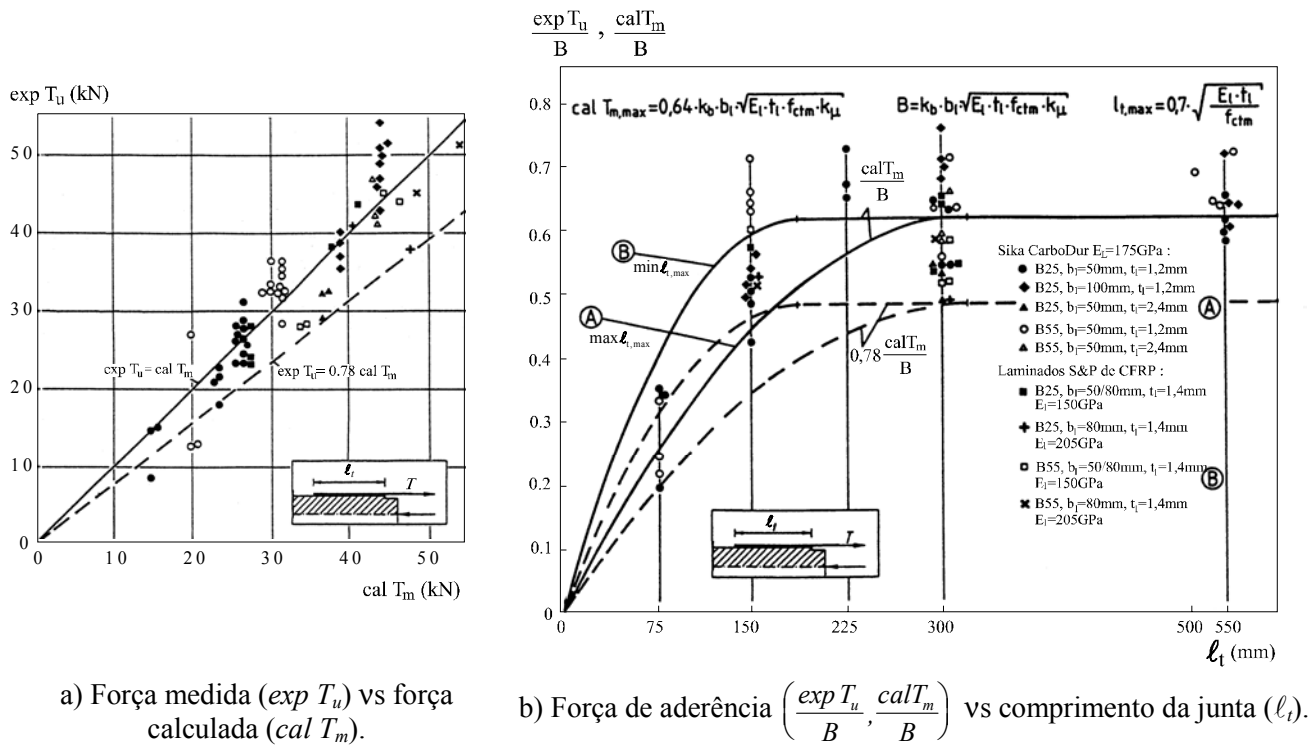


Figura 2.32 - Informação geral sobre ensaios de aderência com laminados de CFRP (Rostásy, 1998).

De acordo com Rostásy et al. (1996) e Neubauer et al. (1997), pode admitir-se como válidas, também, as relações estabelecidas no modelo de Holzenkämpfer (1994) para os casos seguintes:

- 1) para comprimentos de amarração inferiores ao máximo ( $\ell_t \leq \ell_{t,max}$ ) é aproximada uma relação parabólica entre a força de ruína média ( $T_m$ ) e o comprimento de ancoragem usado ( $\ell_t$ ) dado por:

$$T_m = \frac{\ell_t}{\ell_{t,max}} \times \left( 2 - \frac{\ell_t}{\ell_{t,max}} \right) \times T_{m,max} \quad (N) \quad [Eq-2.5]$$

- 2) situações em que a força de tracção a ser ancorada seja inferior ao valor máximo admitido no cálculo da junta ( $T_m \leq T_{m,max}$ ), o comprimento de ancoragem necessário ( $\ell_t$ ) pode ser calculado de acordo com:

$$\ell_t = \left( 1 - \sqrt{1 - T_m / T_{m,max}} \right) \times \ell_{t,max} \quad (mm) \quad [Eq-2.6]$$

Na Figura 2.32-b representa-se, de forma normalizada, em termos de parâmetros mais condicionantes e compilados na constante "B", os valores da força última da junta medidos

experimentalmente em função do comprimento de colagem adoptado nos ensaios do iBMB. Nesta figura ilustra-se, também, as curvas de cálculo ( $cal T_m/B$ ) obtidas pelas equações [Eq-2.2], [Eq-2.3] e [Eq-2.5] para as forças máximas de ancoragem de dois ensaios de aderência com betões distintos, tipo B 25 (referido na figura por  $\textcircled{A}$ ) e tipo B55 (identificado por  $\textcircled{B}$ ). Pode observar-se que estas curvas apresentam uma boa correlação relativa aos resultados experimentais respectivos. Além disso, depreende-se que o melhoramento da classe de betão permite reduzir o comprimento de ancoragem, como se observa no desenvolvimento entre as curvas  $\textcircled{A}$  e  $\textcircled{B}$ .

Com estas expressões atinge-se um dos patamares mais elevados na confiança a atribuir ao conhecimento do comportamento dos laminados pré-fabricados de CFRP, na zona de amarração destes. Estas informações permitem formar um critério de cedência para a amarração das extremidades dos CFRP, a nível de projecto de reforço de elementos de betão armado.

Para confirmá-lo, existem as recentes publicações do "Deutsches Institute für Bautechnik" (DIBt) sobre a homologação dos primeiros laminados de CFRP. Estes adoptam os critérios investigados no iBMB para regras de dimensionamento das ancoragens, quando se aplicam sistemas compósitos obtidos por pultrusão. Por sugestão de Neubauer et al. (1997), admite-se para dimensionamento não o valor médio mas sim o valor característico da força máxima de ancoragem ( $T_{K,max}$ ), na ordem de 75% a 78% do valor médio dessa força [Eq-2.2], traduzido nas referidas homologações pela equação [Eq-2.7].

$$T_{K,max} = 0.5b_L K_b K_T \sqrt{E_L t_L f_{cm}} \quad (N) \quad [\text{Eq-2.7}]$$

onde

$$K_T = \begin{cases} 0.9 & \text{- para elementos localizados no exterior, onde podem existir flutuações térmicas} \\ & \text{de } -20 \text{ }^\circ\text{C a } 30 \text{ }^\circ\text{C}; \\ 1.0 & \text{- para elementos restantes.} \end{cases}$$

$b_L, K_b, E_L, t_L$  e  $f_{cm}$  – com o significado já descrito.

Todas as restantes expressões [Eq-2.3], [Eq-2.5] e [Eq-2.6] estão, igualmente, incluídas nos critérios de dimensionamento dos documentos estabelecidos pelo DIBt. Nos diagramas das Figuras 2.32-a e 2.32-b indicam-se as curvas correspondentes aos valores característicos agora referidos.



# Capítulo 3

## Programa Experimental e Caracterização dos Materiais

Neste Capítulo, apresenta-se o programa experimental de investigação em termos de descrição dos modelos reduzidos de betão armado, do projecto de reforço com materiais compósitos e do programa de ensaios de flexão e expõe-se a caracterização dos materiais intervenientes, na execução desse modelos. Os materiais estão agrupados, segundo os quatro constituintes principais dos protótipos em análise, ou seja, o betão, o aço, o compósito de CFRP e os adesivos de ligação.

De uma forma simplificada discriminam-se, igualmente, os equipamentos e os respectivos acessórios usados na instrumentação dos ensaios, que integram as tarefas do programa de trabalho proposto nesta investigação. Por último, tecem-se considerações sobre a metodologia de observação e de análise dos ensaios.

Os equipamentos e os sistemas de aquisição de dados utilizados foram disponibilizados por vários laboratórios de ensaios da FEUP, sobretudo pelo Laboratório de Estruturas (LE) e com o apoio dos que abaixo se indicam:

- Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção do DECivil (LEMC);
- Unidade de Materiais Compósitos do INEGI (CEMACOM);
- Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental do DEMEGI (LOME).

### 3.1 - MODELOS EXPERIMENTAIS PARA ENSAIOS DE FLEXÃO

O programa de trabalhos da presente tese compreende a investigação do comportamento de vigas e de lajes de betão armado reforçadas com materiais compósitos de CFRP unidireccionais, principalmente através da realização de um programa experimental de ensaios de flexão em quatro pontos, sobre modelos reduzidos de laboratório.

A coordenação de vários factores, como a novidade no mercado nacional da presença de alguns materiais compósitos de FRP, os objectivos a atingir no trabalho e a gestão de recursos disponíveis nos laboratórios da FEUP, conduzem a critérios de projecto e de execução dos modelos de betão armado a reforçar e a ensaiar. O primeiro contacto com a técnica de reforço por colagem de laminados pré-fabricados de CFRP estabelece-se com os modelos de três *séries de vigas*.

Posteriormente, no âmbito de um projecto de I & D, Faculdade de Engenharia do Porto em consórcio com a Junta Autónoma das Estradas (J. A. E.) e na linha de orientação da primeira experiência com o reforço de vigas de betão (corrigidas as deficiências e lacunas), avalia-se a eficiência do reforço de modelos de três *séries de faixas de laje* com dois sistemas de CFRP unidireccional, o laminado pré-fabricado e a manta flexível e pré-impregnada.

No sentido de facilitar a apresentação das informações que se descrevem neste capítulo, optou-se por descrever no anexo A (Tabela A.1) o programa das tarefas a realizar nas duas etapas principais deste trabalho de investigação (Juvandes et al.; 1998-a e 1998-b).

### **3.1.1 - Projecto de reforço com sistemas CFRP unidireccionais**

Antes de se descrever os modelos reduzidos de betão armado executados para a investigação, expõem-se, de seguida, os critérios que estão subjacentes ao projecto de reforço de cada uma das séries que integram estes modelos.

#### **3.1.1.1 - Série de vigas**

A primeira fase do programa de investigação iniciado na FEUP, sobre a necessidade de expandir o conhecimento e a confiança na utilização dos compósitos de FRP no reforço de estruturas de betão, impõe que os requisitos do comportamento dos materiais, as técnicas de aplicação e o funcionamento posterior das estruturas reforçadas devam ser claramente compreendidos pelos técnicos de construção civil.

Sem obedecer a um projecto específico, nesta primeira fase, a investigação envolve uma componente de análise experimental que consiste na realização de ensaios sobre uma série de vigas tipo de betão armado, reforçadas exteriormente por colagem de laminados pré-fabricados unidireccionais de carbono, com a referência de *Sika CarboDur S 512*. Com estes ensaios, pretende avaliar-se o comportamento estrutural das vigas a vários níveis, tais como:

- a variação do comprimento de colagem;
- o tipo de preparação da superfície do betão;
- o tipo de adesivo;
- a forma de distribuição das tensões de corte nas interfaces betão-adesivo-laminado;
- o sistema de ancoragem das extremidades (em certa medida);
- a presença de betões com determinado grau de deterioração.

Para esse efeito, foram seleccionados três grupos de vigas, distintos pelas suas características geométricas e mecânicas, identificados pelas referências *tipo A*, *tipo B* e *tipo C*.

O grupo de vigas *tipo A*, composto por quatro protótipos, procura analisar o comportamento do modelo tipo usado por outros autores nos testes de corte em flexão, para vigas reforçadas com a colagem de chapas metálicas (Van Gemert, 1980) e de compósitos de CFRP (Tabelas 2.7 e 2.8).

A série de vigas *tipo B* é constituída por treze modelos do protótipo usado correntemente no Laboratório de Estruturas (LE) de DECivil e pretende estudar o comportamento daqueles, quando reforçados exteriormente com a colagem do laminado de material compósito.

O efeito das condições adversas do ambiente sobre modelos de betão de baixa classe de resistência, sobretudo a nível das características mecânicas da camada superficial do betão, é analisado na série de vigas *tipo C*, através de um grupo de cinco vigas.

#### 3.1.1.2 - Série de faixas de laje

A segunda fase do programa de investigação resultou de uma solicitação da Junta Autónoma das Estradas (J.A.E.) à FEUP sobre a análise da viabilidade do reforço do tabuleiro da “Ponte de Nossa Senhora da Guia” (Ponte de Lima) e, em paralelo, do interesse em concretizar-se o estudo da aplicação de materiais compósitos reforçados com fibras de carbono unidireccionais (CFRP) na reabilitação de uma estrutura de betão existente.

Do resultado da inspecção da ponte com a secção em caixão, como se observa nas Figuras 3.1-a e 3.1-b, diagnosticou-se um tabuleiro que apresenta sinais evidentes de fendilhação longitudinal, resistência insuficiente e betão de boa qualidade (OZ Lda., 1998; Figueiras et al., 1999). Da análise do projecto e da secção transversal tipo do caixão (Figura 3.2) concluíram-se os aspectos seguintes:

- i) O tabuleiro é representado por um caixão bicelular, cuja laje superior apoia com continuidade nas paredes do caixão;
- ii) A informação geométrica do tabuleiro indica que:
  - vão:  $\ell = 3.9 \text{ m}$ ;
  - espessura:  $h \cong 0.20 \text{ m}$  ( $\ell / h \cong 19.5$ ).



iii) Outras informações dignas de realce sobre o betão armado existente no tabuleiro são:

$$\begin{array}{l}
 \text{- Armadura inferior:} \\
 \text{(/m de laje)}
 \end{array}
 \left\{
 \begin{array}{l}
 \phi 10 \text{ mm afastados } 0.20 \text{ m;} \\
 A_s = 3.93 \text{ cm}^2/\text{m;} \\
 \rho_s = 0.20\%; \\
 \text{A400 } (f_{syd} = 348 \text{ MPa}).
 \end{array}
 \right.$$

$$\begin{array}{l}
 \text{- Momento resistente:} \\
 \text{(/m de laje)}
 \end{array}
 \left\{
 \begin{array}{l}
 m_{Rd} = A_s f_{syd} z_s = 22 \text{ kNm/m;} \\
 z_s \cong 0.95 d_s;
 \end{array}
 \right. \quad [\text{Eq-3.1}]$$

$$\left\{
 \begin{array}{l}
 d_s = 0.20 - 0.03 = 0.17 \text{ m.}
 \end{array}
 \right. \quad [\text{Eq-3.2}]$$

iv) A análise da envolvente de esforços, resultante da combinação de acções previstas para a estrutura desta natureza pelo Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA, 1983), permite constatar que é necessário reforçar a face inferior do tabuleiro, de forma a aumentar a capacidade resistente para o *dobro* da disponível (Oliveira et al., 1999):

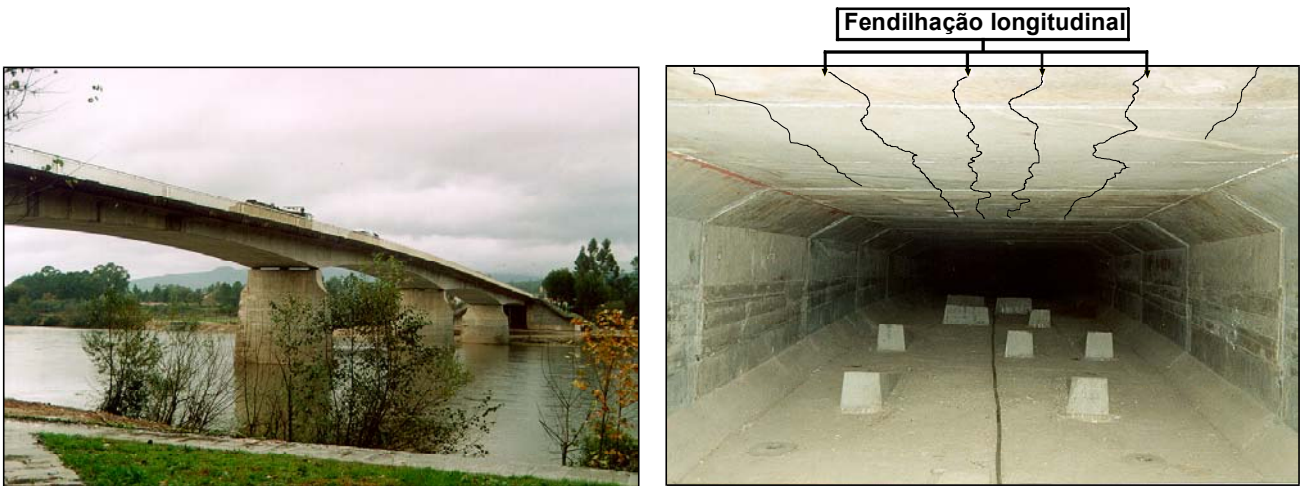
$$\text{- Momento final:} \quad m'_{Rd} \cong 2 \times m_{Rd}; \quad [\text{Eq-3.3}]$$

$$\text{- Armadura adicional:} \quad \Delta A_s \cong 4 \text{ cm}^2/\text{m}. \\
 \text{(/m de laje)}$$

Assim, o objectivo principal desta fase é avaliar em laboratório a viabilidade do reforço da ponte com a colagem de materiais compósitos de CFRP. O programa consiste na realização de ensaios de flexão sobre séries de faixas de laje (modelos reduzidos) com capacidade resistente semelhante, reforçadas exteriormente por colagem de cada um dos dois sistemas de CFRP em estudo, o laminado pré-fabricado *CarboDur S 512* (Sika, 1998) e a manta flexível e pré-impregnada *Replark 20* (Replark, 1997).

Para esse efeito, seleccionaram-se modelos reduzidos de betão armado, à escala aproximada de 1/2.5, com uma dimensão média de  $8 \times 45 \times 180 \text{ cm}^3$  e representados nos ensaios de flexão como lajes simplesmente apoiadas, sobre um vão livre de 1.60 m, isto é, com uma relação próxima da situação real ( $\ell / h \cong 20$ ), embora com condições de apoio diferentes. A armadura mínima a dispor no modelo de laboratório, equivalente à do tabuleiro por metro de largura ( $\rho_s \cong 0.20 \%$ ), deve resultar da condição seguinte:

- Armadura necessária:  $A_s = \rho_s bh = 0.002 \times 8.0 \times 45.0 = 0.72 \text{ cm}^2$ ; [Eq-3.4]
- Armadura adoptada: (por modelo)  $\left\{ \begin{array}{l} 3\phi 6; (A_s = 0.84 \text{ cm}^2); \\ \rho_s = 0.23\% . \end{array} \right.$



a) Aspecto geral da ponte.

b) Aspecto geral da fendilhação longitudinal na face inferior do tabuleiro.

Figura 3.1 – “Ponte de Nossa Senhora da Guia” em Ponte de Lima.

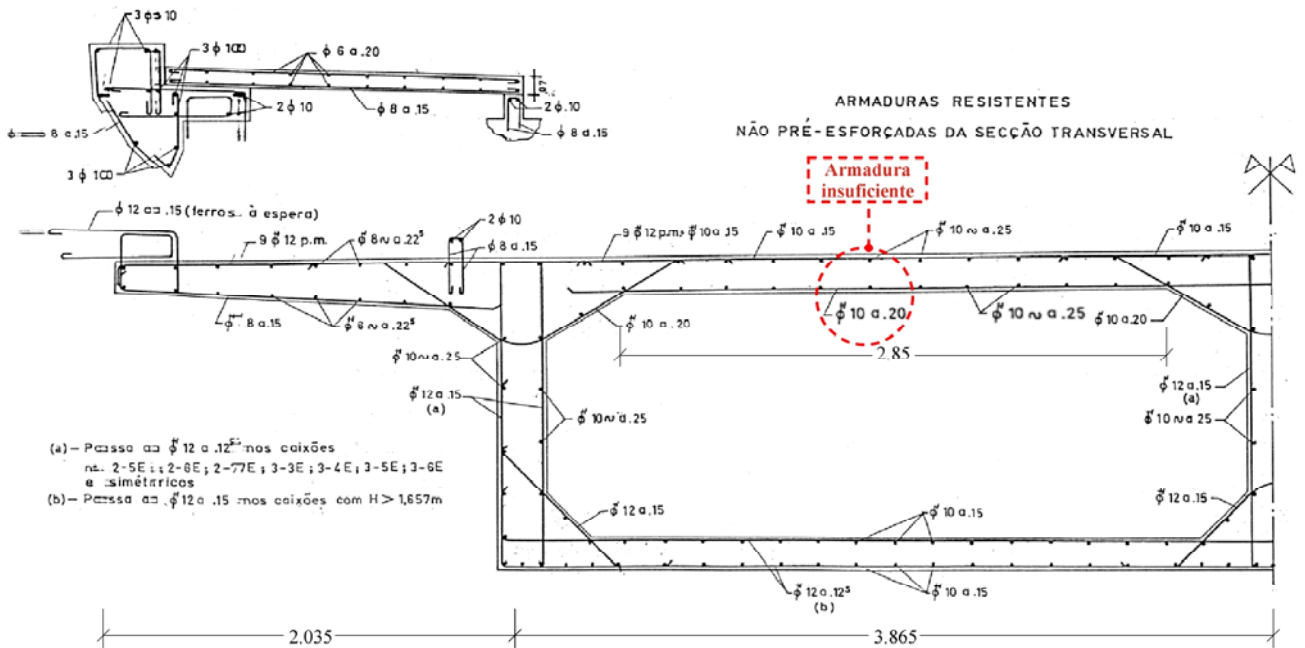


Figura 3.2 - Secção transversal tipo da viga em caixão da “Ponte N. S. G.” (Figueiras et al., 1999).

Como o objectivo pretendido consiste em reforçar a estrutura no *dobro* em termos de resistência última, neste estudo estabelece-se o pré-dimensionamento de três séries de faixas de laje que se identificam pelas referências *tipo N*, *tipo R* e *tipo S*.

O grupo de lajes da série *tipo N* não é reforçado com materiais compósitos, mas dispõe de uma armadura constituída só por varões, equivalente à armadura desejável para o tabuleiro da ponte, isto é,  $3\phi6\text{ mm} + 3\phi6\text{ mm}$  ( $A_s = 1.70\text{ cm}^2$ ). Nestas condições e antecipando as características dos materiais utilizados na confecção dos modelos (item 3.3), o acréscimo de armadura de  $3\phi6\text{ mm}$  ( $\Delta A_s = 0.84\text{ cm}^2$ ) em relação à mínima, corresponde às *forças de resistência* ( $F_{3\phi6}$ ) e de *rigidez* ( $K_{3\phi6}$ ) a seguir indicadas:

$$\text{i) Resistência: } F_{3\phi6} = \Delta A_s f_{syk} \cong 48.50\text{ kN} \quad [\text{Eq-3.5}]$$

sendo nos modelos,

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Aço: } f_{sym} = 635\text{ MPa (item 3.3.2);} \\ f_{syk} \cong f_{sym} / 1.1 = 577\text{ MPa;} \\ \text{Altura útil: } d_s = 8 - 1.3\text{ cm} = 6.7\text{ cm.} \end{array} \right. \quad [\text{Eq-3.6}]$$

$$\text{ii) Rigidez: } \left\{ \begin{array}{l} K_{3\phi6} \cong \Delta A_s E_s / l_s \cong 16.80\text{ MN.m}^{-1}; \\ E_s = 200\text{ Gpa;} \\ l_s = 1.0\text{ m.} \end{array} \right. \quad [\text{Eq-3.7}]$$

As séries *tipo R* e *tipo S* apresentam apenas a armadura mínima ( $3\phi6\text{ mm}$ ), equivalente à armadura existente no mesmo tabuleiro, e são reforçadas, posteriormente, com os elementos de CFRP de forma a manterem uma capacidade resistente similar. Isto corresponde a converter-se a armadura adicional de reforço ( $3\phi6\text{ mm}$  com  $\Delta A_s = 0.84\text{ cm}^2$ ) em armadura equivalente de material compósito, do tipo *Replark 20* para a série *R* e do tipo *CarboDur S 512* para a série *S* (materiais caracterizados no item 3.3). O pré-dimensionamento da geometria, mais precisamente da largura  $b_{cal}$  necessária para cada um dos casos, está exposto na Tabela 3.1, admitindo-se para o efeito as condições seguintes:

- 1 - Extensão última de cálculo do CFRP é de  $\varepsilon_{Lud} \cong 8\text{ ‰}$  (e menor que  $5\text{ } \varepsilon_{sy}$ ), segundo os pressupostos do item 2.3.3.1 (Capítulo 2), de modo a evitar extensões elevadas no compósito, que impliquem o risco da armadura interior atingir a tensão de cedência, em estado limite de utilização;

2 - Equivalência entre forças resistentes ( $F_{CFRP}$  e  $F_{3\phi6}$ ) é calculada pelas expressões:

$$\left[ \begin{array}{l} F_{CFRP} = F_{série R} = F_{série S} \cong F_{3\phi6} d_s/d_L \end{array} \right. \quad [\text{Eq-3.8}]$$

$$\left[ \begin{array}{l} F_{série R} = F_{série S} \cong \varepsilon_{Lud} E_L t_L b_{cal} \end{array} \right. \quad [\text{Eq-3.9}]$$

onde,

$$\left[ \begin{array}{l} d_s/d_L - \text{relação entre as alturas úteis série N/série R e série N/série S;} \\ E_L - \text{módulo de elasticidade longitudinal do CFRP;} \\ t_L - \text{espessura do CFRP;} \\ b_{cal} - \text{largura do CFRP (laminado ou manta) necessária para o} \\ \text{reforço.} \end{array} \right.$$

Em resumo, a série *tipo R* é reforçada por colagem de duas faixas de *Replark 20* constituídas por sobreposição de duas camadas de manta flexível. Por sua vez, a série *tipo S* é reforçada por colagem de duas tiras de *CarboDur S 512*.

Na Tabela 3.2, apresenta-se o cálculo da força de rigidez ( $K_{CFRP}$ ) que se obtém para as duas séries, sobretudo em função da geometria escolhida para a parcela de reforço com os sistemas compósitos. Esta força calcula-se, para cada caso, pelas expressões seguintes:

$$\left[ \begin{array}{l} K_{CFRP} = K_{série R} = K_{série S} \end{array} \right. \quad [\text{Eq-3.10}]$$

$$\left[ \begin{array}{l} K_{CFRP} = t_L b_{real} E_L / \ell_L \times d_L/d_s \end{array} \right. \quad [\text{Eq-3.11}]$$

onde os termos têm o significado já descrito nesta secção e  $\ell_L = 1.0 \text{ m}$ .

Da análise comparativa entre as séries, extraem-se duas taxas a partir das equivalências em termos, por um lado, de *resistência* e por outro, de *rigidez*. A primeira ( $T_F$ ) representa o sobredimensionamento do reforço com CFRP em relação ao reforço com aço, quando se admitem a aderência perfeita e os valores característicos da resistência dos materiais ( $\varepsilon_{Lu}^{série R} = 15 \text{ ‰}$  e  $\varepsilon_{Lu}^{série S} = 19 \text{ ‰}$  estabelecidos no item 3.3) e determina-se pelas equações [Eq-3.12] a [Eq-3.14]. A segunda taxa ( $T_K$ ) traduz a quebra eventual de *rigidez*, manifestada pelas séries reforçadas com os compósitos em relação à série reforçada com aço e calcula-se pelas expressões [Eq-3.15] e [Eq-3.16].

$$\left[ \begin{array}{l} T_{F,R} = F_{série R} / F_{3\phi6} \times C_L \end{array} \right. \quad [\text{Eq-3.12}]$$

$$\left[ \begin{array}{l} T_{F,S} = F_{série S} / F_{3\phi6} \times C_L \end{array} \right. \quad [\text{Eq-3.13}]$$

com

$$C_L = \frac{\varepsilon_{Lu}}{\varepsilon_{Lud}} \times \frac{b_{real}}{b_{cal}} \quad [\text{Eq-3.14}]$$

e

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{K,R} = K_{série R} / K_{3\phi6} \quad [Eq-3.15] \\ T_{K,S} = K_{série S} / K_{3\phi6} \quad [Eq-3.16] \end{array} \right.$$

Desse modo, conclui-se que em termos de *resistência*, a taxa  $T_F$  (Tabela 3.1) em estado limite último, para os CFRP, é de 2.2 (*série R*) a 2.4 (*série S*) vezes superior ao reforço com varões de aço (*série N*). Em contrapartida, a análise de *rigidez* conduz a uma taxa  $T_K$  (Tabela 3.2), nos primeiros, de valor 1/2.3 a 1/2.0 vezes inferior à dos modelos de betão armado.

Tabela 3.1 - Análise por equivalência da *resistência*.

Modelo de laje (série)	$\varepsilon_{Lud}$ (‰)	$d_L$ (mm)	Resistência equivalente			Taxa - $T_F$ [iii]
			$b_{cal}$ (mm) [i]	$b_{real}$ (mm) [ii]	$b_{cal} / b_{real}$	
tipo R	8	80.1	200	1ª camada = 2x75	0.72	2.2
				2ª camada = 2x65		
				total = 280		
tipo S	8	80.6	26	1ª camada = 2x16	0.80	2.4
				total = 32		

[i] - Resulta de se resolver as equações [Eq-3.8] e [Eq-3.9] em ordem a  $b_{cal}$  para cada série;

[ii] - Geometria real adoptada no reforço dos modelos de betão armado;

[iii] - Representa o reforço "esperado" em termos de resistência ([Eq-3.12] a [Eq-3.14]).

Tabela 3.2 - Análise por equivalência da *rigidez*.

Modelo de laje (série)	$d_L$ (mm)	$E_L$ [i] (GPa)	$t_L$ [i] (mm)	$b_{real}$ [ii] (mm)	Rigidez - $K_{CFRP}$ (MNm <sup>-1</sup> ) [iii]	Taxa - $T_K$ [iv]
tipo R	80.1	230	0.111	280	8.5	1 / 2.0
tipo S	80.6	160	1.2	32	7.4	1 / 2.3

[i] - Características do fornecedor (item 3.3);

[ii] - Definido na Tabela 3.1;

[iii] - Força de rigidez do compósito (*série R* ou *série S*) calculada pelas equações [Eq-3.10] e [Eq-3.11];

[iv] - Representa a quebra "esperada" em termos de rigidez ([Eq-3.15] e [Eq-3.16]).

### 3.1.2 - Modelos de ensaio

Para se atingir os objectivos propostos no Capítulo 1 e os princípios estabelecidos no projecto de reforço do item 3.1.1, apesar de a natureza recente dos novos materiais suscitar alguns condicionantes físicos por parte da instituição de investigação, a presente secção compreende a definição de ensaios de flexão sobre dois tipos diferentes de modelos de betão armado. Por um lado, consideram-se três *séries de vigas*, distintas pelas suas características geométricas e mecânicas e identificadas pelas referências *tipo A*, *tipo B* e *tipo C*. Por outro, definem-se os modelos experimentais de três *séries de faixas de laje* com capacidade resistente semelhante e designadas por *tipo N*, *tipo R* e *tipo S*.

#### 3.1.2.1 - Série de vigas

Este item reporta-se à caracterização e descrição dos três tipos que constituem os modelos reduzidos da série de vigas de betão armado admitidos no estudo e executados no Laboratório de Estruturas (LE).

##### (i) - Vigas tipo A

As vigas têm a secção transversal rectangular de  $0.10 \times 0.15 \text{ m}^2$  e o comprimento de  $1.60 \text{ m}$ , sendo a distância entre apoios de  $1.50 \text{ m}$ .

As características geométricas, a armadura, o tipo de solitação e o critério de instrumentação dos modelos ensaiados estão ilustrados na Figura 3.3. A viga apresenta uma descontinuidade no betão na secção transversal a meio-vão (junta de  $1 \text{ cm}$ ), mas contudo, garante a formação do binário interno de reacções nesta secção, através da força de compressão estabelecida na continuidade da armadura superior com  $2\phi 16$  (ver Figura 3.4) e da força de tracção exercida no laminado de CFRP na face inferior. Prestou-se particular atenção ao pormenor da colagem do laminado na zona central da viga, isto é, na vizinhança da secção de descontinuidade transversal do betão. Para evitar concentração de tensões na interface betão-CFRP, o que provocaria a antecipação do destacamento do CFRP e para garantir a formação de um binário bem localizado (compressão na armadura  $2\phi 16$  e tracção no laminado), procurou-se não colar o laminado ao betão nos comprimentos de  $c=5 \text{ cm}$  (vigas *A.1* e *A.2*) e de  $c=9 \text{ cm}$  (vigas *A.3* e *A.4*), centrados com essa secção (observar Figura 3.3).

Na Tabela B.1, apresentada no anexo B, resume-se alguns aspectos que interessam igualmente, para a identificação dos modelos como o tipo de betão, a mistura do adesivo e o comprimento, entre outros.

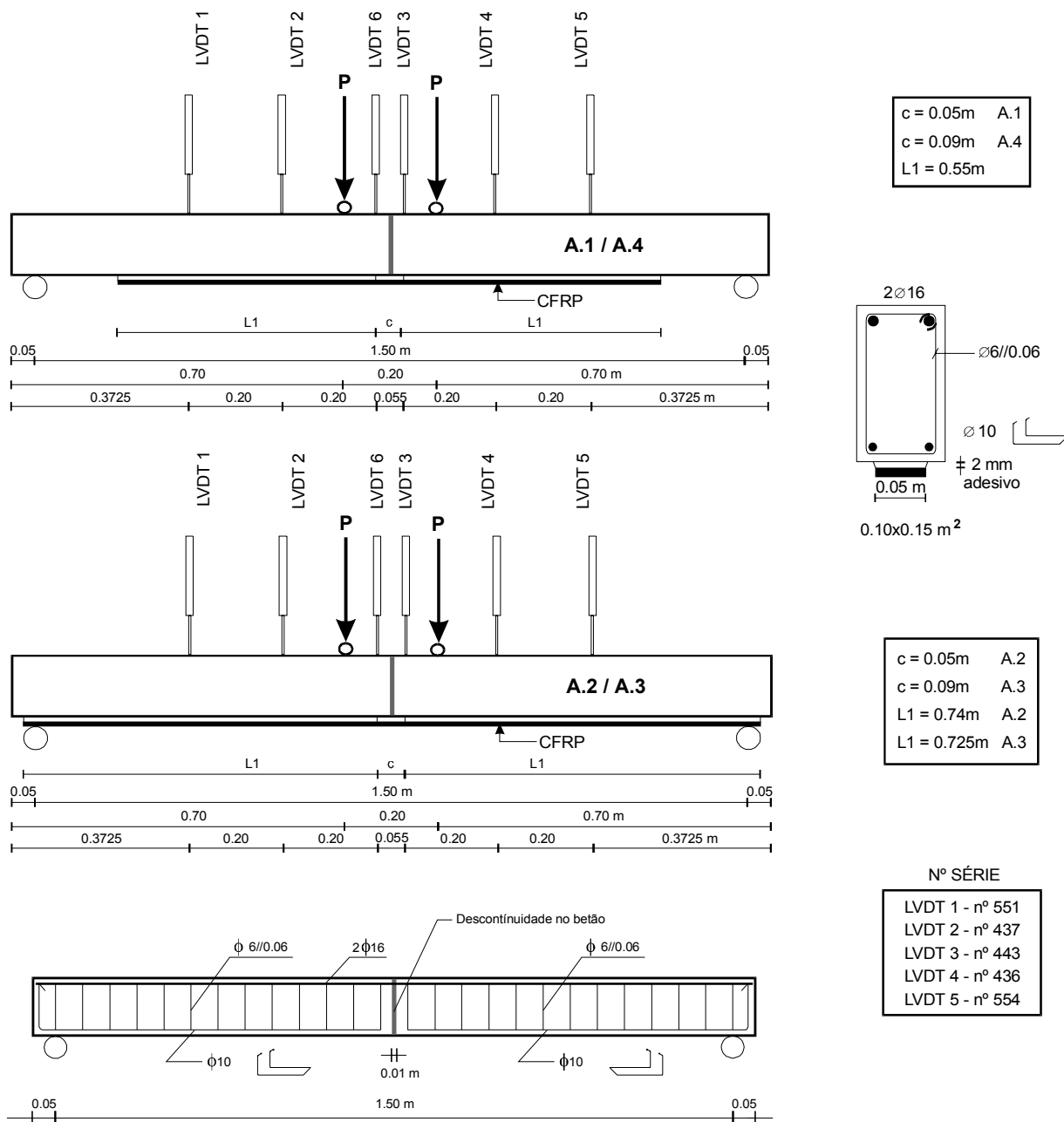


Figura 3.3 – Geometria, armadura, carregamento e instrumentação utilizados nas vigas *tipo A*.

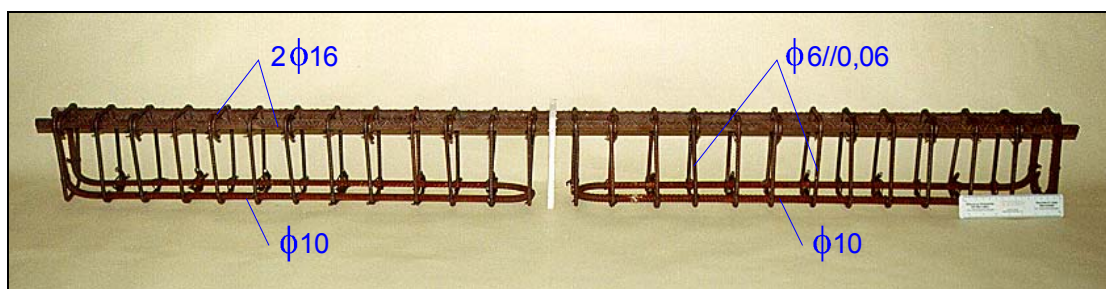


Figura 3.4 – Disposição da armadura na série *tipo A*.

(ii) - Vigas tipo B

Este grupo é constituído por treze vigas de betão com secção transversal rectangular de  $0.075 \times 0.15 \text{ m}^2$  e com o comprimento de  $1.6 \text{ m}$ . A armadura longitudinal, representada na Figura 3.5, é composta por 3 varões de  $\phi 8$  numa face e por 2 varões de  $\phi 3$  na outra e estribada por varões de  $\phi 3$  afastados de  $0.06 \text{ m}$ , excepto num caso em que apresenta o afastamento de  $0.10 \text{ m}$  (viga B.13).

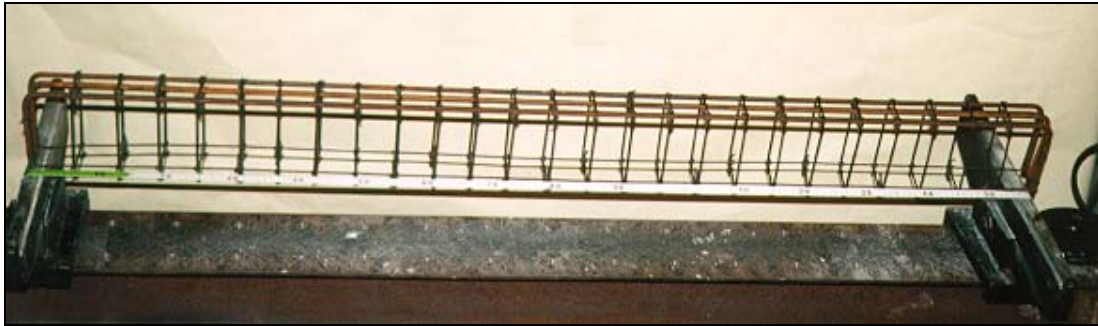


Figura 3.5 – Disposição da armadura na série tipo B.

A Figura 3.6 apresenta as características geométricas, a armadura, o tipo de solicitação e o sistema de instrumentação dos modelos de vigas ensaiadas neste grupo, segundo o critério do posicionamento da armadura longitudinal para resistir aos esforços de tracção, *caso (a)* ou *caso (b)*.

As vigas tipo B estão resumidas na Tabela B.3 do anexo B, através da descrição de dados como a ordem de betonagem, o comprimento do laminado e o tipo de ancoragem nas extremidades (sobre os apoios ou extremidade livre), os adesivos utilizados na colagem, o sistema de preparação da superfície de betão e a data dos ensaios.

A razão da diversidade dos modelos de vigas tipo B reside na preocupação em investigar-se, pela primeira vez na FEUP, o comportamento de vigas de betão reforçadas com os laminados pré-fabricadas unidireccionais de CFRP, face à variação de algumas premissas, tais como:

- i) O efeito da variação do comprimento do laminado sobre o comprimento efectivo de aderência da ligação betão-compósito descrito no Capítulo 2 (caso das vigas B.7, B.8 e B.11);
- ii) A importância da preparação da superfície de betão no êxito da aderência betão-adesivo em relação aos sistemas usados (a desenvolver no Capítulo 4):
  - abrasão mecânica com escova de aço (viga B.1)
  - projecção de jacto de areia (caso geral);
  - regularização da superfície com um primário (viga B.3);



- iii) A diferença do tipo de adesivo (o *Sikadur 31* e o *Sikadur 30*);
- iv) A vantagem no reforço da face com menor (caso geral das vigas) ou com maior percentagem de armadura longitudinal (viga *B.9*) e o efeito na resistência ao corte com diferentes armaduras de esforço transversal (vigas *B.13* e as restantes vigas);
- v) A importância de um reforço na viga, posteriormente a um estado de pré-fendilhação induzido;
- vi) O resultado, em certa medida, dos dois tipos de ancoragem das extremidades, sobre o apoio (*B.1*, *B.3*, *B.8*) ou livre (*B.7*, *B.11*), na distribuição das tensões de corte junto à interface betão-adesivo-CFRP.

O grupo de vigas identificadas por *B.2*, *B.4(1)*, *B.4(2)*, *B.6* e *B.12* não foram reforçadas, para se estabelecer o termo de comparação com as restantes vigas.

### *(iii) - Vigas tipo C*

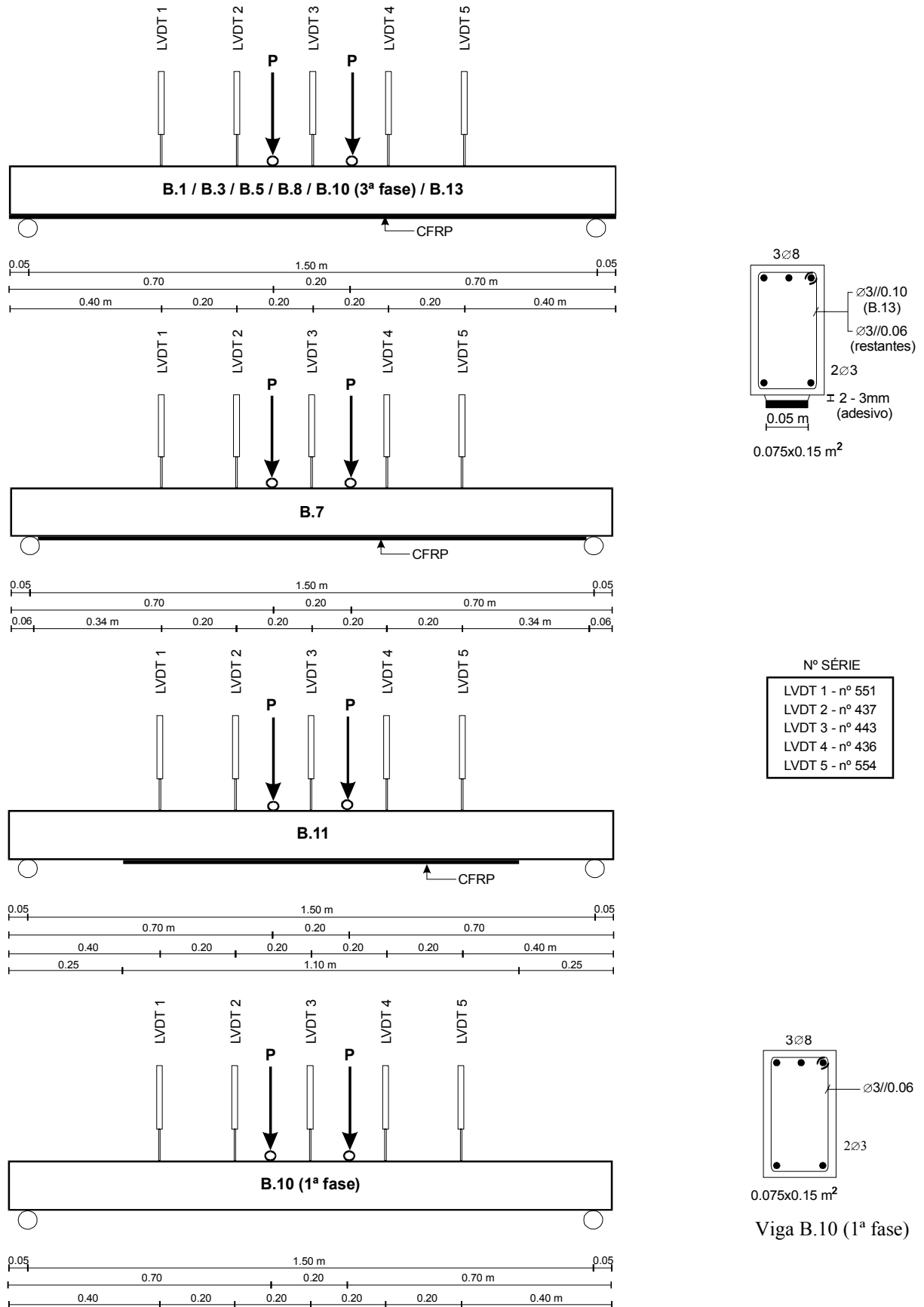
Esta série é constituída por cinco vigas de betão com secção transversal quadrada de  $0.15 \times 0.15 \text{ m}^2$  e com o comprimento de  $1.50 \text{ m}$ . A armadura longitudinal é composta por varões de  $\phi 12$  dispostos nos quatro vértices e é estribada por varões de  $\phi 6$  afastados de  $0.10$  metros (Figura 3.7).

Mais informações úteis sobre a caracterização do modelo em causa estão indicadas na Figura 3.8, principalmente em relação ao sistema de instrumentação e ao critério da ligação do laminado ao adesivo.

Algumas das características dos modelos que constituem esta série apresentam-se na Tabela B.3 do anexo B. Essas vigas distinguem-se, entre si, pelos objectivos pretendidos para este estudo, de acordo com os critérios seguintes:

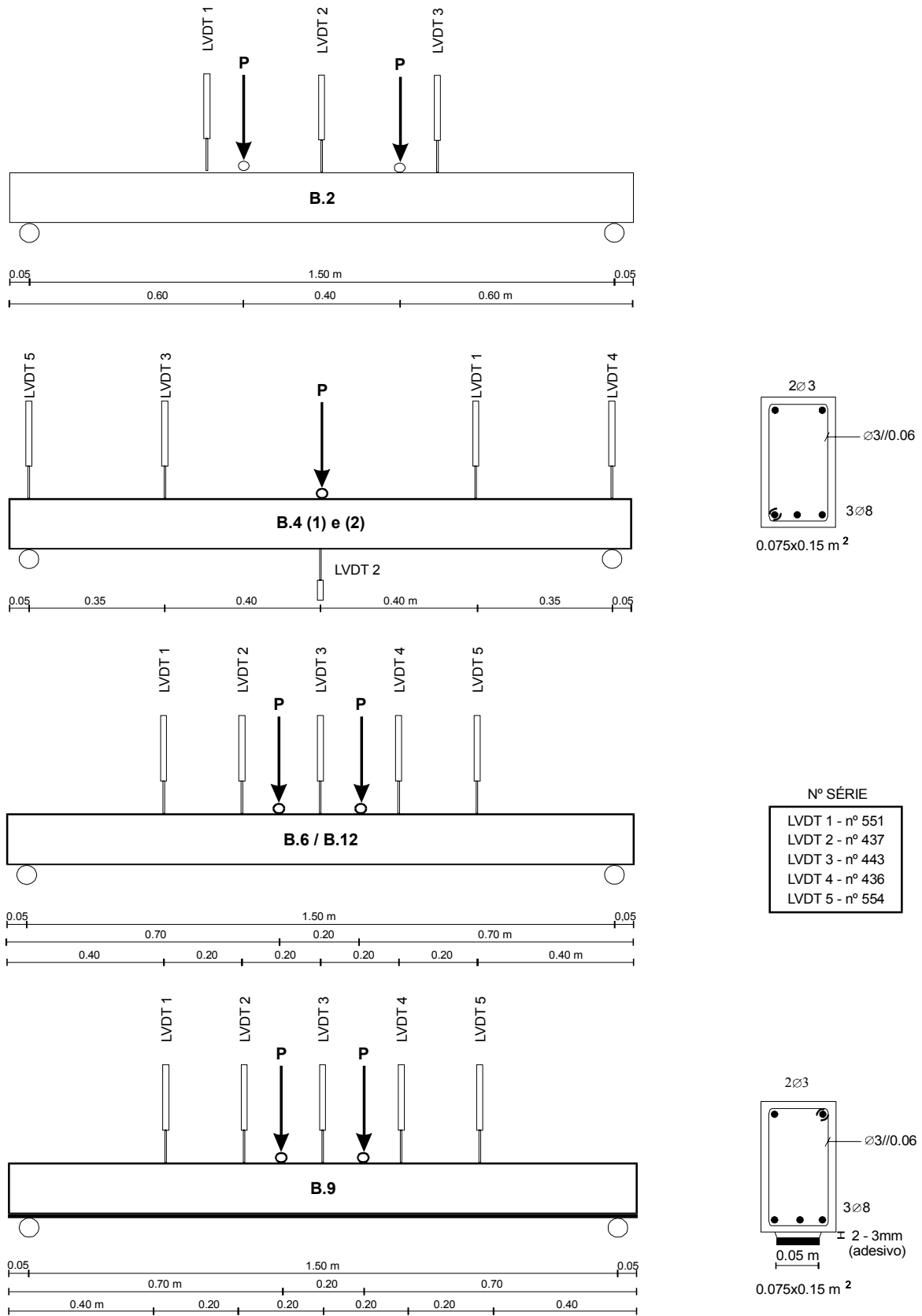
*Viga C.1* – Foi reforçada em todo o comprimento com o laminado de CFRP, antes de ser submetida ao ensaio de carga;

*Viga C.2* – Foi sujeita a um estado de pré-fendilhação através de um ensaio de flexão em quatro pontos, seguido de descarga (1ª fase). Posteriormente, foi reforçada na face traccionada com um laminado de CFRP (2ª fase) e, por último, voltou a ser submetida ao ensaio de carga (3ª fase);



a) Vigas com 2 $\phi$ 3 para armadura de tracção

Figura 3.6 - Geometria, armadura e instrumentação dos modelos de vigas *tipo B* segundo o *caso (a)*.



Viga B.9

b) Vigas com  $3\varnothing 8$  para armadura de tracção

Figura 3.6 – Geometria, armadura e instrumentação dos modelos de viga *tipo B* segundo o caso (b).

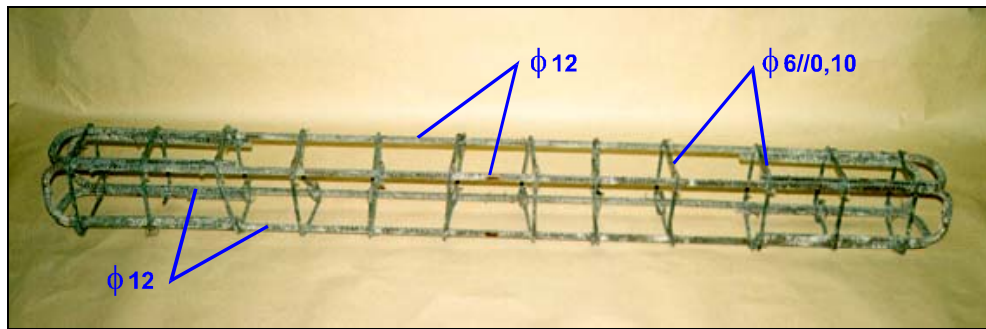


Figura 3.7 – Armadura das vigas tipo C.

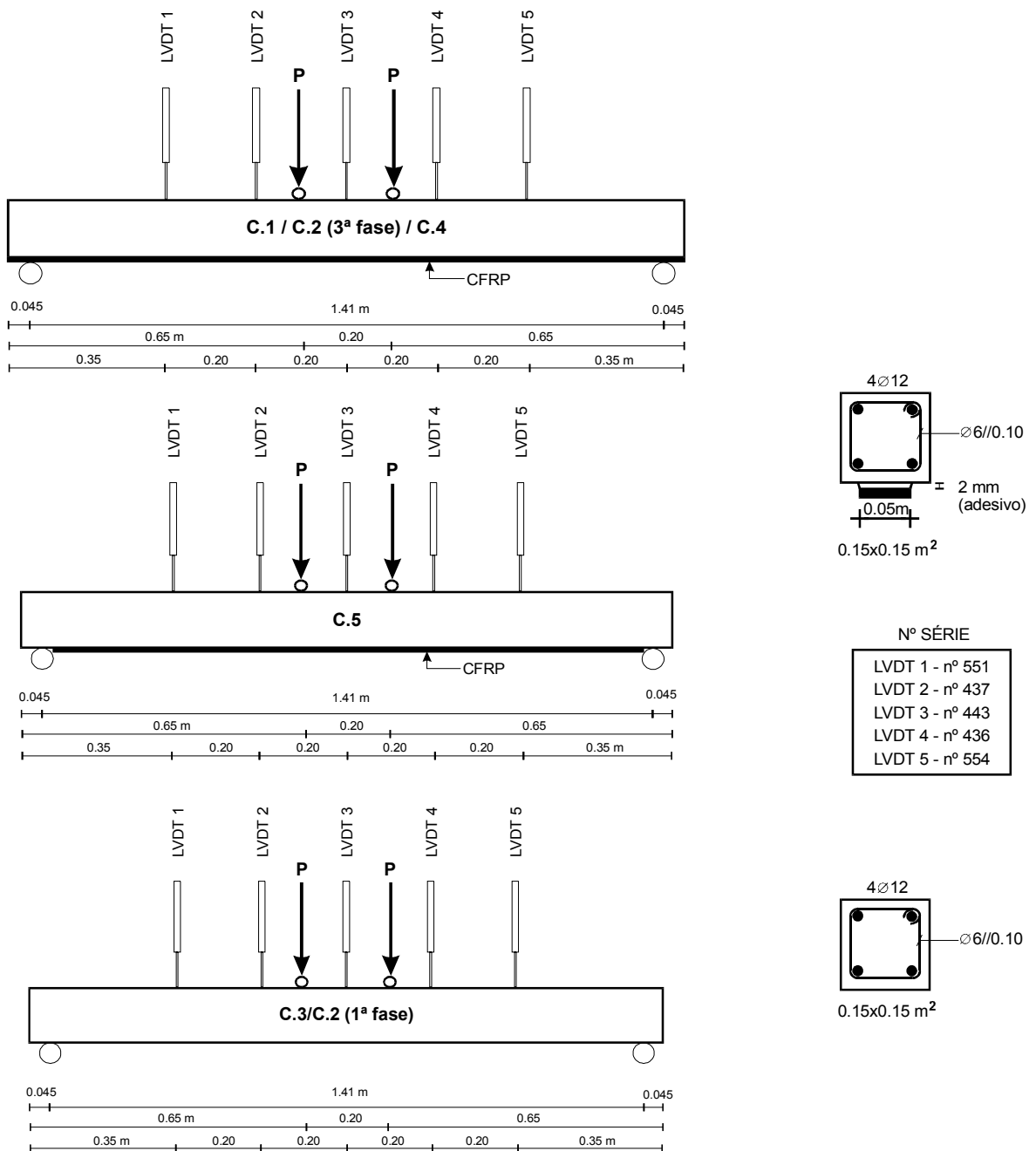


Figura 3.8 – Geometria, armadura e instrumentação dos modelos de vigas tipo C.

*Viga C.3* – Não foi reforçada para se estabelecer o termo de comparação com as vigas anteriores;

*Viga C.4* – Foi reforçada nas mesmas condições que a viga *C.1* e ensaiada um ano após a exposição às condições ambientais do laboratório;

*Viga C.5* – Foi interpretada com as condições semelhantes à da viga *C.1*, excepto no valor do comprimento do laminado que está indicado na Figura 3.8.

Depois da descrição das três séries que constituem os modelos de viga de betão armado, na Tabela 3.3 resume-se os valores da percentagem de aço, utilizados como armadura à tracção ( $\rho_s$ ), à compressão ( $\rho_s'$ ) e ao esforço transversal ( $\rho_w$ ), a percentagem de laminado ( $\rho_L$ ) usada no reforço de cada série tipo em relação à área de betão e, ainda, a análise relativa de rigidez entre o CFRP e a armadura de tracção.

Tabela 3.3 - Resumo das armaduras das vigas.

Modelos de viga	Armadura de aço			Armadura de reforço		$A_L E_L / A_s E_s$ [iii]
	$\rho_s'$ (%)	$\rho_s$ (%)	$\rho_w$ (%) [iv]	material [ii]	$\rho_L$ (%)	
<i>Tipo A</i>	2.680	[i]	0.93	laminados <i>CarboDur S 512</i>  - largura = 50 mm - espessura = 1.2 mm	0.400	-
<i>Tipo B (caso a)</i>	1.340	0.126	0.31 (0.19)		0.533	3.40
<i>Tipo B (caso b)</i>	0.126	1.340	0.31		0.533	0.32
<i>Tipo C</i>	1.0	1.0	0.37		0.267	0.21

[i] - A armadura de  $\phi 10$  não é considerada para efeitos de flexão (Figura 3.3);

[ii] - Características do compósito descritas no item 3.3.3.1;

[iii] - Tomado  $E_L = 160 \text{ GPa}$  e  $E_s = 200 \text{ GPa}$ ;

[iv] - Percentagem de armadura de esforço transversal, sendo o (valor) definido para a viga *B.13*.

### 3.1.2.2 - Série de faixas de laje

Para se atingir os objectivos definidos no trabalho de investigação em curso, foram executadas três séries de faixas de laje de betão armado, compostas por quatro modelos em cada série. As faixas têm as dimensões médias de  $8 \times 44 \times 178.5 \text{ cm}^3$ , devido a pequenos desvios nas cofragens. A série tipo *N*, modelo de referência, é constituída por faixas de betão armado com  $6\phi 6 \text{ mm}$  de armadura de tracção (Figura 3.9). Os modelos de betão armado, que integram as outras duas séries, apresentam a armadura mínima de tracção de  $3\phi 6 \text{ mm}$  (Figura 3.9) e, posteriormente, são reforçadas com dois sistemas de material compósito de CFRP unidireccional, o laminado *CarboDur S 512* para a série tipo *S* e a manta flexível pré-impregnada *Replark 20* para a série tipo *R*.



Figura 3.9 – Aspecto geral da armadura das lajes tipo *N*, *R* e *S*.

Da totalidade dos modelos betonados, este trabalho reporta-se, exclusivamente, ao comportamento dos seis modelos a descrever neste item. As Figuras 3.10 e 3.11 apresentam os modelos de laje referidos e discriminam as características geométricas, a armadura, o tipo de reforço com material compósito, o tipo de solicitação e o sistema principal de instrumentação dos ensaios em análise. Informações complementares sobre os modelos encontram-se resumidos nas Tabelas 3.4 e 3.5, com a indicação das designações, dos critérios de reforço e da geometria. Os restantes, isto é, as lajes tipo *LA1M* e *LA2M*, tipo *LA3R* e *LA4S* e tipo *LB1R* e *LB2S*, serão objecto de análise numa 2ª Fase dos trabalhos, não contemplados nesta dissertação (Juvandes et al., 1998-f).

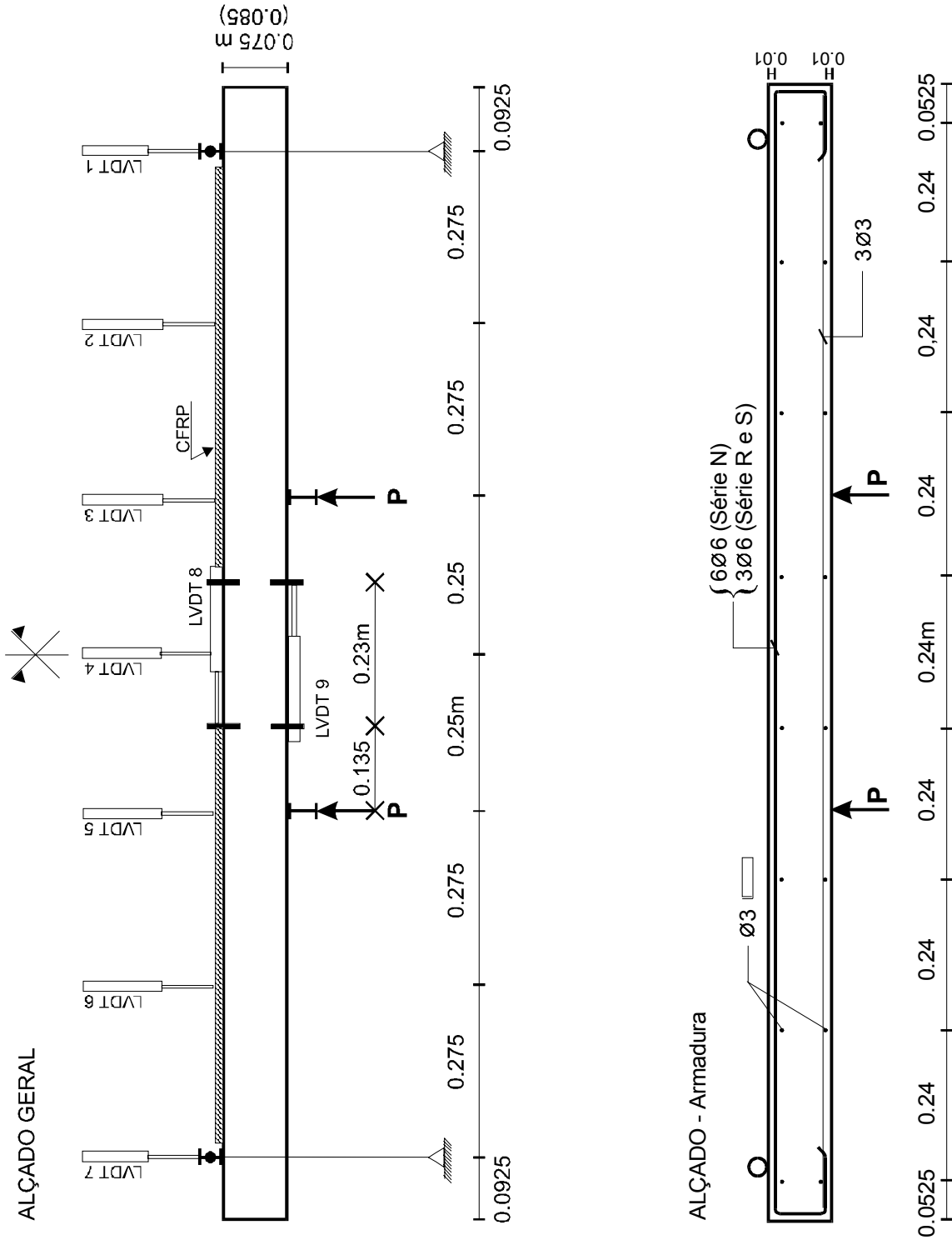


Figura 3.10 – Informações gerais sobre as faixas de laje (alçados).

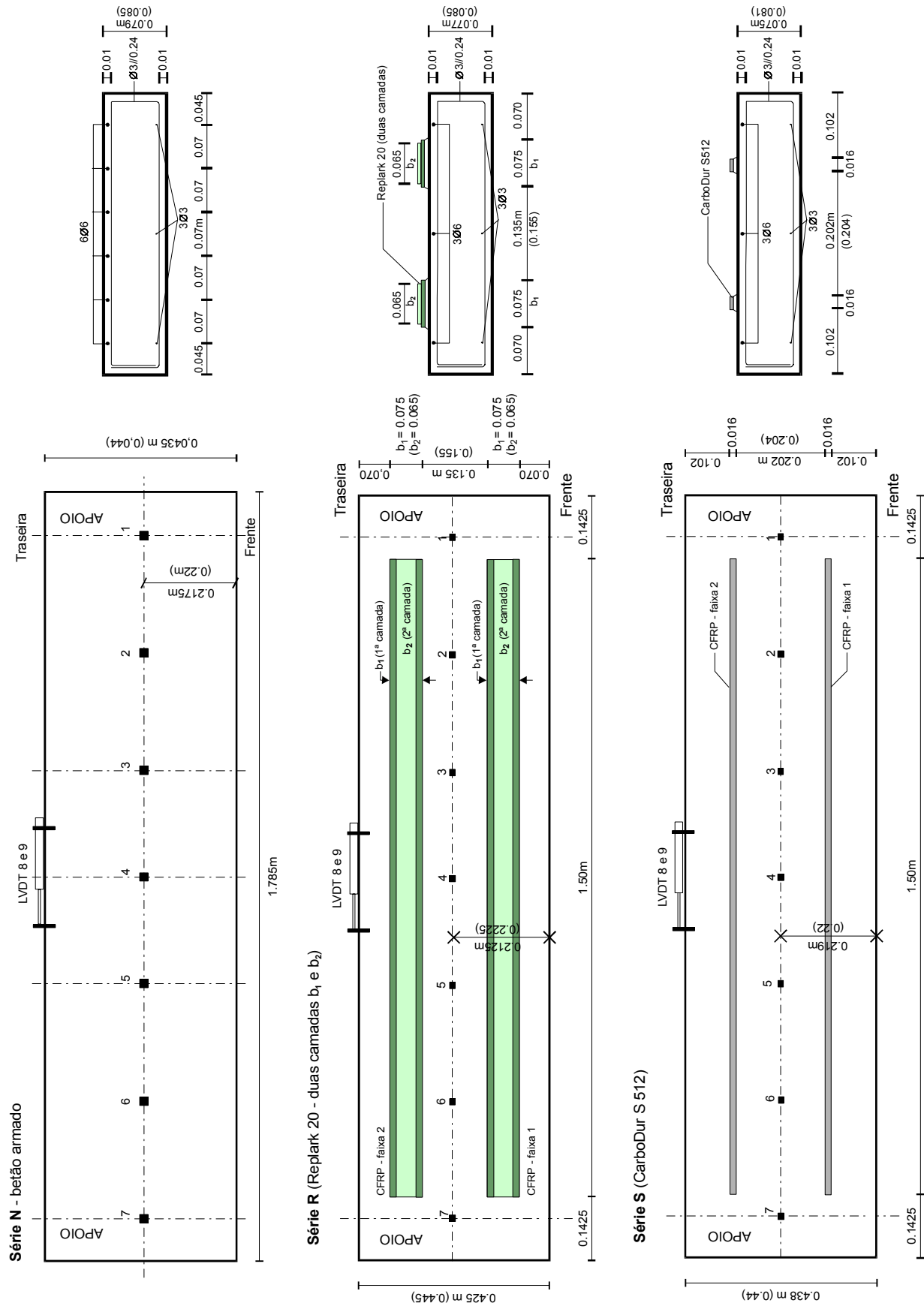


Figura 3.11 - Informações gerais sobre as faixas de laje (plantas e secções).



Neste estudo, pretende comparar-se o desempenho do modelo de referência (série *tipo N*) com os modelos reforçados (séries *tipo R* e *S*), submetendo-os a ensaios de flexão em quatro pontos.

Tabela 3.4 - Modelos de laje em estudo.

Lajes tipo		Armadura mínima $\rho_s$ (%) [i]	Reforço das lajes			Betão classe	Observações	
			material	aço $\rho_s$ (%) [i]	compósito $\rho_L$ (%) [i]			
Série N	LB3N LB4N	0.25	Varões 3 $\phi$ 6	0.25	-	C45/55	Série de referência	1ª Fase
Série R	LC3R LC4R		Replark 20	-	0.088	C50/60	Série reforçada com manta flexível	
Série S	LC1S LC2S		CarboDur S 512	-	0.11	C50/60	Série reforçada com laminados	
Série N	LA1M LA2M	0.25	-	-	-	C45/55	Série com armadura mínima	2ª Fase [ii]
Série R	LA3R LB1R		Replark 20	-	0.088		Pré-fendilhada depois reforçada	
Série S	LA4S LB2S		CarboDur S 512	-	0.11			

[i] -  $\rho_s = A_s/A_c$ ;  $\rho_L = A_{CFRP}/A_c$ , onde  $A_s$ ,  $A_{CFRP}$  e  $A_c$  são áreas do aço, do CFRP e do betão;

[ii] - Fase não contemplada nesta tese porque os ensaios serão objecto de um futuro projecto de mestrado.

Tabela 3.5 - Dimensões e pesos das faixas de laje ensaiadas (só a 1ª Fase).

Lajes tipo	Dimensões (m)			Peso próprio (kN)
	largura	altura	comprimento	
LB3N	0.439	0.0850	1.785	1.67
LB4N	0.435	0.0820		1.59
LC3R	0.428	0.0805	1.785	1.54
LC4R	0.443	0.0774		1.53
LC1S	0.439	0.0805	1.785	1.58
LC2S	0.438	0.0842		1.65

## 3.2 - INSTRUMENTAÇÃO EM GERAL

De uma forma simplificada, esta secção descreve os equipamentos e os respectivos acessórios usados na instrumentação dos ensaios, que integram as tarefas do programa de trabalho proposto nesta tese. Esta descrição envolve os ensaios de caracterização dos materiais utilizados, os ensaios destrutivos e não destrutivos de caracterização de modelos já existentes e os ensaios de flexão efectuados nos vários modelos experimentais de betão armado, reforçados ou não com materiais compósitos.

Os equipamentos e os respectivos ensaios usados no trabalho foram disponibilizados por vários laboratórios da FEUP, descritos na introdução deste Capítulo, como LE, LEMC, INEGI (CEMACOM) e DEMEGI (LOME).

### 3.2.1 - Identificação dos equipamentos

Os ensaios de caracterização dos materiais foram repartidos pelos quatro laboratórios referidos de acordo com a sua especificidade, utilizando-se, para o efeito, os equipamentos seguintes:

- 1) *A prensa servo-comandada em circuito fechado da série 315 da MTS com capacidade de 2700 kN* (descrição detalhada no trabalho de Barros, 1995) - ensaios de compressão com ou sem vários ciclos, para determinação do módulo de elasticidade de provetes (cubos, cilindros, prismas ou carotes) de betão e de adesivo (Figura 3.12) (LE);
- 2) *A prensa de compressão até 300 toneladas da LOSENHAUSEN (LOS)* - ensaios de compressão (cubos e cilindros) e de compressão diametral (cilindros) de provetes de betão (LEMC);
- 3) *A máquina de flexão tipo BP 100 (FORM + TEST) até 10 toneladas da SEIDNER* - ensaios de flexão em prismas normalizados de betão (LEMC);
- 4) *A máquina universal de 5 toneladas da AMSLER FRÉRES com acessório para flexão* - ensaios de flexão em prismas de 4 x 4 x 16 cm<sup>3</sup> de adesivo (LEMC);
- 5) *A máquina universal de 5 toneladas da AMSLER FRÉRES* – ensaios de tracção dos varões de aço (LEMC);
- 6) *A prensa universal servo – hidráulica de 1000 kN da ESH* – ensaio de tracção do laminado de CFRP no LEMC (Figura 3.13);

- 7) *O equipamento de PL-DMTA (MKII Dynamic Mechanical Thermal Analysis) – variação das propriedades do adesivo por análise térmica (Figura 3.14);*
- 8) *O equipamento da SETA para "Bond-test" – ensaios de aderência, arrancamento por tracção ou “pull off” para caracterização do betão à superfície segundo as especificações LNEC FE-Pa36 (1986) e prEN 1542 (1998) (Figura 4.3 do Capítulo 4);*
- 9) *Esclerómetro de SCHMIDT – caracterização da resistência média superficial do betão à compressão.*

Os *ensaios de flexão* dos modelos reforçados foram realizados no Laboratório de Estruturas (LE), com o recurso dos seguintes equipamentos para aquisição dos resultados experimentais:

- 1) *A fonte de alimentação necessária para debitar corrente eléctrica aos vários transdutores;*
- 2) *Os transdutores seguintes:*
  - *2 transdutores de carga ou célula de carga com capacidade de 50 kN (Figura 3.15);*
  - *5 a 9 transdutores de deslocamentos do tipo LVDT, “Linear Variable Differential Transformer”, com curso de  $\pm 25$  mm (Figura 3.16);*
  - *vários medidores de extensão ou extensómetros eléctricos com resistência de  $120\Omega$ , comprimento de 6 mm e com as referências EA-06-250 BG-120 (da MM) e de 1-LY 11-6/120 (da HBM) (Figura 3.17);*
- 3) *As placas de aquisição dos dados dos LVDT, dos extensómetros eléctricos e das células de carga (caixas de ligação para aquisição de dados representadas na Figura 3.18);*
- 4) *A placa tipo “Spider 8” (da Hottinger Baldwin Messtechnik – HBM) de aquisição até 16 extensómetros eléctricos, do Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental (LOME) do DMEGI-FEUP (exposta adiante na Figura 3.20);*
- 5) *A bomba hidráulica e dois macacos hidráulicos para aplicação das cargas;*
- 6) *Um computador que comanda a aquisição de dados e arquivo dos resultados (Figuras 3.19 e 3.20).*

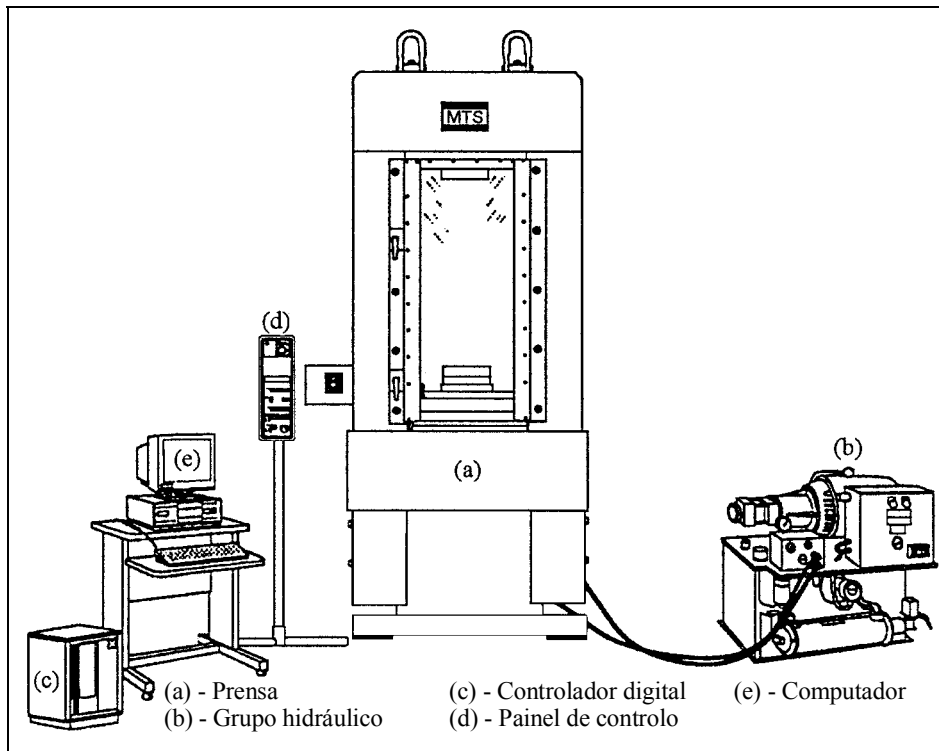


Figura 3.12 – Prensa servo-comandada da série 315 da MTS (Barros, 1995).

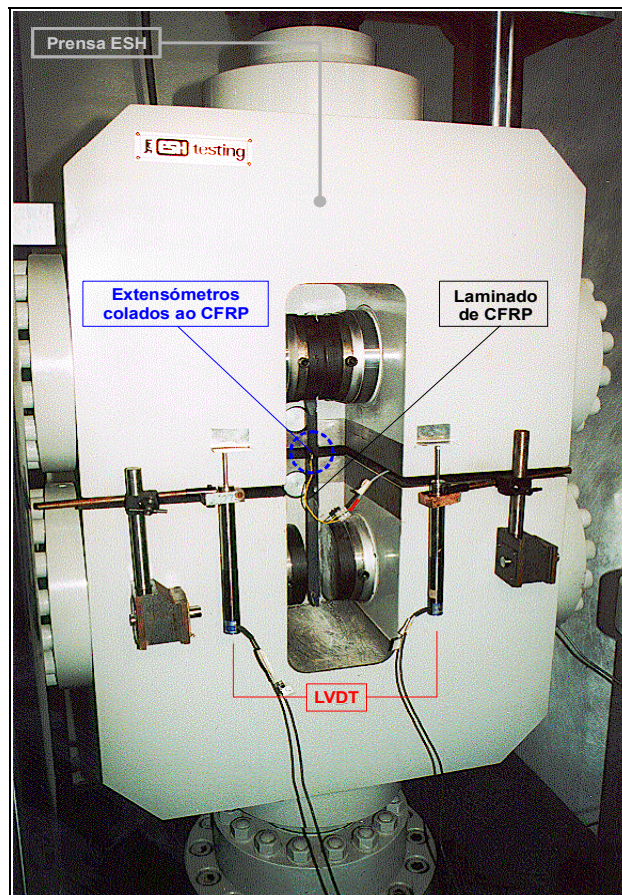


Figura 3.13 – Ensaio de tracção do laminado de CFRP.



Figura 3.14 – Ensaio de DMTA do adesivo (PL-DMTA, 1991).

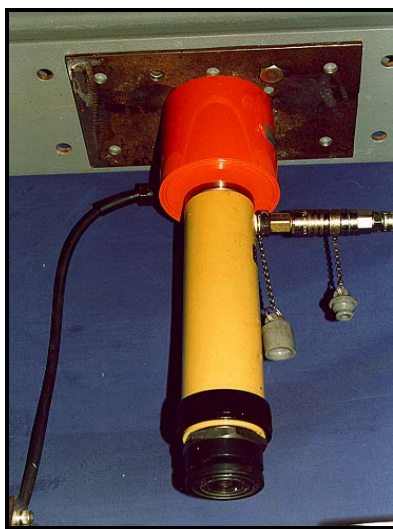


Figura 3.15 – Célula de carga.

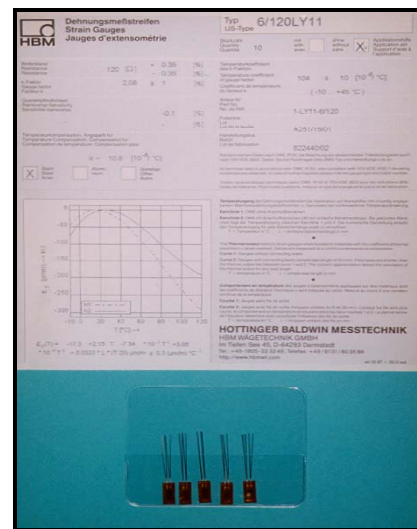


Figura 3.17 – Extensômetros elétricos.



Figura 3.16 – Transdutores do tipo LVDT.



Figura 3.18 – Caixas de ligação.

### 3.2.2 - Instrumentação dos ensaios de flexão

A instrumentação dos modelos ensaiados não foi sempre executada de igual modo, devido, sobretudo, à gestão do equipamento disponível nos laboratórios da FEUP. Na Tabela 3.6, descreve-se o critério de distribuição dos elementos de aquisição dos resultados experimentais. Estes elementos apresentam-se nos esquemas representativos dos modelos de viga (Figuras 3.3, 3.6-a, 3.6-b e 3.8) e de laje (Figuras 3.10 e 3.11) descritos na secção 3.1.2.

Tabela 3.6 – Instrumentação dos ensaios.

Modelos experimentais	INSTRUMENTAÇÃO (tipo e nº de aparelhos)		
	célula de carga	LVDT	extensómetros
<i>Série de vigas [i]</i>			
<b>B.1, B.2</b>	2	5	sem
<b>A.1, A.2 B.4(1), B.4 (2) C.1, C.2, C.3</b>	2	5 ou 6	sem
<b>A.3, A.4 B.3, B.5 a B.13 C.4, C.5</b>	2	5 ou 6	10 a 16
<i>Série de faixas de laje [ii]</i>			
<b>Tipo N</b> (betão armado)	2	9	sem
<b>Tipo R</b> (com Replark 20)	2	9	15
<b>Tipo S</b> (com CarboDur S 512)	2	9	15

[i] - De acordo com o relatório de Juvandes et al. (1998-a); [ii] - De acordo com o relatório de Juvandes et al. (1998-b).

Os modelos foram ensaiados num pórtico constituído por perfis metálicos com suficiente capacidade de carga, conforme se ilustram nas fotografias dos ensaios representados na Figura 3.19 (para uma viga) e na Figura 3.20 (para uma laje). As acções actantes no pórtico correspondem a um sistema de forças auto-equilibrado, com segurança garantida e deformações esperadas diminutas, em função das dimensões e ligações das peças metálicas constituintes, conferindo-lhes uma rigidez muito superior à dos modelos de ensaio.

Para se observar e registar facilmente o desenvolvimento da fendilhação e dos modos de ruína do compósito CFRP, as faixas de laje foram carregadas de baixo para cima.





Figura 3.19 – Aspecto geral da instrumentação do ensaio de flexão de uma viga.

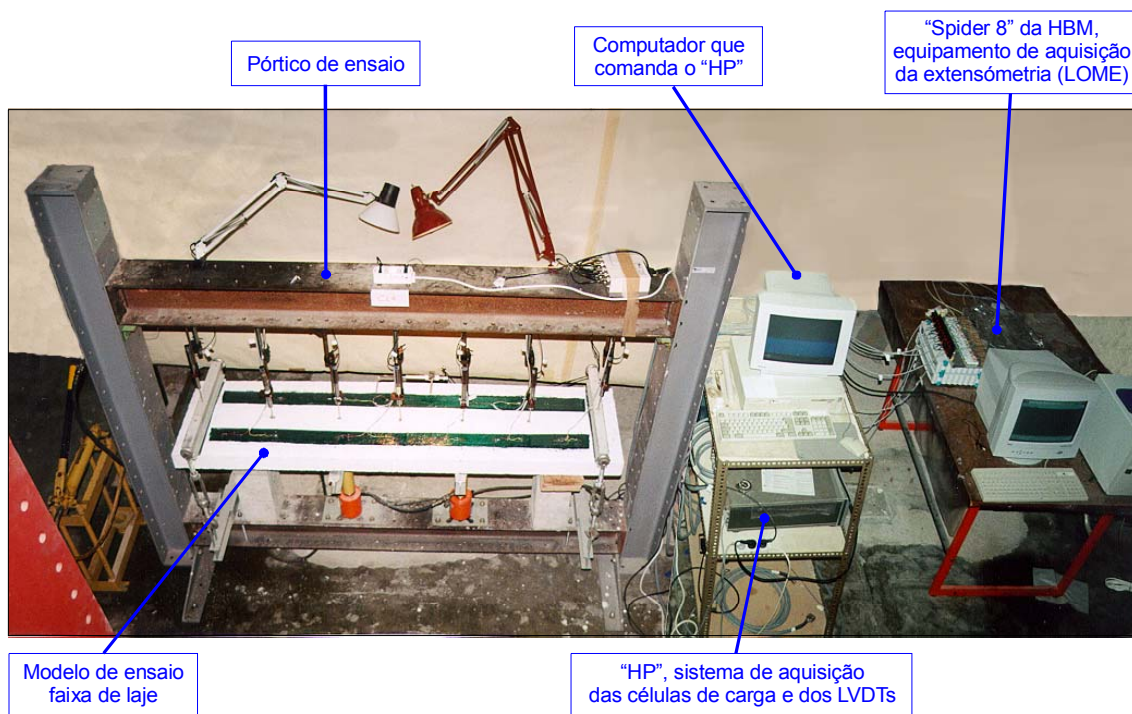


Figura 3.20 – Aspecto geral da instrumentação do ensaio de flexão de uma laje.

Todos os equipamentos foram instalados nos modelos de ensaio (vigas e faixas de laje) de uma forma cuidada, procurando evitar-se a ocorrência de factores estranhos àqueles. O aspecto geral da instrumentação dos ensaios de flexão está exposto nas fotografias das Figura 3.21 a 3.23, para as vigas *tipo A*, *tipo B* e *tipo C* e ilustra-se nas fotografias das Figuras 3.24 a 3.26 para as lajes *tipo N*, *tipo R* e *tipo S*, respectivamente.

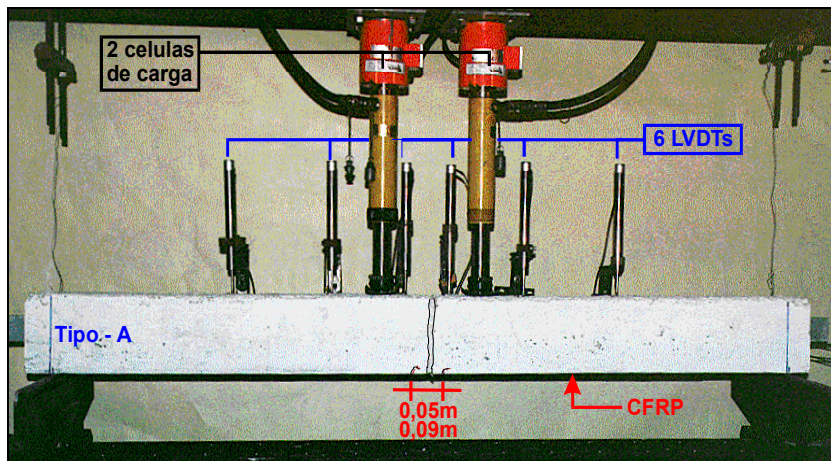


Figura 3.21 – Aspecto geral do ensaio de carga da viga *tipo A*.

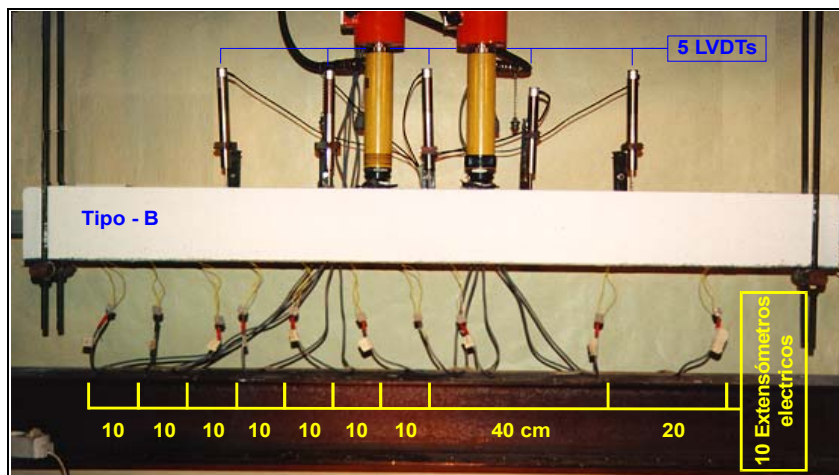


Figura 3.22 – Aspecto geral do ensaio de carga da viga *tipo B*.

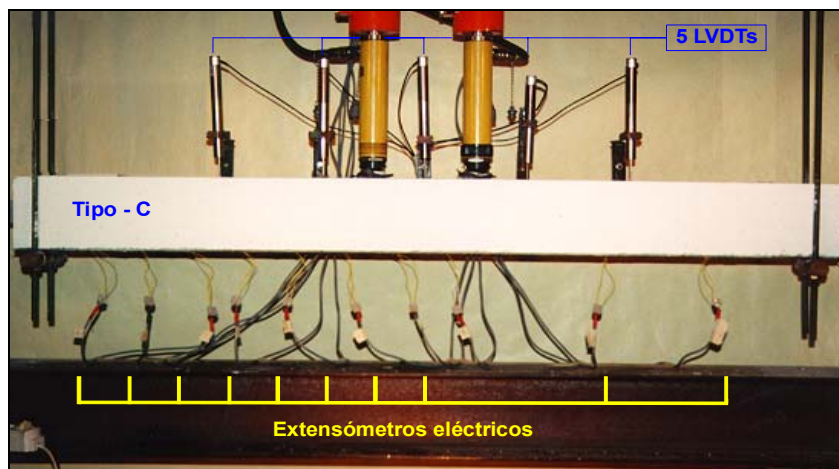


Figura 3.23 – Aspecto geral do ensaio de carga da viga *tipo C*.



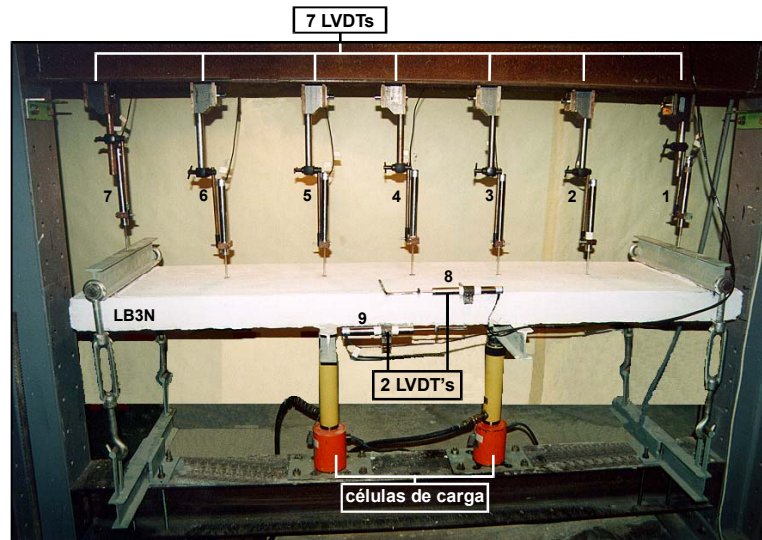


Figura 3.24 – Aspecto geral do ensaio de carga da laje *tipo N*.

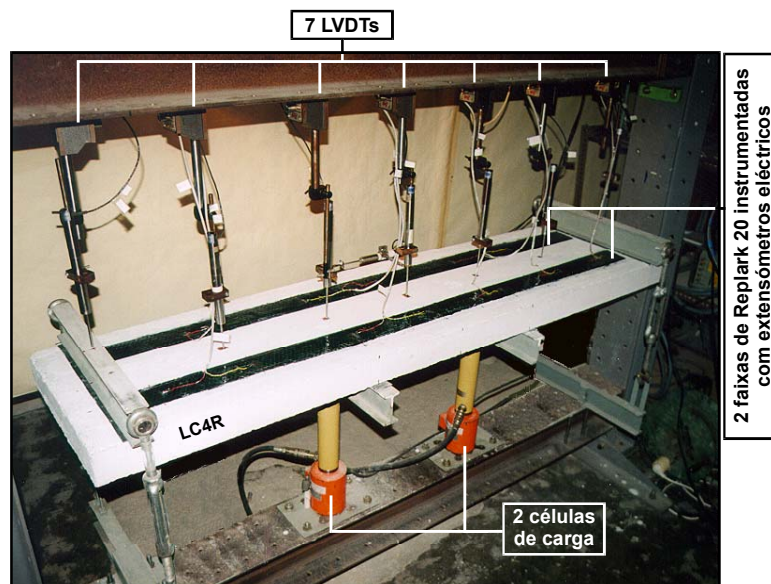


Figura 3.25 - Aspecto geral do ensaio de carga da laje *tipo R*.

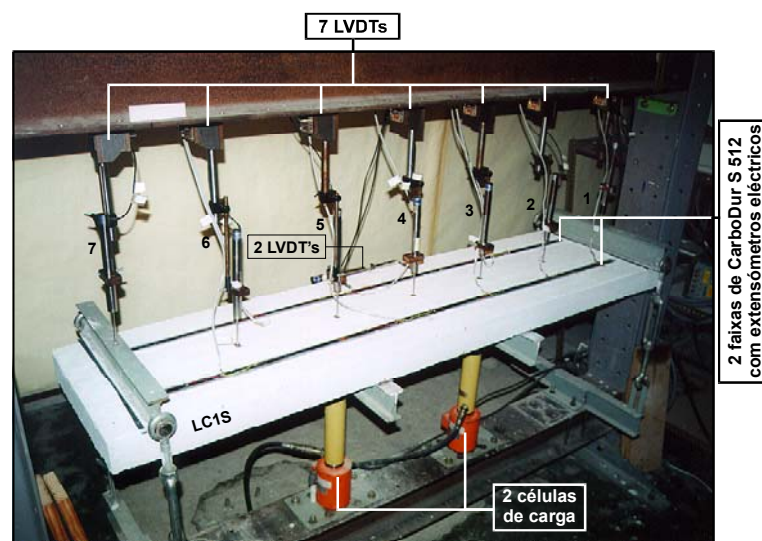


Figura 3.26 - Aspecto geral do ensaio de carga da laje *tipo S*.

Nas Figuras 3.27 e 3.28, observam-se alguns exemplos das plantas com as posições cotadas dos extensómetros eléctricos colados ao longo do compósito de carbono (laminado ou manta), dispostos nas faces da viga ou da laje reforçadas. Plantas semelhantes a estas apresentam-se no anexo A, para os restantes modelos de vigas em estudo. Cada planta representa o critério adoptado para as séries *tipo A*, *tipo B*, *tipo C*, *tipo R* e *tipo S*. Em cada caso, pode ler-se a referência e as constantes *K* de calibração dos extensómetros utilizados nesses ensaios. Estas informações são necessárias para o tratamento posterior dos resultados recolhidos a partir desses transdutores de deformações e que serão descritos no Capítulo 5.

**PLANTAS COM A POSIÇÃO DOS EXTENSÓMETROS COLADOS NO CFRP**

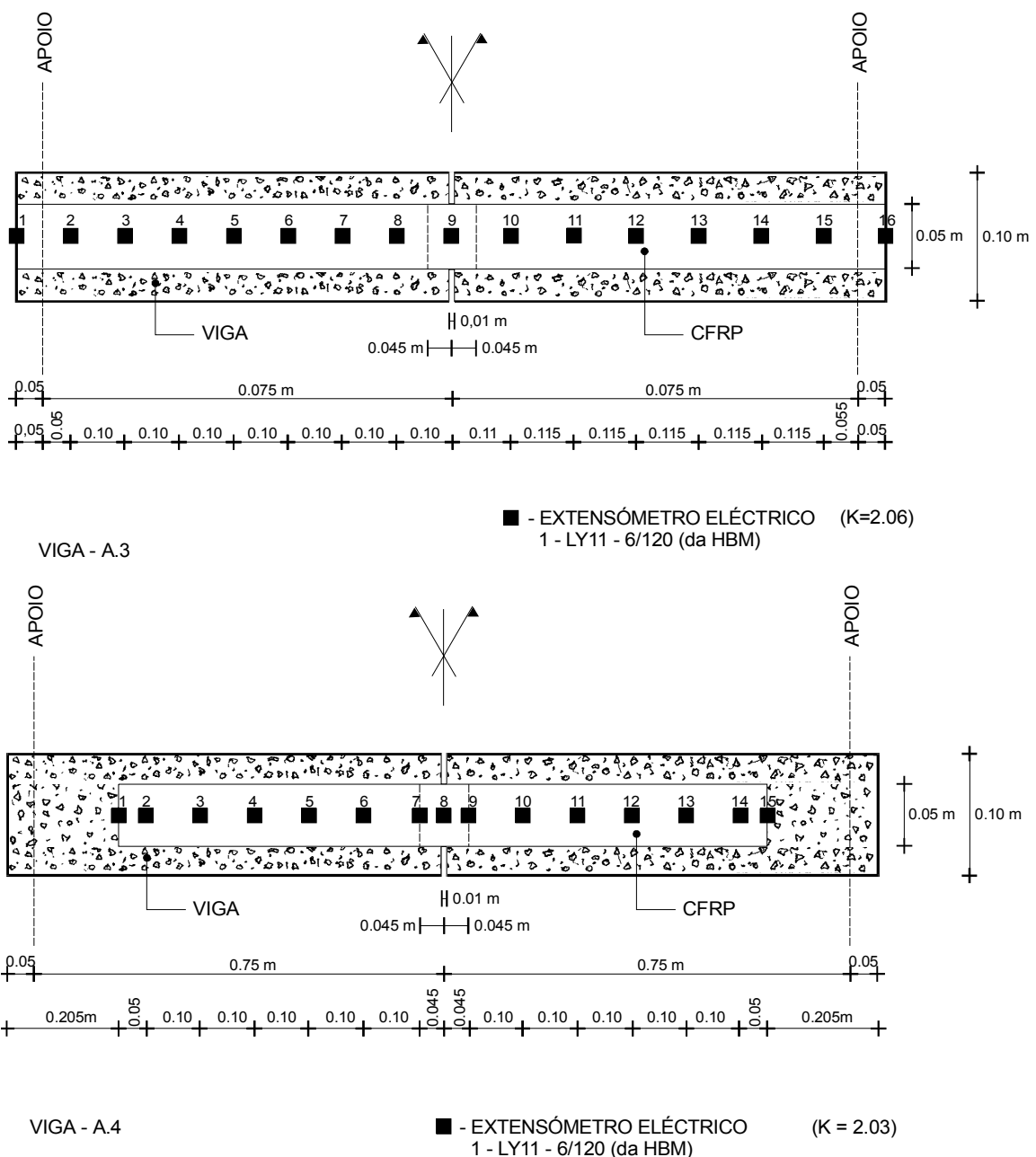


Figura 3.27 – Plantas com a posição dos extensómetros eléctricos colados ao laminado de carbono (vigas A.3 e A.4).

**PLANTAS DOS EXTENSÓMETROS**

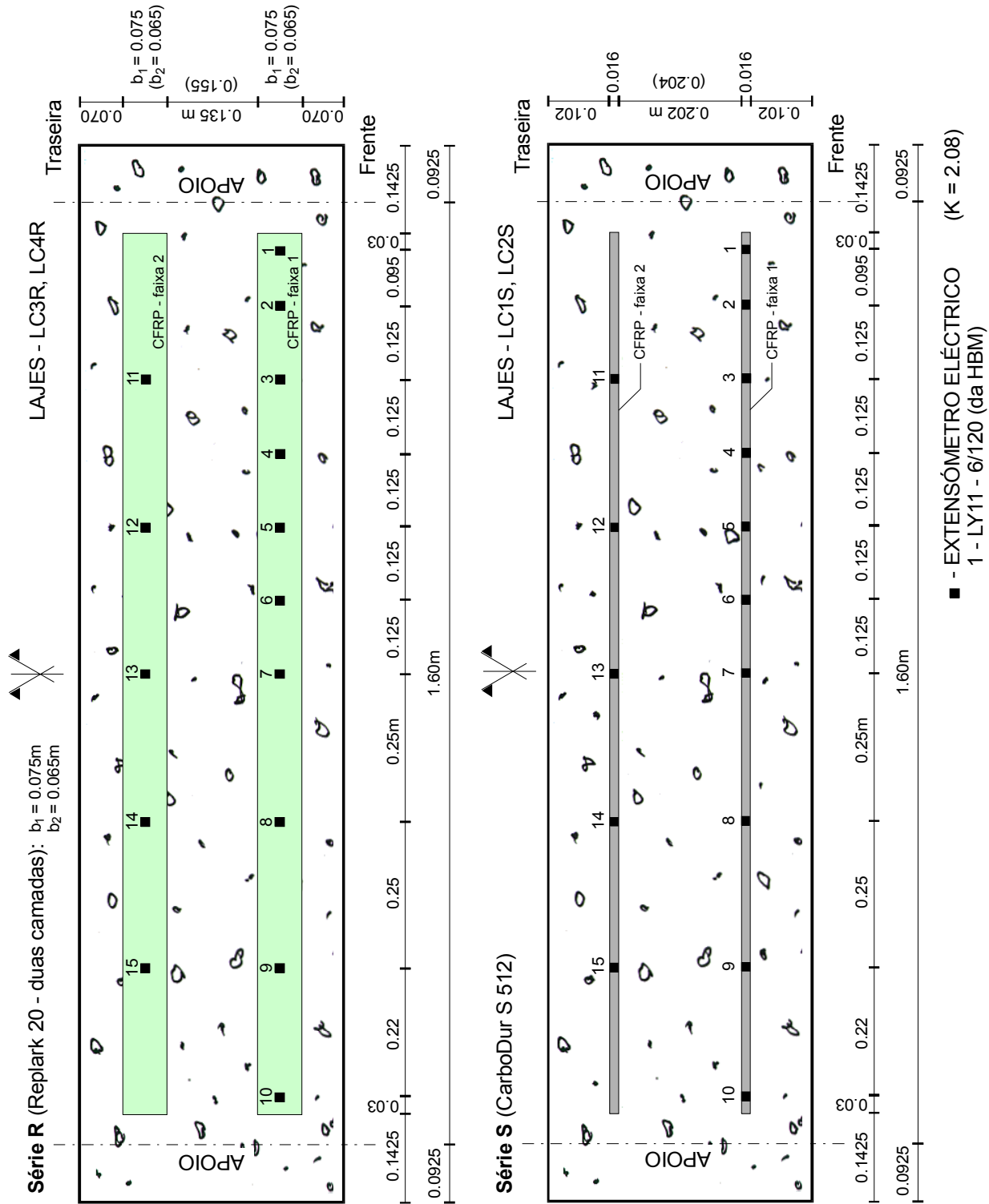


Figura 3.28 - Plantas com a posição dos extensómetros eléctricos colados na manta *Replark 20* e no laminado *CarboDur S 512*.

### 3.3 - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Nesta secção, apresenta-se o trabalho de caracterização dos materiais, intervenientes na execução dos modelos experimentais utilizados nos vários ensaios do programa de investigação. Os materiais estão agrupados, segundo os quatro constituintes principais dos modelos em análise: o betão (item 3.3.1), o aço (item 3.3.2), o compósito de CFRP (item 3.3.3) e o adesivo de ligação ou a resina de saturação e de colagem (item 3.3.4).

O vasto programa experimental distribui-se por duas etapas distintas, abrangendo, primeiro, os modelos de viga e, depois, os modelos de faixas de laje. Deste modo, a caracterização dos materiais responsáveis pela concepção destes é discriminada em consonância com essas duas etapas.

#### 3.3.1 - Betão

A composição e a amassadura do betão são distintas de modelo para modelo, de acordo com o plano de investigação ( Tabela A.1 do anexo A) e os recursos disponíveis no laboratório.

##### 3.3.1.1 - Série de vigas

As vigas de betão armado, utilizadas como modelos experimentais a analisar à flexão, resultaram de várias fases de amassadura. Algumas delas são anteriores ao início deste programa de investigação. Por um lado, causas como as limitações de espaço, de material em stock, de equipamento disponível e a possibilidade de se dispor de modelos de vigas sobrantes de outros programas de investigação, permitiram constituir a gama de vigas tipo já referidas.

Para as vigas *tipo A*, procurou-se um betão semelhante ao correntemente utilizado na construção civil, isto é, um betão tipo *C25/30*, de modo a estudar-se a interface betão/adesivo. Nas vigas *tipo B*, são usados os modelos experimentais simples de betão armado estudados noutros trabalhos no Laboratório de Estruturas (LE) da FEUP-DECivil. O grupo de vigas seguinte, *tipo C*, é um modelo disponível de outros projectos de investigação já concluídos. Estas existem desde 1990, apresentam sinais de alguma degradação e conhece-se pouco sobre a sua constituição. O betão desses modelos foi caracterizado mais tarde através de ensaios *destrutivos* e *não destrutivos* e descrito com detalhe em trabalhos de Juvandes et al. (1997-b; 1998-a, 1998-c), sobre a análise experimental das vigas *tipo C*.

Na Tabela A.2 do anexo A, apresenta-se a composição do betão usado na confecção das várias amassaduras numeradas por ordem cronológica e conforme a betonagem dos modelos tipo de vigas.

Para caracterizar as propriedades mecânicas do betão resultante de cada amassadura, moldaram-se provetes cúbicos ( $0.15 \times 0.15 \times 0.15 m^3$ ), cilíndricos ( $\phi 0.15 \times 0.30 m^2$ ) e prismáticos ( $0.15 \times 0.15 \times 0.55 m^3$ ) que foram ensaiados, com diferentes idades (7 dias, 28 dias e nas datas de ensaio das vigas), à compressão, à flexão e foi determinado o módulo de elasticidade à compressão segundo as especificações do LNEC E226, E227 e E397, respectivamente. Os valores obtidos nesses ensaios foram interpretados e resumidos, para que possam ser usados em análises numéricas posteriores. Devido a limitações na disponibilidade do número de provetes necessários por norma para análise, determinaram-se algumas propriedades mecânicas do betão recorrendo a expressões aproximadas propostas pela literatura especializada. Foi necessário transformar as resistências médias à compressão de cubos em cilindros, as resistências médias à tracção na flexão em tracção axial (simples), foram calculadas as resistências características e interpolados valores de propriedades para datas desejadas ao longo do tempo (28 dias ou outras). Tais modificações obedeceram aos critérios propostos pelo Eurocódigo 2 (1991), pela Norma Portuguesa NP-ENV 206 (1993) e pelas relações ao longo do tempo, referidas na versão final do Código Modelo 1990 (CEB-FIP, 1993).

No trabalho "Comportamento experimental de vigas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP" de Juvandes et al. (1998-a) apresentam-se as tabelas que discriminam, segundo a data e o número de amassadura, toda a informação disponível relativamente aos provetes moldados, aos ensaios executados, aos resultados obtidos e às propriedades mecânicas experimentais resultantes dos mesmos. Por se tratar de uma base de dados extensa, estas tabelas não são incluídas na tese.

*(i) - Série de vigas recentes (tipo A e tipo B)*

Nesta série, incluem-se os modelos de betão com menos de um ano de idade, distintos do grupo de vigas existentes no laboratório LE há oito anos (série *tipo C*) e a caracterizar, posteriormente. No sentido de se estabelecer as principais propriedades das amassaduras efectuadas na execução dos modelos de flexão e de se permitir que estes sejam usados em cálculos numéricos, resumem-se nas Tabela 3.7 e Tabela 3.8 as características do betão aos 28 dias e as características do betão previstas nas datas de ensaio das vigas (*j* dias). Apesar de não se incluírem neste grupo de vigas, apresenta-se na mesma tabela, os resultados da série *tipo C* para o confronto directo de propriedades entre os três tipos.

Tabela 3.7 – Resumo das características do betão aos 28 dias.

Amassadura n°	Viga	$f_{cm}$ (MPa)	$f_{ck}$ (MPa)	$f_{ctm}$ (MPa)	$E_{cm}$ (GPa)	Classe de Betão
<b>Vigas tipo A</b>						
③	A.1	28.8	23.8	2.4	29.1	C20/25
④	A.2	38.8	33.8	3.1	32.1	C30/37
⑤	A.3, A.4	31.7	26.7	2.7	30.0	C25/30
<b>Vigas tipo B</b>						
②	B.1, B.2	26.7	21.7	2.3	28.3	C20/25
⑥	B.3, B.4, B.13	36.3	31.3	2.9	31.4	C30/37
⑦	B.5, B.6	33.7	28.7	2.8	30.6	C25/30
⑧	B.7, B.8	33.6	28.6	2.8	30.6 (33.8)	C25/30
⑨	B.9, B.10	31.3	26.3	2.6	29.9 (32.1)	C25/30
⑩	B.11, B.12	30.0	25.0	2.5	29.5 (31.2)	C25/30
<b>Vigas tipo C</b>						
①	C.1, C.2, C.3 C.4, C.5	16.5	11.5	1.5	24.2	Inferior a C12/16

(valor) - valores médios experimentais de  $E_c$  quando existe ensaio.

Nesta Tabela os símbolos tem o significado seguinte:

$f_{cm}$  - resistência média à compressão em cilindros;

$f_{ck}$  - resistência característica especificada na NP-ENV 206 para conjuntos de 3 amostras;

$f_{ctm}$  - resistência média à tracção simples (Eurocódigo 2)  $\cong 0.30(f_{ck,28})^{2/3}$ ; [Eq-3.17]

$E_{cm}$  - módulo de elasticidade médio em cilindros (Eurocódigo 2)  $= 9.5 (f_{cm})^{1/3}$ . [Eq-3.18]

Na Tabela 3.8, a resistência média à tracção por flexão,  $f_{ctm, fl, j}$ , foi estimada a partir da resistência média à tracção simples,  $f_{ctm, j}$ , corrigida pelo factor  $\left(0.6 + \frac{0.4}{h^{1/4}}\right)$  proposto pelo REBAP onde  $h = 0.15m$ .

Tabela 3.8 - Características do betão previstas nas datas do ensaio das vigas ( $j$  dias).

Viga	Idade (dias)	$f_{cm,j}^{cil}$ (MPa)	$f_{ctm,j}$ (MPa)	$f_{ctm,fl,j}$ (MPa)	$E_{cm,j}$ (GPa)
<i>A.1</i>	71	31.6	2.5	3.1	30.5
<i>A.2</i>	68	42.4	3.2	4.0	33.6
<i>A.3, A.4</i>	499	38.4 (47.9)	2.9	3.6	33.0
<i>B.1</i>	280	31.7	2.5	3.1	30.8
<i>B.2</i>	157	30.8	2.4	3.0	30.4
<i>B.3</i>	146	41.8 (45.2)	3.1	3.9	33.7 (36.8)
<i>B.4</i>	43	38.1	2.9	3.6	32.2
<i>B.5</i>	107	38.1	2.9	3.6	32.5
<i>B.6</i>	99	37.9	2.9	3.6	32.4
<i>B.7, B.8</i>	54	36.0 (33.3)	2.8	3.5 (4.4)	31.7
<i>B.9, B.10</i>	67	34.2 (35.8)	2.7	3.3 (4.4)	31.3 (33.0)
<i>B.11</i>	59	32.4 (33.4)	2.5	3.2 (4.3)	30.7
<i>B.12</i>	51	32.0	2.5	3.1	30.5
<i>B.13</i>	153	41.9	3.2	3.9	33.7
<i>C.1, C.2, C.3</i>	2555				
<i>C.4</i>	2800	20.6 (20.7)	1.6	2.0	27.1 (20.5)
<i>C.5</i>	2860				

(valor) - valores médios experimentais das características do betão quando existe ensaio nessa idade.

(ii) - Série de vigas com oito anos (tipo C)

Esta série de vigas existia no laboratório LE há, aproximadamente, oito anos e apresenta um betão poroso e de baixa qualidade, com um certo grau de deterioração. A avaliação destes factos foi efectuada através de ensaios *destrutivos* e *não destrutivos* realizados sobre as vigas, após o ensaio de flexão, tais como extracção de carotes, ensaios de arrancamento por tracção (designados por "pull-off" segundo a pré-norma prEN 1542) na superfície do betão e a diferentes profundidades e análises químicas. Em seguida, apresenta-se a sua descrição e os resultados obtidos, de modo a caracterizar-se o betão e as superfícies intervenientes no comportamento das vigas reforçadas. Entretanto, os ensaios de "pull-off" serão descritos no Capítulo 4, que aborda a caracterização da ligação e da aplicação do material compósito ao betão.

### Ensaio destrutivos

Após o ensaio de flexão, o betão da *viga C.3* foi destruído, com vista a avaliar a qualidade deste e a extrair provetes de aço da armadura corrente usada nesta série de vigas. Em contrapartida, as *vigas C.1, C.2, C.4 e C.5* foram serradas transversalmente formando prismas com dimensões variadas (topo 1, prisma 1, prisma central, prisma 2 e topo 2), de modo a permitir a extracção de carotes de betão (Figura 3.29) e a realizar, posteriormente, os ensaios de "pull-off" a diferentes profundidades. O esquema representativo da geometria desses prismas está exposto na Figura 3.30, para as quatro vigas.

A caracterização das propriedades do betão, no estado em que as vigas foram testadas, foi realizada com base em ensaios de compressão executados sobre as carotes de betão extraídas nas posições indicadas na Figura 3.30, para os quatro casos *C.1 a C.5*.

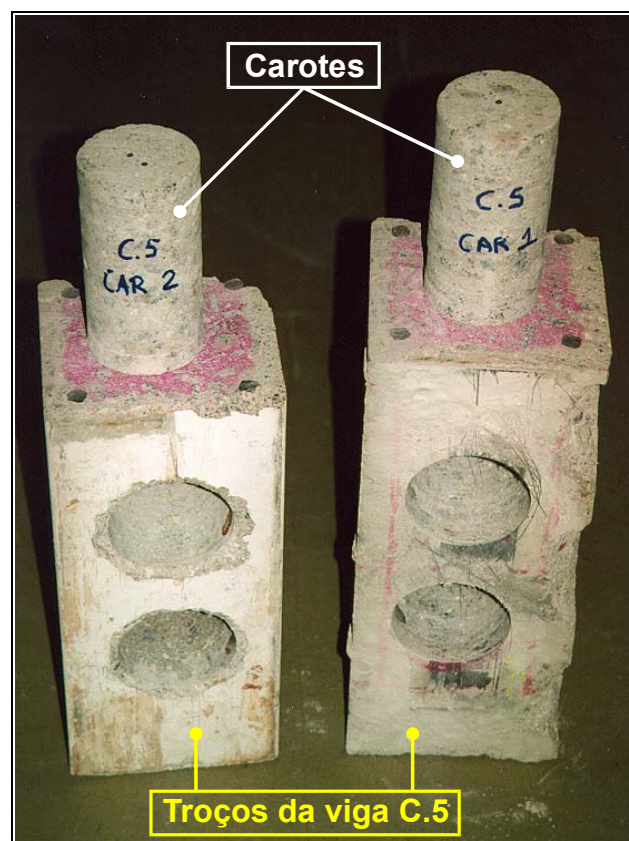


Figura 3.29 – Fotografia com as carotes extraídas à *viga C.5*.

Na publicação de Juvandes et al. (1998-a) apresenta-se o programa dos *ensaios destrutivos* e os respectivos resultados, concluindo tratar-se, em termos gerais, de betões pobres com pouca resistência à compressão e baixo módulo de elasticidade. Admite-se que o estado de fendilhação das vigas tenha intervindo na contribuição destes resultados, apesar do cuidado havido na localização das carotes.



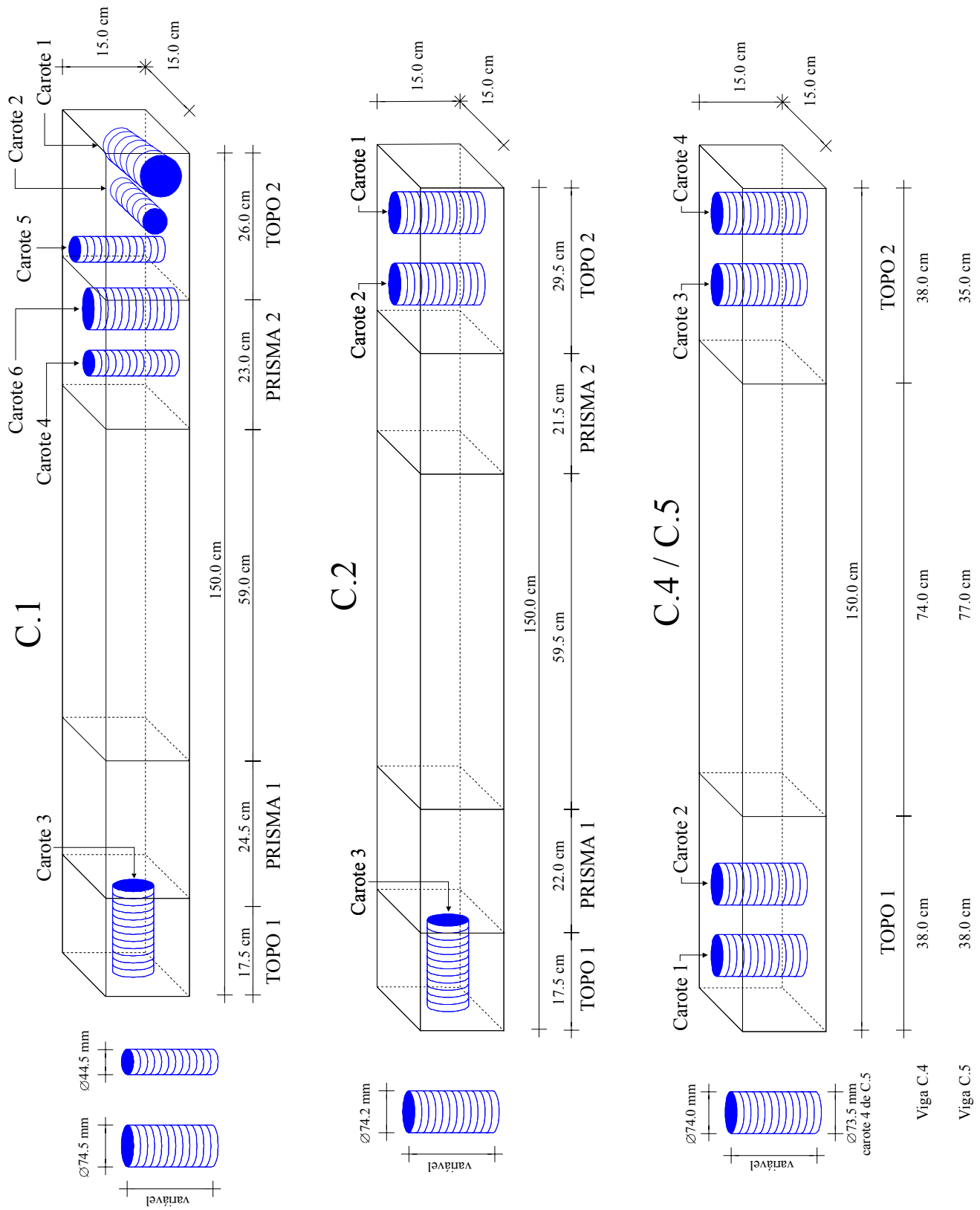


Figura 3.30 – Geometria e localização dos prismas e das carotes de betão nas vigas C.1, C.2, C.4 e C.5.

### **Ensaaios não destrutivos**

Estes ensaios foram efectuados após os ensaios de flexão e com os seguintes objectivos:

- 1) avaliar resistências à tracção superficial do betão (a descrever no Capítulo 4);
- 2) constatar o estado de deterioração (*carbonatação e teor em cloretos*) e o *doseamento do ligante* à data dos ensaios.

Para se poder concluir acerca do segundo objectivo, estes ensaios incluem a realização de testes de análise química. A análise química tem como principal interesse avaliar o estado de deterioração do betão nos primeiros 3 cm de profundidade, em termos de *carbonatação* e de *teor em cloretos* (Coutinho, 1998). Estes dados, acrescidos da informação sobre a quantificação do *doseamento do ligante*, permitem esclarecer sobre o desconhecimento, à partida, da natureza do betão constituinte das vigas *tipo C*.

#### *a) Carbonatação*

Sobre as secções transversais efectuadas nas cinco vigas *C.1* a *C.5*, aplicou-se uma solução aquosa de fenolftaleína com o auxílio de um pincel, que em ambientes com *pH* superior a cerca de 9.5 apresenta a cor rosa forte (Coutinho, 1998). Decorrido um minuto, foi possível observar, nos cinco casos, a demarcação da *zona carbonatada* por contraste com a zona rosada não afectada, como se ilustra na Figura 3.31. O betão das vigas mostra possuir forte carbonatação com uma profundidade entre 2 cm a 3 cm (resultados descritos na publicação Juvandes et al., 1998-a) o que, consequentemente, afectou as armaduras das vigas e o desempenho do betão armado.

O trabalho de Nagataki (1986), que permite relacionar a profundidade de carbonatação esperada com a resistência de betão, ao fim de 15 anos e em condições atmosféricas normais, está expresso no diagrama da Figura 3.32. Segundo este diagrama, a série de vigas *tipo C* com um betão de baixa qualidade (resistência média à compressão de 16.5 MPa aos 28 dias) e conservado no interior do Laboratório deveria apresentar profundidades de carbonatação na ordem dos 3 cm, apenas ao fim de 15 anos. Contudo, esta série de vigas parece estar além das expectativas em matéria de carbonatação, talvez devido à elevada porosidade do betão e às condições de ambiente do laboratório com 50% a 80% de humidade relativa "HR" (condicionantes referidos no trabalho de Coutinho, 1998).



Figura 3.31 – Observação da profundidade de carbonatação nas vigas *tipo C*.

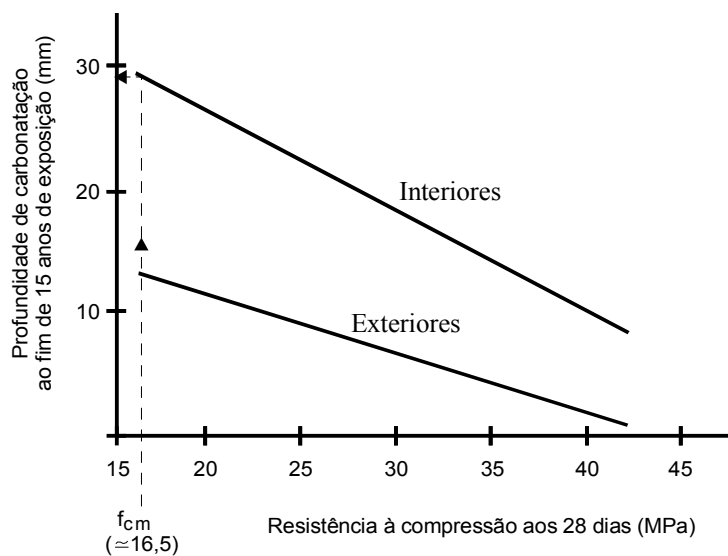


Figura 3.32 – Relação da profundidade de carbonatação esperada ao fim de *15 anos* com a resistência do betão (Nagataki, 1986).

### b) Teor em cloretos e doseamento do ligante

Sobre a zona carbonatada de cada uma das vigas em questão foram extraídas amostras em pó a diferentes profundidades ( $1-2\text{cm}$ ) que, posteriormente, na secção de química do Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção (LEMC) foram analisadas (critérios definidos no trabalho de Coutinho, 1998), de modo a obter-se o *teor em cloretos* e o *doseamento do ligante*. A generalidade dos testes realizados está exposta no trabalho de Juvandes et al. (1998-a) através da indicação do local de extracção das amostras e respectivas profundidades, assim como a descrição dos resultados obtidos. Desta análise concluiu-se existir uma concentração máxima de *cloretos* na ordem de  $C = 0.23\%$  (expressa em relação à massa de cimento), obtida numa amostra da *viga C.5*. Por outro lado, o *doseamento do ligante* apresenta uma dispersão de valores que apenas permite indicar um valor médio representativo da composição das vigas igual a  $18.70\% (\pm 0.40\%)$ .

Na opinião de Coutinho (1998), a presença de cloretos no betão pode despassivar as armaduras se a sua concentração exceder um determinado valor, o *limite crítico*  $C_r$ , pois nesse caso destrói-se a película passiva por abaixamento do valor do *pH* e, então, poder-se-á dar início à corrosão no caso de o oxigénio e humidade serem suficientes. O limite crítico da concentração de cloretos  $C_r$  depende de vários parâmetros como a humidade, a temperatura, a qualidade do betão, o seu grau de carbonatação, o estado da superfície do aço quando é usado na construção (se mais oxidado, mais baixo será o limite crítico), etc., e que se representa numa figura da publicação de (1992) com o título "Durable Concrete Structures, Design Guide" do CEB. Em Portugal, a norma NP-ENV 206 (1993) adopta o limite crítico  $C_r = 0.4\%$  para os elementos de betão armado (% expressa em relação à massa de cimento).

Assim, conclui-se que as vigas *tipo C* apresentam um *teor de cloretos* elevado na espessura analisada de  $1\text{ cm}$  a  $2\text{ cm}$ , embora o valor seja aceitável para as estruturas de betão armado correntes.

Finalizada a descrição dos ensaios *destrutivos* e *não destrutivos*, é possível resumir na Tabela 3.9 os valores médios dos parâmetros que caracterizam o betão da série *tipo C* e que permitem interpretar, mais tarde, os resultados dos ensaios de flexão dos mesmos. Comparando os valores médios de  $f_{cm,j}$  e  $E_{cm,j}$  com os correspondentes obtidos na Tabela 3.8, por aplicação de expressões propostas no Eurocódigo 2 (1991) e no Código Modelo 1990 (CEB-FIP, 1993), constata-se que existe muito boa aproximação entre os resultados experimentais e os previstos, excepto no valor do módulo de elasticidade. Esta discrepância pode dever-se, sobretudo, ao facto de existir um estado de fendilhação introduzido nas vigas após os ensaios de flexão e que, de certa maneira, se manifestou fisicamente nas carotes submetidas aos testes de caracterização do betão.

Tabela 3.9 – Valores médios das propriedades do betão.

VIGAS	BETÃO				
	$f_{cm,j}$ (MPa)	$E_{cm,j}$ (GPa)	Carbonatação (cm)	Cloretos C (%) [i]	Dos. ligante (%)
<i>C.1</i>	19.0	10.5 (*)	2.2	0.0285 (0.15)	24.8 (*)
<i>C.2</i>	20.0	10.6 (*)	2.5	0.0265 (0.14)	19.1
<i>C.3</i>	19.0	10.5 (*)	3.1	0.0250 (0.14)	18.3
<i>C.4</i>	24.1	20.0	2.5	0.0280 (0.15)	18.85
<i>C.5</i>	21.3	21.0	2.5	0.0433 (0.23)	18.52
<i>Média das vigas</i>	20.7	20.5	2.6	0.0302 (0.16)	18.70

[i]- % expressa em termos de massa de betão e (*valor*) em termos de massa de cimento;

(\*)- valor excluído na análise da média.

### 3.3.1.2 - Série de faixas de laje

As faixas de laje de betão armado resultaram de três grupos de betonagem, sendo cada um deles constituído por 4 lajes. Factores como as limitações de espaço, de material em stock, de equipamento disponível e do volume de betão necessário para o enchimento de quatro modelos por betonagem, obrigaram a que se executassem quatro amassaduras com composições muito semelhantes. A Tabela 3.10 indica o critério de execução dos modelos de laje e a sua designação, em função do tipo de reforço a que foram sujeitos, numa fase posterior (consultar a secção 3.1). Nesta tabela, apresentam-se, também, as datas de realização dos ensaios nos "j dias", necessárias à caracterização do betão dos modelos que são objecto de estudo neste trabalho de dissertação (1ª Fase).

As siglas atribuídas às séries designam:

- N - Modelos de betão armado sem reforço exterior;
- R - Modelos com reforço exterior de manta flexível *Replark 20*;
- S - Modelos com reforço exterior de laminado *CarboDur S 512*.

Tabela 3.10 - Critérios de execução, de designação e de ensaios dos modelos de laje.

Betonagem (data)	Amassadura n°	Faixa de laje			Ensaio (j dias)	
		n°	série	designação		
<b>A</b> (13/02/98)	1	Distribuído por 4 lajes	N	LA1M	[i]	2ª Fase
	2			LA2M		
	3		R	LA3R		
	4		S	LA4S		
<b>B</b> (12/03/98)	1	Distribuído por 4 lajes	R	LB1R	[ii]	1ª Fase
	2		S	LB2S		
	3		N	LB3N	98 d	
	4			LB4N	175 d	
<b>C</b> (19/03/98)	1	Distribuído por 4 lajes	S	LC1S	186 d	1ª Fase
	2			LC2S	189 d	
	3		R	LC3R	195 d	
	4			LC4R	182 d	

[i], [ii] - modelos com critérios de estudo a definir numa 2ª Fase dos trabalhos de investigação (publicação para breve).

Para os modelos, procurou confeccionar-se um betão próximo do utilizado na construção de tabuleiros de pontes, isto é, um betão da classe de resistência *C45/50*, para se estudar a interface betão-adesivo. Desse modo, os inertes foram seleccionados e recorreu-se a um cimento *tipo II* da classe *42.5*. As curvas granulométricas dos inertes e a respectiva curva real do inerte (método de Faury) estão expostas no anexo A (Figuras A.4 e A.5). Na Tabela A.3 deste anexo apresenta-se a composição do betão utilizado na confecção das várias betonagens dos grupos de lajes disponíveis.

Para caracterizar as propriedades mecânicas do betão resultante de cada amassadura, moldaram-se provetes cúbicos ( $0.15 \times 0.15 \times 0.15 \text{ m}^3$ ), cilíndricos ( $\phi 0.15 \times 0.30 \text{ m}^3$ ) e prismáticos ( $0.15 \times 0.15 \times 0.55 \text{ m}^3$ ) que foram ensaiados, com diferentes idades (28 dias e nas datas de ensaio das lajes), à compressão, à flexão e ao módulo de elasticidade à compressão, segundo as especificações do LNEC E226, E227 e E397, respectivamente. Os valores obtidos nesses ensaios foram interpretados e resumidos, para poderem ser utilizados em análises numéricas posteriores. Devido a limitações na disponibilidade do número de provetes necessários para a análise, optou-se por:

- i) Caracterizar o betão para os 28 dias e determinar a sua classe de resistência à compressão, por ajuste dos *planos de amostragem* e dos *critérios de conformidade* definidos nas NP-ENV 206 (1993), ao grupo de três provetes disponíveis por betonagem:

$$\text{Critério 2} \quad \begin{cases} \bar{X}_3 \geq f_{ck} + 5 \\ X_{min} \geq f_{ck} - 1 \end{cases} \quad (\text{MPa}) \quad [\text{Eq-3.19}]$$

onde,

$$\begin{cases} \bar{X}_3 & - \text{resistência média dos provetes;} \\ X_{min} & - \text{menor valor da resistência dos provetes;} \\ f_{ck} & - \text{resistência característica do betão.} \end{cases}$$

- ii) Determinar outras propriedades mecânicas do betão, nos casos com menos de três provetes, recorrendo a expressões aproximadas propostas por literatura especializada. Foi necessário transformar as resistências médias à compressão de cubos em cilindros, as resistências médias à tracção (flexão e compressão linear) em tracção simples e extrapolar as resistências características para valores de propriedades a datas desejadas ao longo do tempo (*j dias*). Tais modificações obedeceram aos critérios propostos pelo Eurocódigo 2 (1991), pela Norma Portuguesa NP-ENV 206 (1993) e pelas relações ao longo do tempo, referidas na versão final do Código Modelo 1990 (CEB-FIP, 1993).

No relatório de título "Comportamento experimental de faixas de laje de betão armado reforçadas com compósitos de CFRP unidireccionais" (Juvandes et al., 1998-b), apresentam-se as tabelas que discriminam, segundo a betonagem e o número de amassadura, toda a informação disponível relativamente aos planos de amostragem, aos ensaios executados, aos resultados obtidos e às propriedades mecânicas experimentais resultantes dos mesmos.

As principais propriedades dos betões (obtidas experimentalmente ou previstas) dos modelos de laje resumem-se nas Tabelas 3.11 e 3.12 para os 28 dias e para as datas de ensaio das faixas de laje (*j dias*). Os valores desta última tabela determinaram-se aplicando as expressões propostas no Código Modelo 1990 (CEB-FIP, 1993) às características do betão aos 28 dias.

Os símbolos  $f_{cm}$ ,  $f_{ck}$ ,  $f_{ctm}$  e  $E_{cm}$ , que integram a Tabela 3.11, têm o significado referido no item 3.3.1.1, sobre a caracterização do betão para os modelos da série de vigas.

Tabela 3.11 – Resumo das características do betão aos 28 dias (análise experimental).

Betonagem	Laje	$f_{cm}$ (MPa)	$f_{ck}$ (MPa)	$f_{ctm}$ [i] (MPa)	$E_{cm}$ [ii] (GPa)	Classe de resistência
<b>A</b>	LA1M	50.3	45.3	3.5 (3.8)	40.9 (35.1)	C45/55
	LA2M					
	LA3R					
	LA4S					
<b>B</b>	LB1R	51.6	46.6	3.6 (3.9)	36.9 (35.4)	C45/55
	LB2S					
	LB3N					
	LB4N					
<b>C</b>	LC1S	56.3	51.3	3.8 (4.1)	36.8 (36.4)	C50/60
	LC2S					
	LC3R					
	LC4R					

[i] - Calculado a partir dos ensaios de flexão e o (*valor*) =  $1.4 (f_{ck}/10)^{2/3}$  (CEB-FIP, 1993);

[ii] - (*valor*) =  $9.5 (f_{cm})^{1/3}$  (Eurocódigo 2, 1991).

Tabela 3.12 - Características do betão previstas nas datas do ensaio das lajes (*j* dias).

Laje	Idade ( <i>j</i> dias)	$f_{cm,j}^{cil}$ (MPa)	$f_{ctm,j}$ [i] (MPa)	$f_{ctm,fl,j}$ (MPa)	$E_{cm,j}$ (GPa)
LB3N	98	58.0	4.1	5.6	39.1
LB4N	175	60.0 (58.0)	4.2 (4.2)	5.8 (5.8)	39.8 (38.0)
LC3R	195	65.8	4.5	6.2	39.8
LC4R	182	65.5 (63.2)	4.5 (5.0)	6.2 (6.9)	39.7 (37.3)
LC1S	186	65.6	4.5	6.2	39.7
LC2S	189	65.7 (63.6)	4.5	6.2	39.7 (39.8)

(*valor*) - valores médios experimentais das características do betão quando existe ensaio nessa idade;

[i] - o (*valor*) é calculado com base na expressão do Código Modelo 1990 (CEB-FIP, 1993) para ensaio de flexão.

com,

$$f_{cm,j} = f_{cm,28} \times \beta_{c,j} \quad (\text{MPa}) \quad [\text{Eq-3.20}]$$

$$f_{ctm,j} = 1.4 [(f_{cm,j} - 8)/10]^{2/3} \quad (\text{MPa}) \quad [\text{Eq-3.21}]$$

$$f_{ctm,fl,j} = \frac{1 + 2 \times (150/100)^{0.7}}{2 \times (150/100)^{0.7}} \times f_{ctm,j} \quad (\text{MPa}) \quad [\text{Eq-3.22}]$$

$$E_{cm,j} = E_{cm,28} \times (\beta_{c,j})^{1/2} \quad (\text{GPa}) \quad [\text{Eq-3.23}]$$

onde,

$$\beta_{c,j} = \exp [0.25 \times (1 - (28/j)^{1/2})] \quad [\text{Eq-3.24}]$$



### 3.3.2 - Armadura

Todos os modelos ensaiados neste trabalho foram armados com varões de aço nervurados. A composição da armadura para cada viga e cada faixa de laje foi apresentada na secção 3.1, de descrição individual dos modelos de flexão. Discriminam-se, seguidamente, os ensaios efectuados com provetes de aço e os respectivos resultados, para a caracterização das referidas armaduras. Para cada lote de varões de dado diâmetro, foram retiradas sempre três amostras e ensaiadas à tracção conforme a regulamentação NP EN 10002. Na Figura 3.33 apresenta-se os diagramas tensão-extensão dos provetes com diâmetros de 3 mm e 6 mm usados nos modelos de laje e remete-se para o relatório de Juvandes et al. (1998-a) os diagramas equivalentes obtidos para as armaduras dos modelos de viga. No caso particular das vigas *tipo C*, os provetes de aço foram cortados da armadura longitudinal extraída da *viga C.3* após a sua destruição. Na Tabela 3.13, resumem-se os valores médios das principais propriedades dos aços usados como armadura ( $E_s$  - módulo de elasticidade;  $f_{sy}$  - tensão de cedência;  $f_{su}$  - tensão última;  $\varepsilon_{su}$  - extensão após rotura).

Nos cálculos deste trabalho, usar-se-á o valor do módulo de elasticidade de  $E_s = 200 \text{ GPa}$ , estabelecido no Eurocódigo 2 (1991), apesar dos resultados experimentais indicarem um valor ligeiramente inferior.

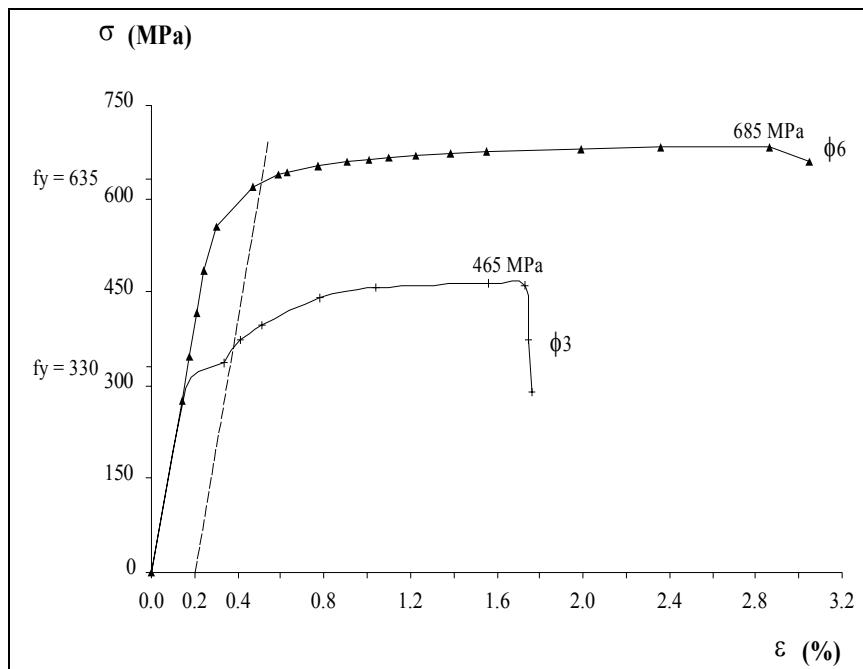


Figura 3.33 – Diagramas tensão-extensão do aço utilizado nas faixas de laje ( $\phi 3$ , e  $\phi 6$ ).

Tabela 3.13 – Principais propriedades das armaduras (valores médios).

Modelo <i>tipo</i>	Diâmetro (mm)	Configuração da superfície	$f_{sym}$ (MPa)	$f_{sum}$ (MPa)	$E_{sm}$ (GPa)	$\varepsilon_{sum}$ (%)
<i>Série de vigas [i]</i>						
<b>A</b>	φ6	rugosa (NR)	531.3	687.7	189.1	22.1
	φ10	rugosa (NR)	519.2	614.5	183.7	22.3
	φ16	rugosa (NR)	477.0	753.3	189.3	14.6
<b>B</b>	φ3	lisa (NL)	192.3	307.1	195.0	52.9
	φ8	rugosa (NR)	497.1	654.3	174.0	22.0
<b>C</b>	φ6	rugosa (NR)	444.0	657.0	192.0	26.0
	φ12	rugosa (NR)	507.4	579.7	184.6	27.1
<i>Série de faixas de laje [ii]</i>						
<b>N</b>	φ3	lisa (NL)	330.3	464.6	194.9	56.0
<b>R</b>						
<b>S</b>	φ6	rugosa (NR)	635.6	684.9	225.3	18.4

[i] – Informação mais detalhada sobre os ensaios encontra-se no trabalho de Juvandes et al. (1998-a);

[ii] – Informação mais detalhada sobre os ensaios encontra-se no trabalho de Juvandes et al. (1998-b).

### 3.3.3 - Compósitos de CFRP unidireccionais

O reforço das vigas e das faixas de laje foi executado com dois sistemas de material compósito reforçados com fibras de carbono, CFRP, dispostas unidireccionalmente, o *laminado pré-fabricado* num caso e a *manta flexível pré-impregnada* no outro.

Os produtos que integram o sistema de reforço do tipo laminado de CFRP, isto é, o compósito, o adesivo e o desengordurante, foram fornecidos pela SIKA-Indústria Química, SA e apresentam o aspecto geral ilustrado na Figura 2.7-b (item 2.2.1 do Capítulo 2).

Por sua vez, o sistema de reforço com a manta flexível de fibras unidireccionais de carbono da "Mitsubishi Chemical Corporation", utilizado neste trabalho e cujos componentes se expõem na Figura 2.8-b (item 2.2.1 do Capítulo 2), foi fornecido pela STAP - Reparação, Consolidação e Modificação de Estruturas, SA.

Nos dois sistemas, as respectivas empresas disponibilizaram, igualmente, a correspondente literatura de apoio. Nesta secção, descreve-se o maior número de elementos que foi possível obter acerca da caracterização destes produtos.

### 3.3.3.1 - Laminado pré-fabricado

O laminado utilizado no estudo das vigas e da série de lajes do *tipo S* tem a designação de *CarboDur S 512* e a forma de um plástico reforçado unidireccionalmente com fibras de carbono tipo *T 700*, apresentando a espessura de  $t_L = 1.2 \text{ mm}$  e a largura de  $b_L = 50 \text{ mm}$ . As características principais estão indicadas no prontuário de fichas técnicas da Sika (1998) e resumidas na Tabela 3.14 para diferentes tipos de laminados (*S*, *M* e *H*).

Tabela 3.14 – Propriedades de catálogo do laminado *Sika-CarboDur*.

Principais Propriedades	Laminados Sika CarboDur		
	Tipo <i>S</i>	Tipo <i>M</i>	Tipo <i>H</i>
Resistência à tracção (MPa) [i]	3100	2400	1600
Módulo de elasticidade (GPa)	> 155	> 210	> 300
Alongamento na rotura (%)	> 1.9	> 1.1	> 0.8
Conteúdo volumétrico em fibras (%)	> 68		
Densidade aparente (kN/m <sup>3</sup> )	15.7		

[i] - na rotura.

No LEMC e no INEGI foram realizados alguns ensaios de tracção com estes laminados, de modo a confrontar-se os valores de algumas das suas propriedades com os indicados no catálogo do fornecedor.

No primeiro laboratório, efectuaram-se ensaios de tracção até à ruína de três provetes de *CarboDur S 512* com *45cm* de comprimento (Figura 3.34). Os resultados foram adquiridos por leitura directa das extensões no laminado de CFRP e por acompanhamento dos deslocamentos das amarras hidráulicas da máquina (Figura 3.13 do item 3.2.1). Em todos os provetes a ruína foi precedida por uma sequência de sons crepitantes, traduzidos pela rotura e delaminação sucessiva das fibras longitudinais de carbono, surgindo, por fim, um ruído forte e brusco e obtendo-se o aspecto que se apresenta nas Figuras 3.35-a e 3.35-b.

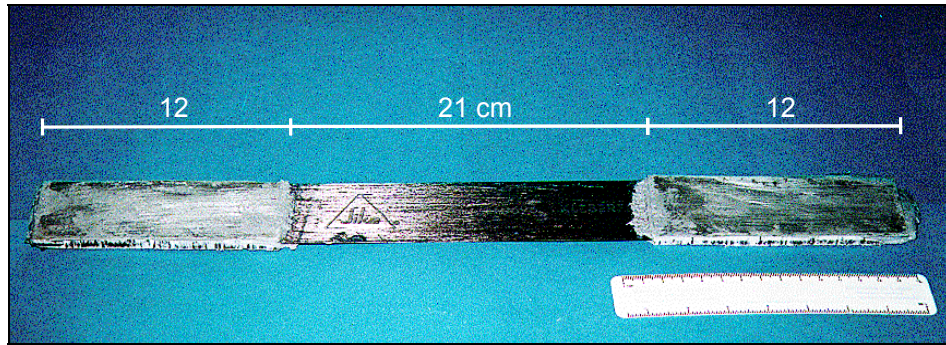
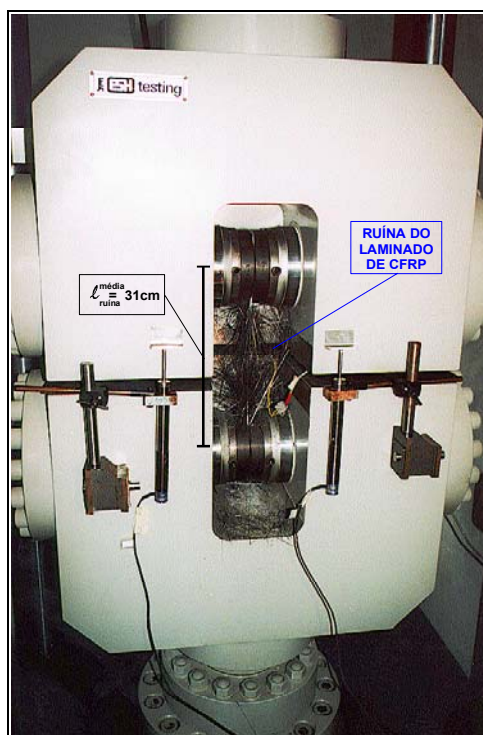
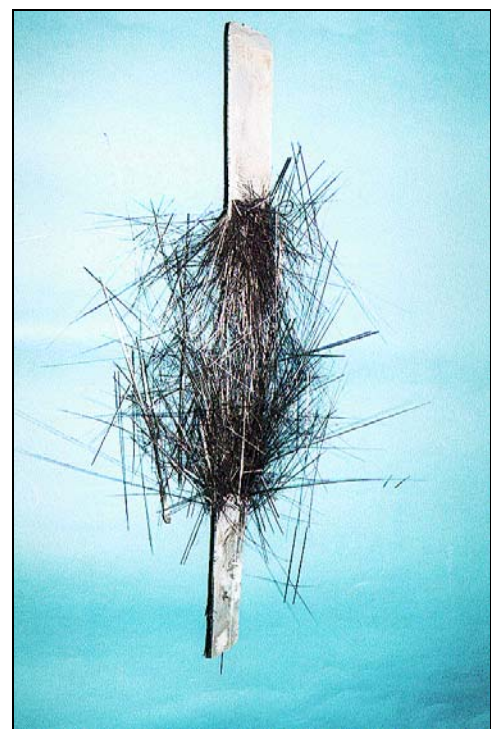


Figura 3.34 - Aspecto do provete de CFRP submetido à tracção.



a) Aspecto final do ensaio.



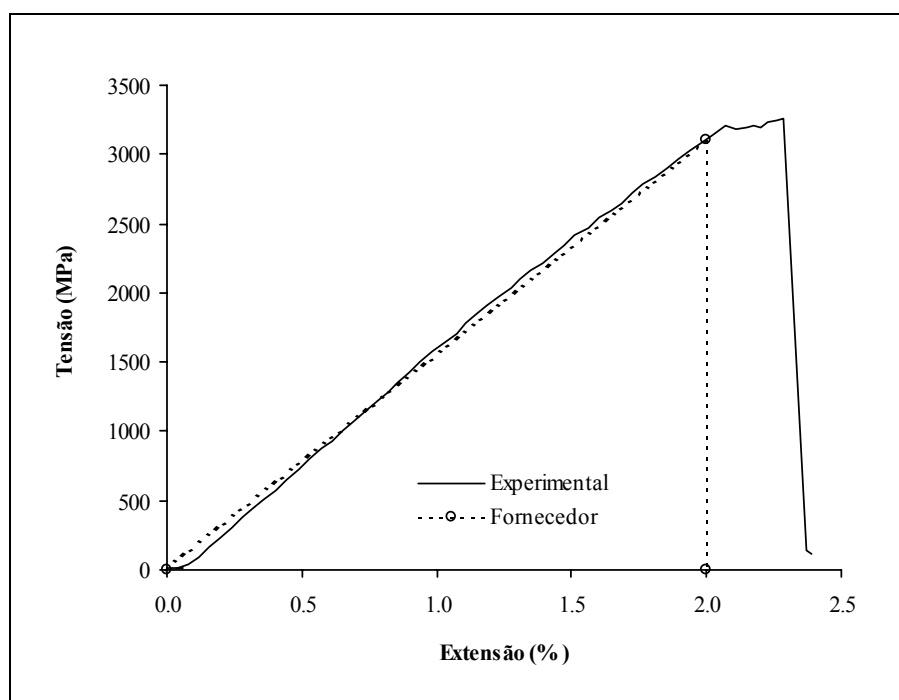
b) Provete após ruína.

Figura 3.35 - Ensaio de tracção do laminado *CarboDur S 512*.

Na Tabela 3.15 indicam-se os valores da tensão,  $f_{Lu}$ , e da extensão,  $\epsilon_{Lu}$ , de ruína à tracção, o módulo de elasticidade e os respectivos valores médios obtidos nos ensaios dos provetes de *CarboDur S 512*. O módulo de elasticidade foi determinado para o valor secante entre os níveis de tensão a  $1/10$  e  $1/3$  da resistência à tracção prevista por catálogo, isto é, entre tensões de  $310 \text{ MPa}$  e  $1033 \text{ MPa}$ . Estes compósitos apresentam um comportamento praticamente linear até à ruína, sem reserva plástica de deformação, como se observa nas relações tensão-extensão longitudinal expostas na Figura 3.36, obtidas experimentalmente e segundo as indicações do fornecedor.

Tabela 3.15 - Resultados do ensaio de tracção do laminado *CarboDur S 512*.

Provetes <i>CarboDur S 512</i>	$f_{Lu}$ (MPa)	$f_{Lum}$ (MPa)	$\varepsilon_{Lu}$ (%)	$\varepsilon_{Lum}$ (%)	$E_L$ (GPa)	$E_{Lm}$ (GPa)
1	3306.3	3245.7 $\pm 60.5$	2.21	2.14 $\pm 0.8$	162.9	163.3 $\pm 5.0$
2	3209.9		2.06		168.3	
3	3221.0		2.15		158.7	

Figura 3.36 - Diagrama tensão-extensão do laminado *CarboDur S 512*.

Da comparação dos resultados experimentais com as informações propostas nas fichas técnicas do fornecedor, usar-se-ão, nos cálculos deste trabalho, os seguintes valores para as propriedades do CFRP:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{Lu} = 3100 \text{ MPa} \\ \varepsilon_{Lu} \cong 19.4 \text{ ‰} \\ E_{Lm} = 160 \text{ GPa} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} [\text{Eq-3.25}] \\ [\text{Eq-3.26}] \\ [\text{Eq-3.27}] \end{array}$$

Por exemplo, na Alemanha, este sistema laminado está normalizado no mercado pelo documento de Homologação Nr. Z-36.12-29 (1997) do "Deutsches Institut für Bautechnik" (DIBt).

### 3.3.3.2 - Manta flexível e pré-impregnada

A forma comercial mais frequente das mantas flexíveis de material composto tem o aspecto ilustrado na Figura 3.37 (e Figura 2.8-b). Resultam do agrupamento de feixes de filamentos unidireccionais de fibras de carbono, neste caso, dispostos de forma contínua, aderidos a uma folha de suporte e impregnados numa resina de epóxico de reduzida quantidade, de modo a garantir a mínima consistência do conjunto. Estas mantas têm uma espessura de décimos de milímetros e, geralmente, podem estar aplicadas sobre uma rede de fibras de vidro (ou carbono) de malha larga, para evitar a dispersão das fibras quando é dividida em partes. Neste "estado" a manta não apresenta ainda as características de um composto de FRP (JCI TC952, 1998), porque não tem uma matriz polimérica definida e curada.

Para o reforço dos modelos de laje da série *tipo R* foi seleccionado o sistema Replark, mais especificamente a manta *Replark 20* (MRK-M2-20) com 25 cm de largura ( $b_L$ ) e sob uma rede branca de fibras de vidro (Figura 3.37). As principais características apresentam-se na Tabela 3.16, retirada da literatura de apoio do sistema Replark (1997).

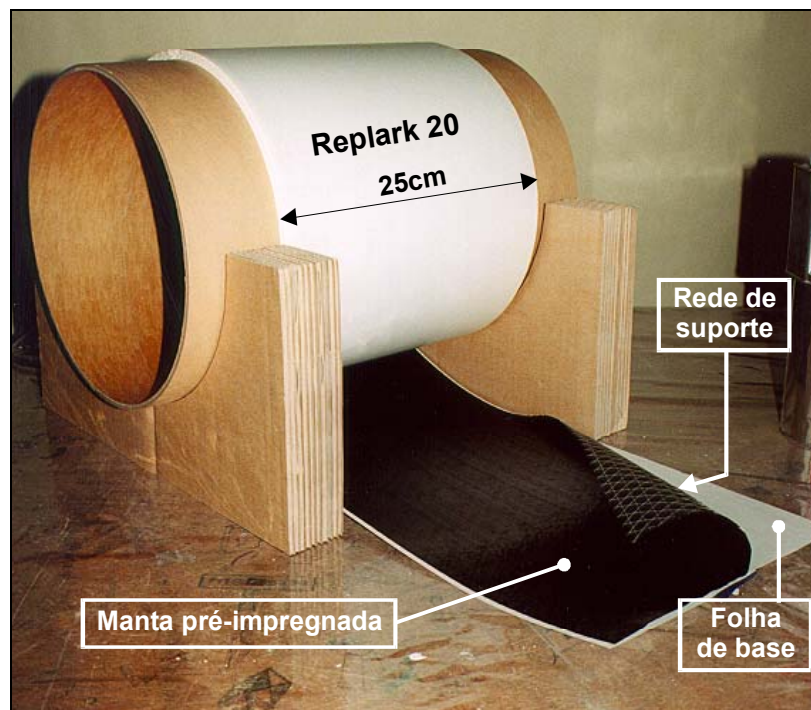


Figura 3.37 - Manta flexível do sistema *Replark 20*.



Tabela 3.16 - Principais propriedades da manta flexível.

	Unidades	Tipo 20 (MRK-M2-20)	Tipo 30 (MRK-M2-30)	Tipo MM (MRK-M4-30)	Tipo HM (MRK-M6-30)	Ensaio*
<b>Resist. Tracção</b>	N/mm <sup>2</sup> (×10 <sup>3</sup> psi)	3,400 (493)	3,400 (493)	2,900 (421)	1,900 (276)	JIS-K7073
<b>Mod. Elast.</b>	N/mm <sup>2</sup> (×10 <sup>3</sup> psi)	2.3×10 <sup>5</sup> (33.4)	2.3×10 <sup>5</sup> (33.4)	3.9×10 <sup>5</sup> (56.6)	6.4×10 <sup>5</sup> (92.8)	JIS-K7073
<b>Área/largura</b>	cm <sup>2</sup> /m (in <sup>2</sup> /in)	1.11 (0.0044)	1.67 (0.0066)	1.65 (0.0065)	1.43 (0.0056)	—
<b>Peso de fibra</b>	g/m <sup>2</sup> (lb/ft <sup>2</sup> )	200 (0.041)	300 (0.061)	300 (0.061)	300 (0.061)	JIS-K7071

\* JIS - Japanese Industrial Standard

À semelhança do que sucedeu com o laminado e por limitação de equipamento disponível no INEGI (CEMACOM), realizaram-se poucos ensaios de caracterização destas mantas. Embora não suficientemente conclusivos para se admitirem na análise deste trabalho, os resultados estão publicados num artigo de Juvandes et al., (1998-e). Contudo, sabe-se que o *Replark 20* (MRK-M2-20) apresenta um comportamento linear até à ruína, sem reserva plástica de deformação, ou seja, rotura frágil. Sob o ponto de vista de cálculos numéricos futuros, utilizar-se-ão os valores sugeridos pelo fornecedor para as principais propriedades do CFRP, depois de curado "in situ" (Replark, 1997).

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{Lu} = 3400 \text{ MPa} \\ \varepsilon_{Lu} \cong 15.0 \text{ ‰} \\ E_{Lm} = 230 \text{ GPa} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} [\text{Eq-3.28}] \\ [\text{Eq-3.29}] \\ [\text{Eq-3.30}] \end{array}$$

### 3.3.4 - Adesivos

O adesivo possui um papel importante no desempenho eficaz de um reforço exterior. Este facto repercute-se na selecção adequada das propriedades do adesivo em função das resistências mecânica e química, da elasticidade e da durabilidade desejadas para a ligação, como também do seu comportamento nas interfaces de ligação adesivo-betão e adesivo-compósito de CFRP (relembra-se as informações do Capítulo 2). A preparação das superfícies, tanto do betão como do compósito, para a recepção do adesivo é igualmente fundamental e será abordada mais tarde no Capítulo 4.

Os adesivos utilizados nas colagens quer dos modelos de vigas quer das faixas de laje são do tipo epóxico e são constituídos por dois componentes (A - principal e B - endurecedor) a misturar em proporções determinadas pelos sistemas CarboDur (Sika, 1998) e Replark (1997). Enquanto o adesivo no primeiro sistema é uma *cola* na interface betão-laminado, no segundo caso é, simultaneamente, a *resina de saturação* da manta e o *produto de colagem* desta ao betão, como se explicou no item 2.2.1 do Capítulo 2 (JCI TC952, 1998).

Nas datas de realização das misturas adesivas e dos ensaios de flexão dos modelos de betão foram controlados os valores da temperatura e do teor de humidade relativa do meio ambiente nos laboratórios (LE e LEMC). A grandeza desses valores pode ser analisada no anexo A através das Figuras A.6 e A.7, expondo-se os diagramas respectivos da temperatura ( $T$ ) e da percentagem de humidade relativa ( $HR$ ) registados todos os dias às 9, 13 e 18 horas, durante o ano de 1998 nesses laboratórios.

#### 3.3.4.1 - Série de vigas

Os adesivos empregues nas colagens são do tipo argamassa de epoxi, designam-se por *Sikadur 30* e *Sikadur 31* e são constituídos por dois componentes (A e B) a misturar em proporções de 3/1 em peso ou volume (Sika, 1998). De acordo com a literatura técnica do fornecedor, o *Sikadur 30* é o adesivo indicado na colagem do CFRP, sendo o *Sikadur 31* utilizado no reforço executado com chapas metálicas. No programa de trabalhos em análise, ambos os adesivos foram usados, sendo de salientar que o *Sikadur 31* apenas interveio no reforço das vigas designadas por B.1 e B.3. Na primeira viga, comparou-se o comportamento deste adesivo com o *Sikadur 30* recomendado para os outros casos. Na segunda viga, investigou-se qual a vantagem relativamente ao reforço normal se este adesivo participasse na preparação da superfície do betão, como primário, anteriormente à colagem do laminado com o *Sikadur 30*.

Na Figura 2.7-b do Capítulo 2 apresentou-se o aspecto dos componentes de reforço usados nesta fase, tais como o laminado, o adesivo, o desengordurante e a correspondente literatura de apoio.

Devido ao "Pot-life" (tempo de utilização) do adesivo e ao número de vigas a reforçar, os adesivos foram sendo confeccionados, de acordo com o programa de ensaios dos modelos e segundo várias etapas (misturas) que se descrevem no relatório de Juvandes et al (1998-a), por atribuição de um algarismo alfa-numérico (consultar Tabelas A.1 do anexo A).



Para cada mistura, foram extraídos provetes (Figura 3.38), que foram ensaiados nos Laboratórios de Ensaio de Materiais de Construção (LEMC) e de Estruturas (LE) e no Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI), na Unidade de Materiais Compósitos (CEMACOM), com a distribuição seguinte:

(i) - *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP (LEMC e LE):*

- Ensaio de flexão de prismas (Figura 3.39);
- Ensaio de compressão das duas partes sobrantes do ensaio de flexão (Figura 3.40(a) e (b));
- Ensaio de determinação do módulo de elasticidade (Figura 3.41);

(ii) - *Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial – INEGI (CEMACOM):*

- Ensaio de tracção simples (segundo as normas ASTM D3039 e ISO 527);
- Ensaio de flexão (segundo as normas ASTM D790 e ISO 178);
- Ensaio de "PL Dynamic Mechanical Thermal Analyser (PL-DMTA)" (ISO 6721-5).

Como o programa de controlo das misturas e dos ensaios constitui uma base de dados extensa e já foi descrito no referido relatório, nesta dissertação evita-se a sua repetição. Contudo, os seus principais aspectos indicam-se em seguida.

O comportamento de um adesivo, em termos de variação das propriedades físicas, deve ser avaliado e interpretado quando se esperam, para os locais da sua aplicação, ambientes com gradientes termo-higrotérmicos significativos. Concretamente, em Portugal podem encontrar-se estruturas de pontes de betão armado, potencialmente reforçáveis num futuro próximo, com gradientes térmicos oscilando entre  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $+50^{\circ}\text{C}$ , naturalmente.

O ensaio designado por DMTA ("PL-Dynamic Mechanical Thermal Analyser"), não obstante não estar ainda instituído, pode ser subscrito pelas normas internacionais ISO 6721-5 (1995) e pelo EUROCOMP (1996) para a determinação dinâmica de propriedades mecânicas do grupo dos plásticos. Através de um equipamento semelhante ao referido na Figura 3.14 da secção 3.2, o ensaio executa-se por vibração em flexão (método sem ressonância) nas condições seguintes:

- amostra encastrada numa extremidade (cantiliver);
- solitação dinâmica com frequência de  $1\text{Hz}$ ;
- variação térmica de  $20^{\circ}\text{C}$  a  $80^{\circ}\text{C}$  (velocidade =  $1.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ).

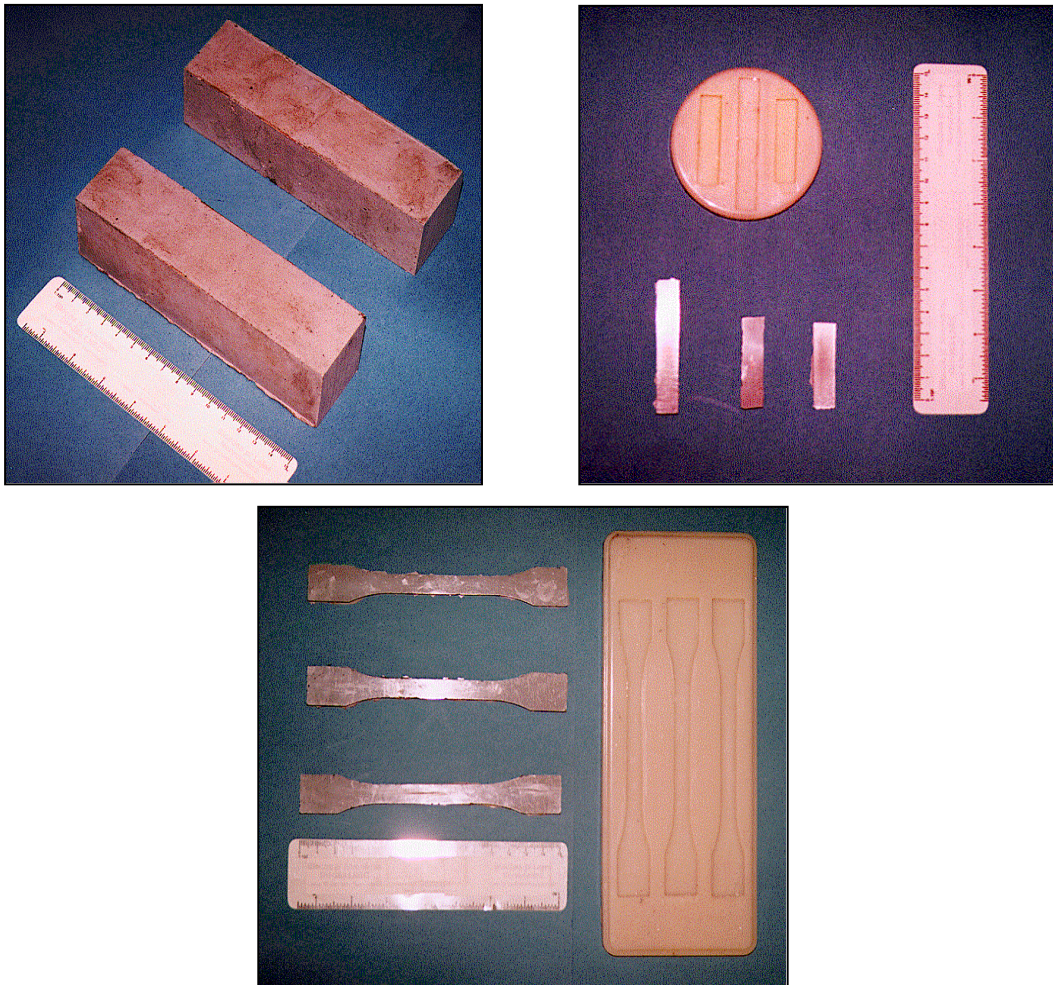


Figura 3.38 – Tipos de provetes de adesivos *Sikadur 30* e *Sikadur 31* ensaiados.

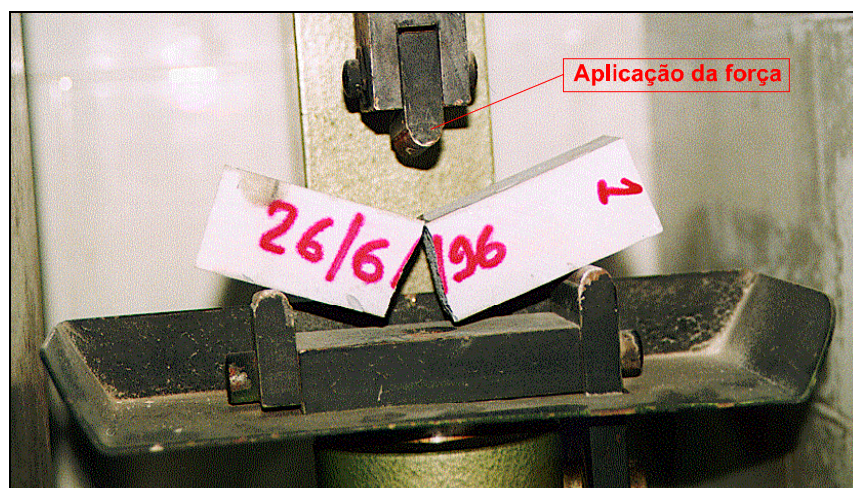


Figura 3.39 – Ensaio de flexão em três pontos (LEMC).



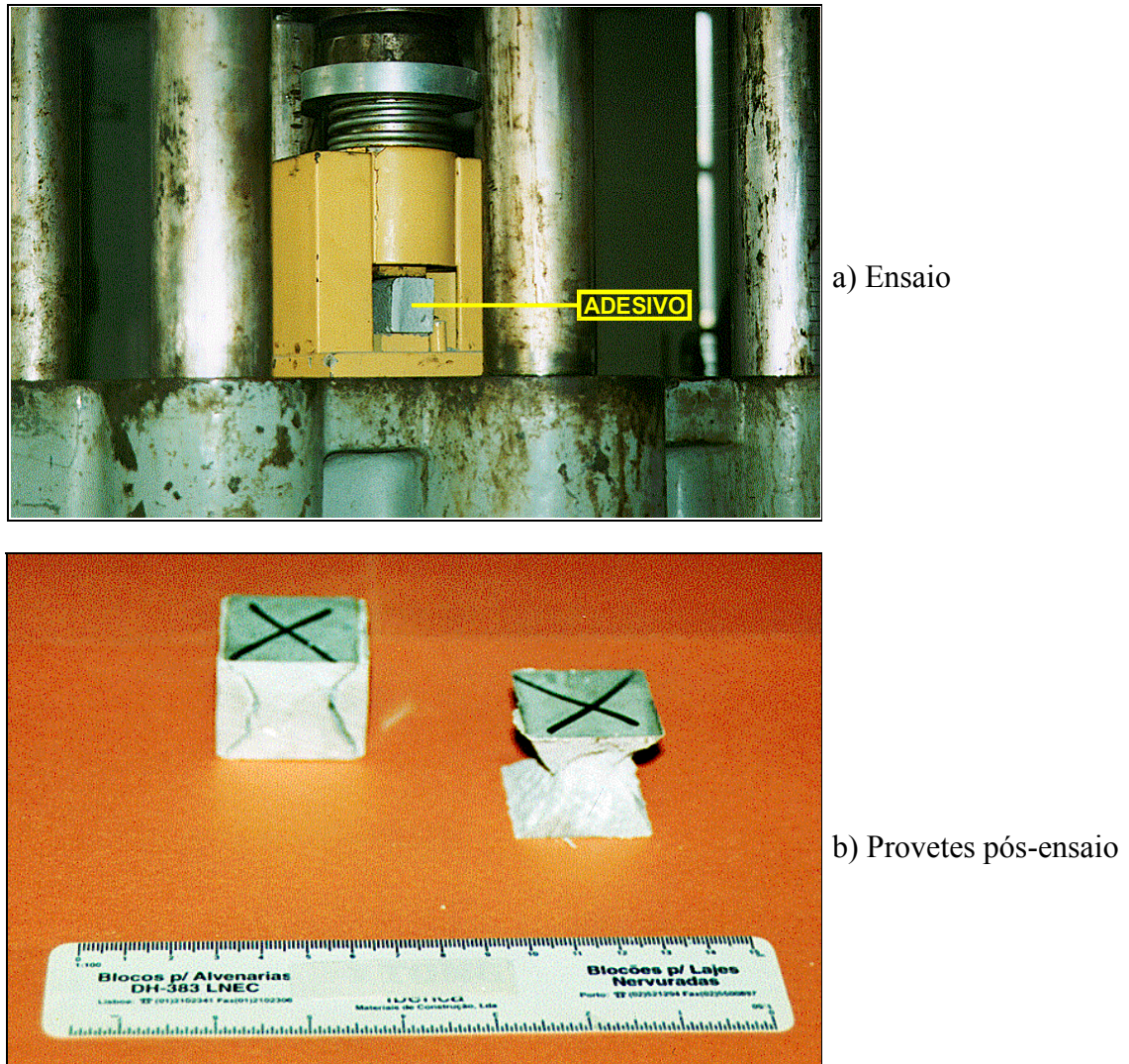


Figura 3.40 – Ensaio de compressão (LEMC).

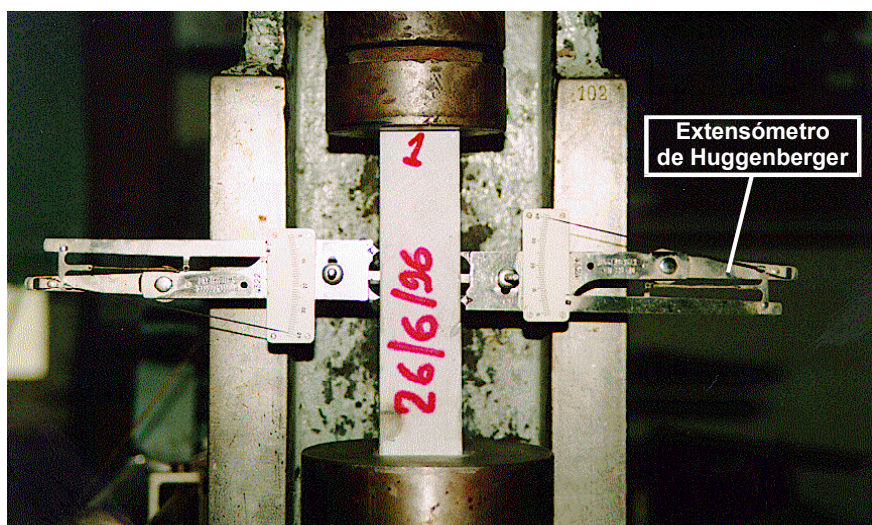
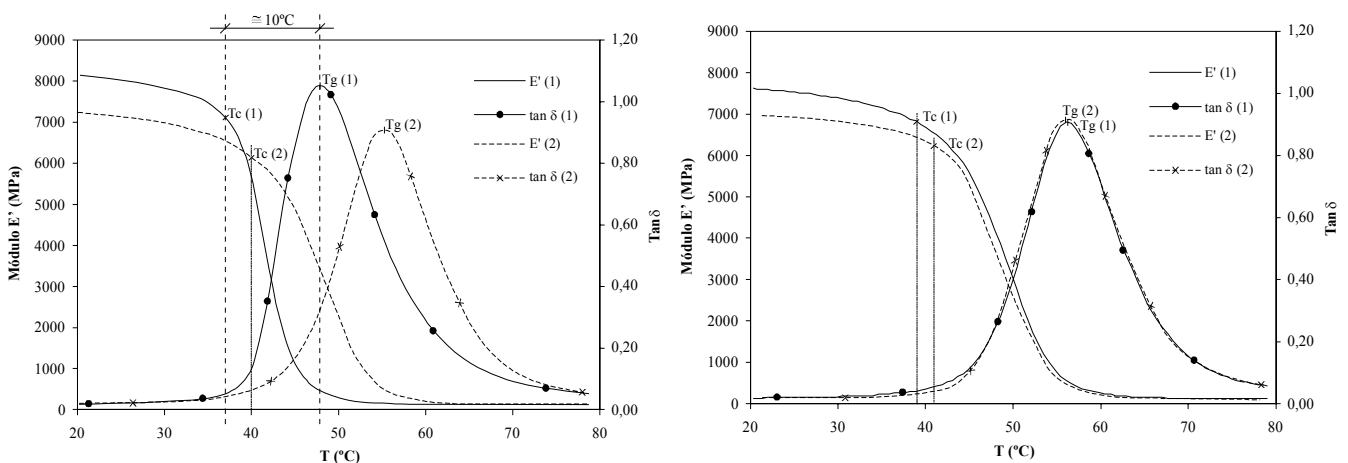


Figura 3.41 – Determinação do módulo de elasticidade (LEMC/LE).

Os resultados permitem determinar:

- a variação do *módulo de elasticidade* (módulo de ganho  $E'$ ) com o gradiente térmico;
- a *temperatura de transição vítrea* ( $T_g$ ), isto é, a temperatura que proporciona a passagem dum estado vítreo frágil para um sólido dúctil (Marques, 1982);
- o *coeficiente de perda* ( $\tan \delta$ ) associado à variação do módulo de elasticidade de um adesivo, isto é, a razão entre a energia dissipada e a energia armazenada (ganho) por ciclo;
- o estado inicial de cura do adesivo em relação a um estado posterior de cura (*pós-cura*) da amostra quando aquecida ( $60^\circ\text{C}$  a  $85^\circ\text{C}$ ) durante um certo período de tempo (1 a 3 horas);
- um valor limite a que se designou de *temperatura crítica* ( $T_c$ ), acima da qual se inicia a redução acentuada do módulo de elasticidade no ensaio (vai ao encontro da proposta do EUROCOMP referido no item 2.2.2).

Na Figura 3.42-a apresenta-se, para dois varrimentos consecutivos (1) e (2) no DMTA, as curvas típicas da variação do módulo de elasticidade  $E'$  (módulo de ganho) e do andamento do coeficiente de perda  $\tan \delta$  com a temperatura, para amostras extraídas da mistura 4A do adesivo Sikadur 30 aplicado nos reforços. Simultaneamente, estas curvas estão expostas na Figura 3.42-b para amostras que foram submetidas, previamente, a um estado de *pós-cura* por aquecimento constante de  $60^\circ\text{C}$  durante 3 horas.



a) Cura à temperatura ambiente.

b) Amostras com pós-cura ( $60^\circ\text{C}$  / 3 horas).

Figura 3.42 - Evolução do módulo de elasticidade e do coeficiente de perda com a temperatura para a mistura 4A.

A observação da variação do módulo de elasticidade representado nas figuras permite distinguir a zona de definição de uma temperatura crítica  $T_c$ , a partir da qual se inicia a redução acentuada deste módulo, que se constata ser de  $32^{\circ}\text{C}$  a  $46^{\circ}\text{C}$  para o caso do *Sikadur 30*. Ao valor máximo da curva do coeficiente de perda  $\tan \delta$  está associado o valor da abcissa designado por "temperatura de transição vítrea"  $T_g$ , cujo aumento entre o primeiro e o segundo varrimentos (acompanhado de redução da  $\tan \delta$  - Figura 3.42-a) traduz o estado incompleto em que se podem encontrar as reacções químicas de polimerização no adesivo, após a cura da mistura nas condições ambientais. Esta informação pode ser reforçada quando se submetem as amostras do adesivo, primeiro, a uma acção de *pós-cura* a quente e, depois, ao ensaio de DMTA, obtendo-se curvas de comportamento semelhantes nos dois varrimentos consecutivos (Figura 3.42-b) e próximas da curva observada no segundo varrimento do primeiro caso (Figura 3.42-a).

Na Tabela A.4 do anexo A discriminam-se os resultados dos ensaios de PL-DMTA realizados para as amostras de algumas misturas do *Sikadur 30*. Nesta tabela, além dos valores das propriedades que interessam evidenciar, pode concluir-se, que na generalidade das misturas efectuadas nas condições ambientais registadas neste trabalho, o estado de cura do adesivo não parece ser completo. Comparando as temperaturas  $T_c$  e  $T_g$  verifica-se que a primeira é inferior à segunda  $10^{\circ}\text{C}$  a  $20^{\circ}\text{C}$ , valor este ( $T_c$ ) recomendado pelo código de projecto EUROCOMP (1996) para *temperatura limite superior* da amplitude térmica, esperada numa aplicação normal da construção civil (consultar item 2.2.2 do Capítulo 2).

O resumo dos valores obtidos experimentalmente para as principais propriedades do *Sikadur 30* e *Sikadur 31* apresenta-se na Tabela 3.17, permitindo a comparação com as indicações das fichas técnicas da Sika (1998).

### 3.3.4.2 - Série de faixas de laje

Os adesivos utilizados nos dois sistemas desta série de modelos experimentais são do tipo epóxico e são constituídos por dois componentes (A - principal e B - endurecedor) a misturar em proporções de 3/1 e 2/1 em peso, para os casos Carbodur e Replark, respectivamente.

O adesivo recomendado para as colagens é, no primeiro caso, o *Sikadur 30* (analisado na série de vigas) com uma espessura de 2 a 3 mm e com o aspecto de uma argamassa (contém cargas de quartzo). Na segunda hipótese, o adesivo fornecido foi o tipo *L700W* (Inverno) ilustrado na Figura 2.8-b (item 2.2.1) e para espessuras da ordem de 1 a 2 mm.

Tabela 3.17 - Principais propriedades do *Sikadur 30* e *Sikadur 31* (ensaios e fabricante)

Principais propriedades	<i>Sikadur 31</i>		<i>Sikadur 30</i>	
	Ensaios	Fabricante [i]	Ensaios	Fabricante [i]
Resistência à compressão (MPa)	50 - 55	70 - 80	80 - 90	75 - 100 [iv]
Aderência adesivo-betão (MPa)	> 2 [ii]	> 4 [ii]	> 2 [ii]	> 4 [ii]
Resistência à tracção (MPa)	-	20 - 30	-	20 - 30 [iv]
Resistência à flexão-tracção (MPa)	70	30 - 40	50 - 70	-
Resistência ao corte (MPa)	-	4.3	-	15 [ii]
Módulo de elasticidade (GPa)	4.5	7.1	12.5	12.8
Extensão na rotura (%)	1.5	-	3.0 - 5.0	-
Coefficiente de expansão (-10°C a 40°C)	-	-	-	$9 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$
Retracção (%)	-	-	-	0.04
Massa volúmica (kN/m <sup>3</sup> )	16.5	15.7	17.6	17.3
Temp. transição vítrea - Tg (°C)	36 - 42	-	49 - 58	62
Temperatura crítica - Tc (°C) [iii]	-	-	33 - 45	42 - 52
Tempo de utilização (min)	-	40 (a 20 °C)	-	40 (a 35 °C)

[i] - Prontuário de fichas técnicas (Sika, 1998), literatura da Sika Espanha de 1997 e Homologação Nr. Z-36.12-29 (1997);

[ii] - Ruína coesiva do betão;

[iii]- Valor sugerido pelo EUROCOMP (1996);

[iv]- indicações de Steiner (1996).

Devido ao "pot-life" (tempo de utilização) do adesivo e ao número de lajes a reforçar, os adesivos ( ou as resinas de saturação) foram sendo confeccionados, de acordo com o programa de classificação das séries tipo exposto na Tabela 3.10 e segundo várias misturas. Como, para este estudo apenas se admitem modelos submetidos à técnica de reforço da 1ª Fase dos trabalhos experimentais, excepção feita na situação interpretada no Capítulo 4, as colagens dos dois sistemas de CFRP realizaram-se com a confecção de duas misturas, uma por cada série de laje (*tipo R* e *tipo S*). Das misturas, extraíram-se provetes, embora em número reduzido, que foram ensaiados nos mesmos laboratórios mencionados no item 3.3.4.1 (LEMC, LE e INEGI-CEMACOM). Informações mais detalhadas sobre este tipo de ensaios estão discriminados no trabalho de Juvandes et al. (1998-b).

Na Tabela 3.18, descrevem-se as principais propriedades da resina de saturação *L700W*, através de resumo dos valores obtidos experimentalmente e das indicações da ficha técnica do sistema Replark (1997). Quanto ao adesivo *Sikadur 30*, as principais informações estão resumidas na Tabela 3.17 exposta no item anterior. No sentido de melhorar as propriedades aderentes da camada de betão da interface, o sistema Replark impõe a utilização de um primário de referência *PS 301*, que se aplica directamente sobre o betão antes do espalhamento da resina *L700W* (consultar Capítulo 4). Por limitação de tempo e de equipamento adequado para ensaio, não se realizaram testes de

caracterização deste material. Contudo, as principais propriedades descritas na literatura sobre o primário estão transcritas na Tabela 3.18.

Tabela 3.18 - Principais propriedades do *L700W* (ensaios e fabricante) e do *PS 301* (fabricante).

Principais propriedades	<i>L700W</i> (Inverno)		Primário <i>PS 301</i>
	ensaios [i]	fabricante [ii]	fabricante [ii]
Aderência adesivo-betão (MPa)	–	> 1.5 [iii]	> 1.5 [iii]
Resistência à tracção (MPa)	41.5	> 29.4	–
Resistência à flexão-tracção (MPa)	–	> 39.2	–
Resistência ao corte (MPa)	–	> 9.8	–
Módulo de elasticidade (GPa)	2.13	–	–
Extensão na rotura (%)	3.6	–	–
Viscosidade (mPa sec)	–	< 15000	< 700
Massa volúmica (kN/m <sup>3</sup> )	–	9.8 – 12.7	8.3 – 12.3
Temp. transição vítrea-T <sub>g</sub> (°C)	49 – 54	–	–
Pot-life (min)	–	20	40

[i] - Ensaios realizados no INEGI (CEMACOM) e descritos no artigo de Juvandes et al. (1998-e);

[ii] - Segundo a literatura técnica da Mitsubishi (Replark, 1997) e para a condição de temperatura média de 23 °C;

[iii]- Ruína coesiva do betão.

### 3.4 - METODOLOGIA DE OBSERVAÇÃO, MEDIÇÃO E ANÁLISE DOS ENSAIOS

Com os elementos das medições efectuadas, observações durante os ensaios, caracterização dos materiais, esquemas do padrão de fendilhação, gráficos, etc., foi possível principiar a análise dos resultados dos testes experimentais. Inicialmente, fez-se uma observação global dos resultados das combinações da *série de vigas* (primeiro modelo experimental) e mais tarde da *série de faixas de laje* (segundo modelo experimental), de modo a detectar-se eventuais discrepâncias de leituras em algum dos modelos.

Como os modelos de betão em análise são reforçados, praticamente sem pré-fendilhação (excepto num caso), aceita-se que o padrão de fissuração registado nos ensaios de flexão é devido, sobretudo, à natureza da solicitação aplicada, desprezando-se as consequências resultantes de efeitos térmicos ou construtivos dos modelos. Nesta análise, pressupõe-se ser preferível apresentar muitas fendas de pequena abertura, do que poucas com maior abertura.

Sobre a observação e análise dos resultados dos ensaios experimentais em modelos de flexão reduzidos, convém referir que deve prestar-se especial atenção às condicionantes dos *efeitos de escala* nas respectivas conclusões (De Souza, 1990). Isto deve-se, nos modelos de betão armado, às dificuldades em obter varões de pequenos diâmetros com propriedades mecânicas e de aderência convencional, em realizar betões com máximas dimensões de inertes pequenos e em adquirir laminados de CFRP “standard” com dimensões ajustáveis a cada caso.

Os modelos da *série de viga* utilizados pela primeira vez no âmbito deste trabalho não obedeceram a critério especial. Contudo, procurou manter-se alguma semelhança com a edificação corrente, de modo a estabelecer-se uma escala aproximada de 1/2.5. Com o segundo grupo de modelos (*série de faixas de laje*) e após a experiência anteriormente adquirida com as vigas, executaram-se modelos obedecendo aos critérios estabelecidos no item 3.1, reduzidos a uma escala de 1/2.5 e com as características dos materiais cuidadosamente estudadas, conforme se apresentou no item 3.3.

Os transdutores de deslocamentos (LVDT) e os extensómetros eléctricos utilizados nos ensaios de flexão têm a finalidade de avaliar as deformações e as curvaturas dos modelos de betão e, ainda, acompanhar a evolução das extensões no material compósito de reforço (laminado ou manta).

Os LVDTs 1 a 5 ( ou 6) dispostos nos modelos de viga (Figuras 3.3, 3.6 e 3.8) permitem medir as deformações verticais da face superior do betão. No caso da série de faixas de laje, os LVDTs 2 a 6 obtêm as flechas de secções importantes dos modelos (Figuras 3.10 e 3.11), nomeadamente a meio vão e sobre as zonas de carga, e com os LVDTs 1 e 7 medem-se os eventuais deslocamentos dos apoios. O conhecimento destes últimos valores permitem corrigir as flechas finais nas outras secções da laje, através da expressão:

$$\delta'_i = \delta_i - \left[ \delta_1 + \frac{\delta_7 - \delta_1}{1600} X_i \right] \quad (\text{mm}) \quad [\text{Eq-3.31}]$$

com,

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta_i, \delta'_i \text{ - valor inicial do deslocamento vertical registado no LVDT n}^\circ \text{ "i" e valor corrigido} \\ \text{respectivo (em milímetros);} \\ i = 1, 7 \text{ - n}^\circ \text{ do LVDT;} \\ X_i \text{ - distância da posição do LVDT n}^\circ \text{ "i" à posição do LVDT n}^\circ \text{ 1 (em milímetros).} \end{array} \right.$$



O valor da curvatura a meio vão dos modelos de laje pode ser obtido da informação recolhida pelos transdutores 8 e 9, colocados junto às fibras superior e inferior da laje (Figura 3.10), por meio da operação seguinte:

$$1/R = \frac{|\delta_8| + |\delta_9|}{h^* \times s^*} \times 10^{-3} \quad (\text{m}^{-1}) \quad [\text{Eq-3.32}]$$

com,

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta_8, \delta_9 - \text{valores dos deslocamentos registados pelos LVDT 8 e 9 (em milímetros);} \\ h^* - \text{afastamento entre as fibras traccionada e comprimida onde se avalia as deformações} \\ \text{(em metros);} \\ s^* - \text{distância entre as duas secções transversais onde se mede a curvatura (em metros).} \end{array} \right.$$

Como o intervalo de leitura das deformações obtidas pelos LVDTs nº 8 e 9 é pequena, cerca de 23 cm, os resultados estão sujeitos à influência do número de fendas que possam vir a formar-se nesse intervalo e, conseqüentemente, repercutir-se no cálculo do valor da curvatura nessa zona.

Deste modo, o valor da curvatura dos modelos de laje sujeitos à flexão pode ser obtido, também, da informação recolhida pelos transdutores 3, 4 e 5, localizados no vão de flexão pura desses modelos, por meio da expressão:

$$1/R = \frac{\delta_3 - 2\delta_4 + \delta_5}{\Delta x^2} \times 10^{-3} \quad (\text{m}^{-1}) \quad [\text{Eq-3.33}]$$

Com,

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta_3, \delta_4, \delta_5 - \text{valores dos deslocamentos registados pelos LVDT 3, 4 e 5 (em milímetros);} \\ \Delta x - \text{afastamento entre os LVDTs (de 25 centímetros).} \end{array} \right.$$

A instrumentação dos modelos com extensómetros eléctricos, colados aos compósitos de carbono, permite realizar um estudo mais detalhado sobre os estados de deformação e de tensão na interface betão-adesivo-compósito. Nestes casos, para cada ensaio efectuado estabelecem-se diagramas com a variação das extensões ( $\varepsilon_L$ ) ou tensões normais ( $\sigma_L$ ) no CFRP, ao longo do eixo longitudinal daquele.

Os valores das extensões são medidos, a partir de cada posição do extensómetro colado no modelo e apresentados nesse diagrama, segundo alguns níveis de carga até à rotura. As tensões normais são calculadas a partir das extensões admitindo,

$$\sigma_L = E_{Lm} \times \varepsilon_L \quad (\text{MPa}) \quad [\text{Eq-3.34}]$$

com,

$E_{Lm}$  - módulo de elasticidade médio do material compósito definido para o *CarboDur S 512* e para o *Replark 20* pelas equações [Eq-3.27] e [Eq-3.30].

Através do conhecimento do diagrama das extensões, é possível avaliar um diagrama em escada com as tensões tangenciais (tensões de aderência) resultantes da transferência de forças entre o compósito e o betão. Estas tensões são calculados em termos médios,  $\tau_{med}$ , entre posições de extensómetros consecutivos e pela expressão seguinte:

$$\tau_{med} = \frac{\Delta F}{\Delta L \times b_2} \quad (\text{kPa}) \quad [\text{Eq-3.35}]$$

onde,

$$\left( \begin{array}{l} \Delta F = E_{Lm} \times \Delta \varepsilon \times t_L \times b_1 \times 10^{-6} \text{ - variação do esforço axial no CFRP (em kN);} \\ t_L, b_1 \text{ e } E_{Lm} \text{ - espessura, largura e módulo de elasticidade médio do compósito de CFRP} \\ \text{(em metros e kPa);} \\ \Delta \varepsilon \text{ - variação da deformação do compósito entre dois extensómetros consecutivos} \\ \text{(em microstrains);} \\ \Delta L \text{ - afastamento entre os extensómetros em análise (em metros);} \\ b_2 \text{ - largura média da faixa de interface adesivo-betão, que em princípio, é igual ou} \\ \text{superior a "b}_1\text{" (em metros).} \end{array} \right. \quad [\text{Eq-3.36}]$$

Na Figura 3.43, indica-se o aspecto dos diagramas da extensão e da tensão tangencial média na interface esperados, bem como a possibilidade de informarem onde surgem fendas ou destacamento do laminado (Rodrigues, 1993). As tensões tangenciais (ou corte) de sinal contrário poderão estar relacionadas com o aparecimento de fissuras e as tensões tangenciais próximas de zero indicam uma zona de destacamento do laminado ou do betão ou, ainda, uma zona de colagem imperfeita.

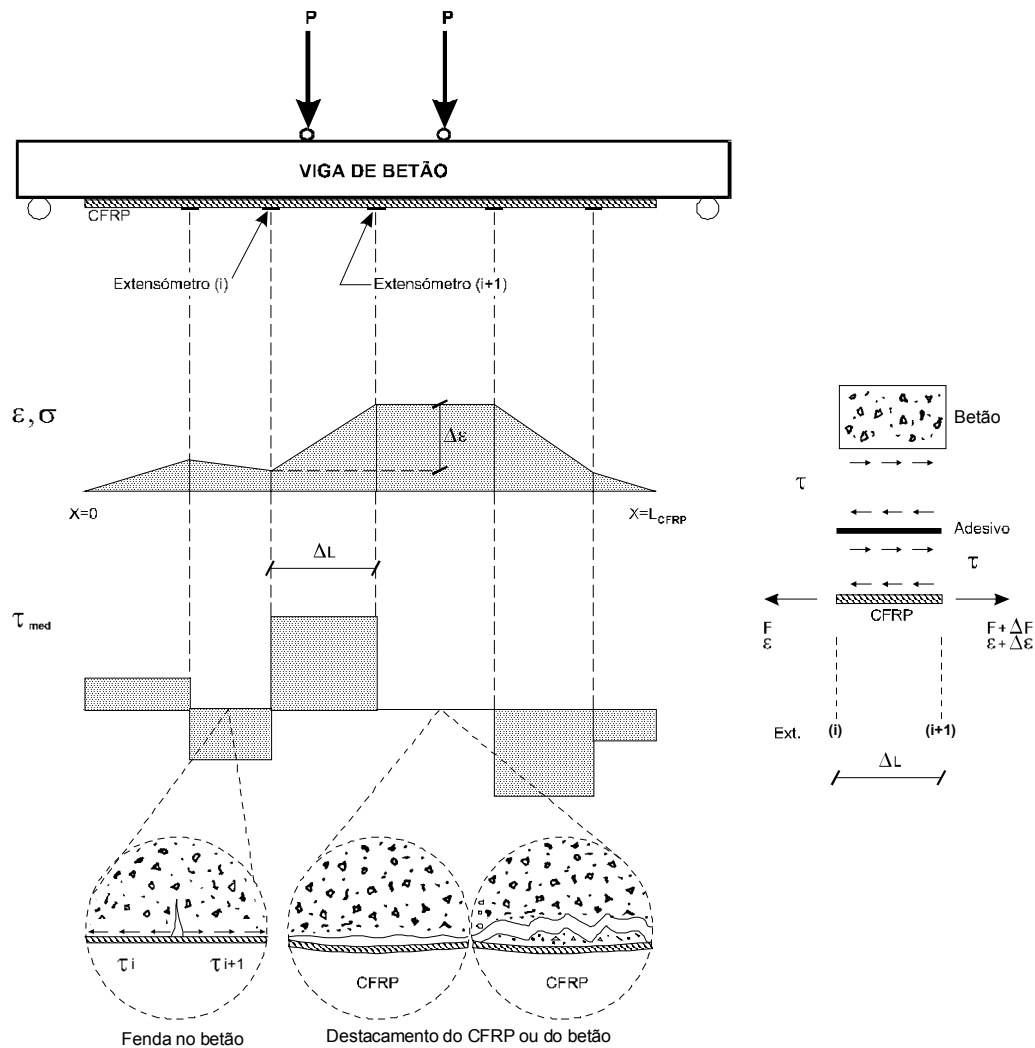


Figura 3.43 - Análise dos resultados medidos com os extensómetros eléctricos (diagramas de extensões e de tensões médias de corte).

Ao analisar os valores medidos para as deformações médias de compósito tem-se o cuidado de observar o número e a posição das fendas em relação aos extensómetros aplicados. Quanto mais próxima do ponto de leitura estiver a fenda, maior será a deformação medida por esse dispositivo. Contudo, recorda-se que os valores médios obtidos englobam quer a região entre fendas, quer os picos de deformação do CFRP no local da fenda. Para interpretação destes dados, o padrão de fendas e o conhecimento base do mecanismo de fendilhação de um elemento de betão armado flectido é de grande utilidade (De Souza, 1990).

Uma interpretação sobre o que se passa ao nível da formação, que Deuring (1993) apelidou de "elemento de fenda" é traduzida, aproximadamente, no esquema da Figura 3.44. A imagem mostra um elemento de betão reforçado com CFRP e solicitado por um momento flector. De forma qualitativa, representam-se as extensões no betão ( $\epsilon_c$ ), no aço ( $\epsilon_s$ ) e no compósito ( $\epsilon_L$ ), como também, para este último se expõe a respectiva tensão de corte (aderência  $\tau_L$ ). No esquema, distingue-se a  $I^a$  e

2<sup>as</sup> fendas e os estados não fendilhado (I) e fendilhado (II). As 1<sup>as</sup> fendas formam-se quando na fibra mais traccionada é ultrapassada a resistência à tracção do betão ( $f_{ctm}$ ). Na secção da fenda, as tensões no aço e no compósito são máximas e as correspondentes forças de tracção destes materiais são transmitidas por aderência ao betão, de ambos os lados da fenda. Isto significa que, na secção da fenda, as tensões de aderência nas interfaces aço-betão ( $\tau_s$ ) e compósito-betão ( $\tau_L$ ) passam por um zero e que na zona entre fendas as extensões no betão, ao nível da armadura e do CFRP, igualam as destes materiais ( $\epsilon_c^I = \epsilon_s^I$  e  $\epsilon_c^I = \epsilon_L^I$ ).

A progressão do padrão de fendilhação, com o aumento da carga sobre os modelos, conduzirá a um dos estados finais descritos por Deuring no item 2.3.2 (modos de ruína). Este padrão é influenciado por alguns factores, em especial pelas armaduras transversais (estribos). A resistência à tracção do betão apresenta, também, variações devido à não homogeneidade do material e a tensões internas que resultam em microfissuras. Estes enfraquecimentos locais podem explicar, em parte, a dispersão do padrão de fendilhação.

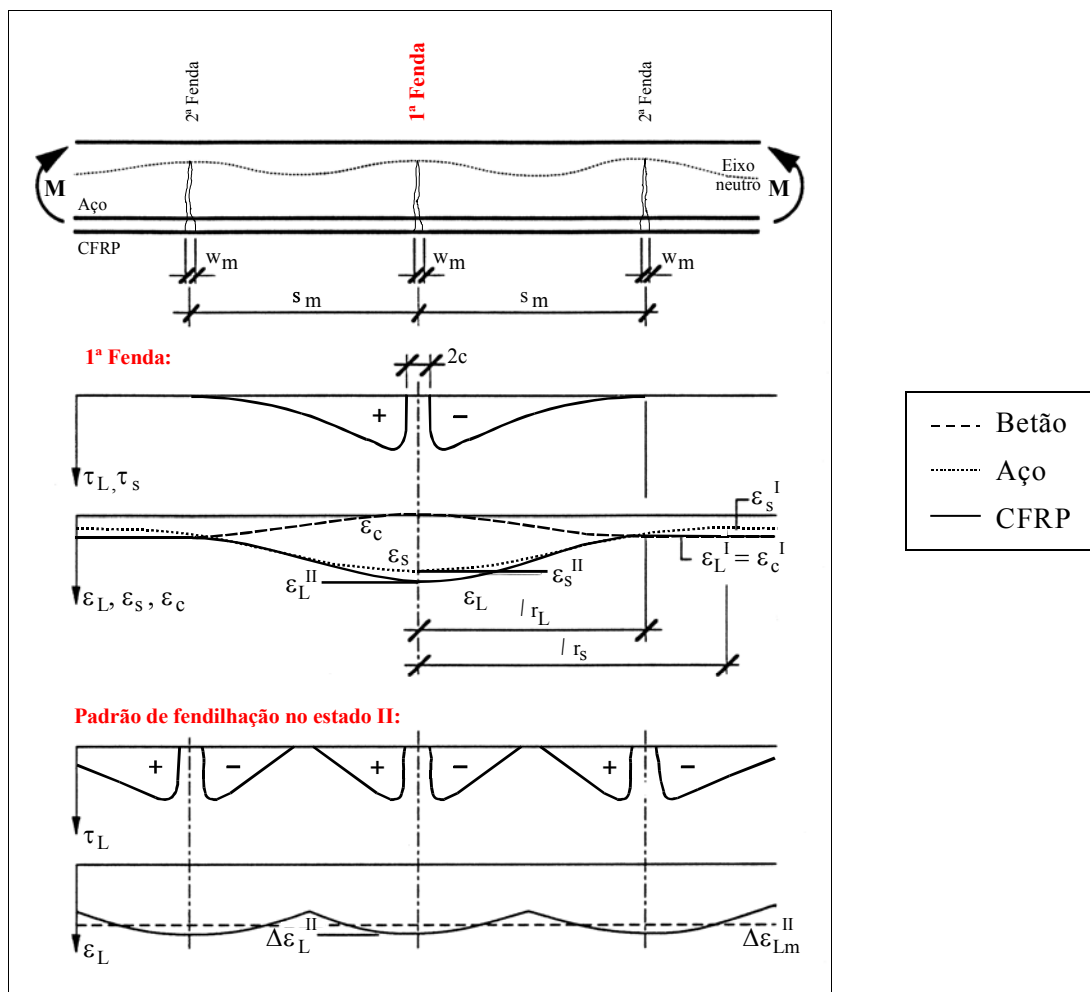


Figura 3.44 - Esquema de formação de fenda num elemento de betão sollicitado à flexão, estados I e II (Deuring, 1993).



# Capítulo 4

## Caracterização da Ligação e Aplicação do CFRP

De um modo geral, a técnica de aplicação de um reforço exterior ao elemento de betão envolve duas fases, ou seja, a preparação das superfícies a colar (*1ª fase*) e a colagem dos materiais compósitos propriamente dita (*2ª fase*). Entretanto, inserido nestas duas fases situa-se o processo de confirmação do estado actual da resistência de aderência na interface betão-adesivo-compósito de CFRP, isto é, caracterização da ligação colada, fundamental para a previsão do bom desempenho do reforço. O objectivo deste Capítulo é expor os critérios definidos nos procedimentos destas três etapas, desenvolvidos ao longo do processo de reforço dos vários modelos de viga e de faixas de laje em estudo.

### 4.1 - TRATAMENTO DA SUPERFÍCIE DE LIGAÇÃO

A preparação das superfícies de interface entre o betão e o compósito de CFRP deve ser bem cuidada, de modo a obter-se as condições necessárias à boa aderência do adesivo. Nesse sentido, expõem-se de seguida os processos e os produtos utilizados no tratamento das superfícies de ligação, conforme as instruções propostas nas informações técnicas dos produtos de reforço.

#### 4.1.1 - Laminado pré-fabricado

Neste grupo, o critério utilizado para a preparação da superfície do betão varia de acordo com os objectivos da investigação, os equipamentos disponíveis, os modelos seleccionados para os ensaios e os sistemas CFRP utilizados no reforço destes. Assim, passa-se a descrever a respectiva informação segundo a ordem estabelecida para os trabalhos, isto é, primeiro os modelos de viga e posteriormente as faixas de laje.

##### *(i) - Preparação das vigas (modelos tipo A, B, C)*

Como processos aconselháveis para o betão (referidos no item 2.3.3.1), utilizaram-se a picagem com passagem de escova de aço (num grupo de vigas), a projecção de jacto de areia (noutro grupo de vigas) e ainda, a decapagem com o martelo de agulhas ilustrado na Figura 4.1-a (último grupo de vigas), de modo a extraírem-se gorduras, óleos, partículas soltas ou leitanças. Após a limpeza, foi removida toda a poeira da superfície no momento de aplicação do adesivo. No caso particular da

viga *B.3*, como a superfície se apresentava bastante irregular e como se pretendia estudar o comportamento de um primário, efectuou-se a reparação da superfície com a aplicação da argamassa *Sikadur 31*. Quanto ao laminado, foi limpo com um desengordurante tipo *Sika Cleaner 205*.

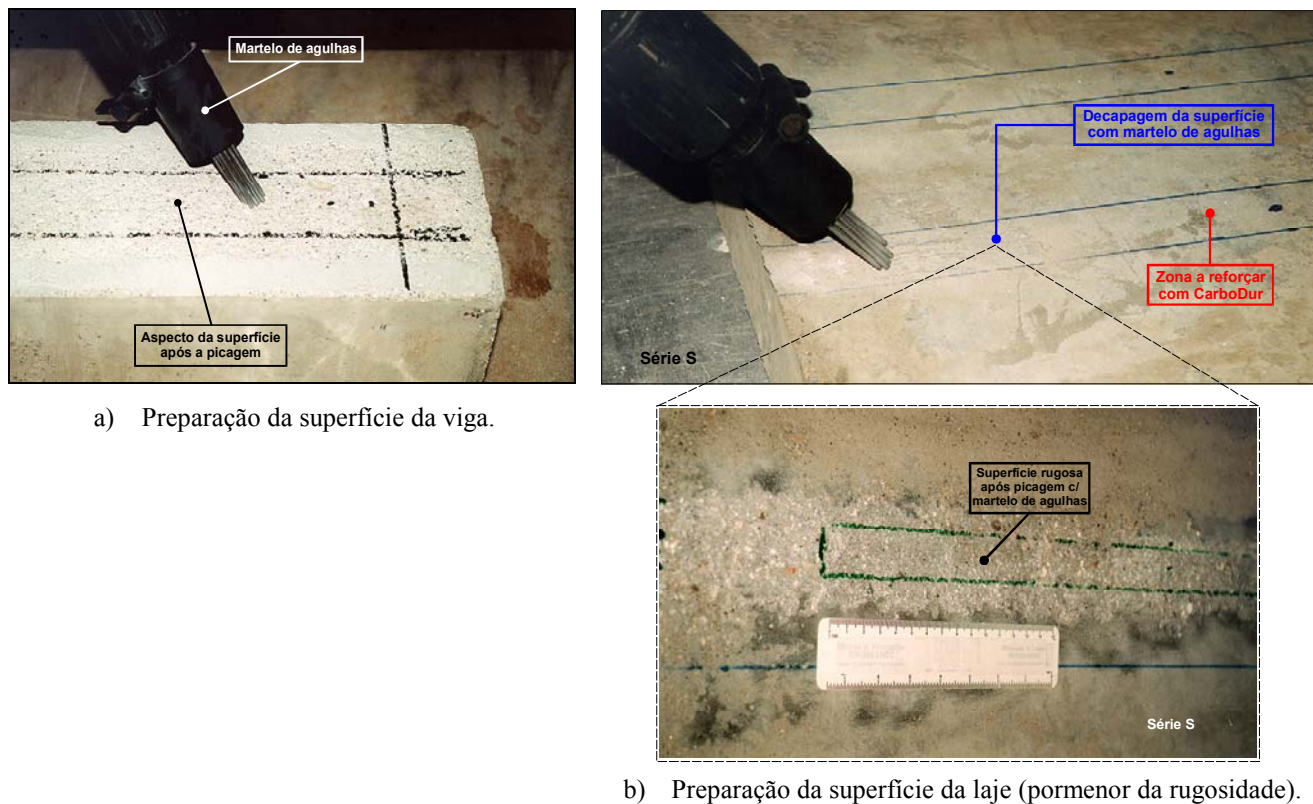


Figura 4.1 - Preparação da superfície de betão com um martelo de agulhas (modelos de viga e de laje).

Estes processos de preparação são distribuídos pelos modelos, de acordo com a informação apresentada nas Tabelas B.1 a B.3, integradas no anexo B, para as vigas *tipo A*, *tipo B* e *tipo C*.

(ii) - Preparação das faixas de laje (modelos tipo S)

Nos modelos reforçados com os laminados *CarboDur S 512*, iniciou-se a decapagem da camada superficial do betão com o recurso a um martelo de agulhas (Figura 4.1-b), de modo a eliminar-se a leitança do betão. Após a limpeza, removeu-se toda a poeira da superfície com jacto de ar, ficando os inertes à vista, através de uma superfície com rugosidade uniforme, apta a receber o adesivo *Sikadur 30*. Nestes modelos, não se justificou efectuar qualquer reparação superficial com um primário. Quanto ao laminado, foi limpo com um desengordurante tipo *Sika Cleaner 205* (Sika, 1998).

#### 4.1.2 - Manta flexível e pré-impregnada

Este grupo reporta-se, exclusivamente, à preparação das faixas de laje com a designação de série *tipo R*.

As fases de preparação da superfície de betão para a futura colagem da manta flexível de CFRP, bem como o critério de ordenamento das mesmas e as propriedades dos produtos utilizados obedecem às indicações expressas na Figura 4.2 e na Tabela 4.1, obtidas na literatura técnica do sistema Replark (1997).

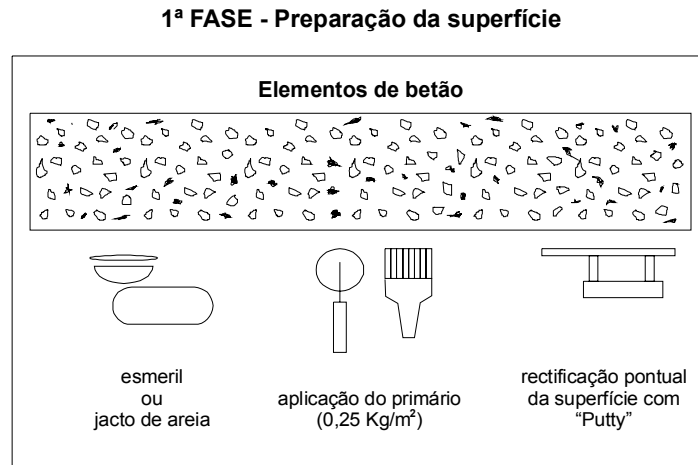


Figura 4.2 - Preparação da superfície (Replark, 1997).

Tabela 4.1 - Especificação das resinas (de saturação, primário, "putty") do sistema Replark (1997).



### EPOTHERM

### Resin for Replark system

[1]

	RESIN L700S, L700W	PRIMER PS301, PS401	PUTTY L525
SPECIFIC GRAVITY	1.0 - 1.3	0.85 - 1.25	1.4 - 1.6
VICOSITY (mixture) (mPa x sec)	máx. 15000	máx. 700	(Putty)
TENSILE STRENGTH N/mm <sup>2</sup> (psi)	min. 29.4 (min. 4270)	—	—
FLEXURAL STRENGTH N/mm <sup>2</sup> (psi)	min. 39.2 (min. 5690)	—	—
BOND STRENGTH to Concrete N/mm <sup>2</sup> (psi)	min. 1.5 (min. 210)	min. 1.5 (min. 210)	min. 1.5 (min. 210)

[1]- Informações textuais da ficha técnica sobre o sistema Replark (1997)

Nos modelos *tipo R* reforçados com mantas flexíveis, removeram-se as sujidades e a fina camada de leitada de cimento, através do polimento com um esmeril e a projecção de jacto de ar. Procurou-se, nestes casos, obter uma superfície lisa e com exposição dos inertes superficiais.



No sentido de melhorar as propriedades aderentes da camada de betão da interface, aplicou-se um primário de referência *PS 301* e corrigiram-se as irregularidades pontuais da superfície, com o revestimento à espátula de uma argamassa de resina de epóxico tipo "Putty" *L 525* (Tabela 4.1). O primeiro melhora a coesão das partículas no betão e a adesão ao compósito, através da impregnação do produto no betão. O segundo proporciona a plena adesão da área do compósito à superfície do betão. Estes produtos foram apresentados na Figura 2.8-b (Capítulo 2) e ilustram-se na Tabela 4.2 com as fotografias das fases de tratamento superficial dos modelos. Após a aplicação do primário e do "Putty" deixaram-se curar os produtos, nas condições de temperatura e humidade ambiente, durante dois dias no mínimo, de modo a obter-se o grau desejável para a aplicação posterior do compósito de CFRP.

## 4.2 - AVALIAÇÃO DA ADERÊNCIA AO BETÃO

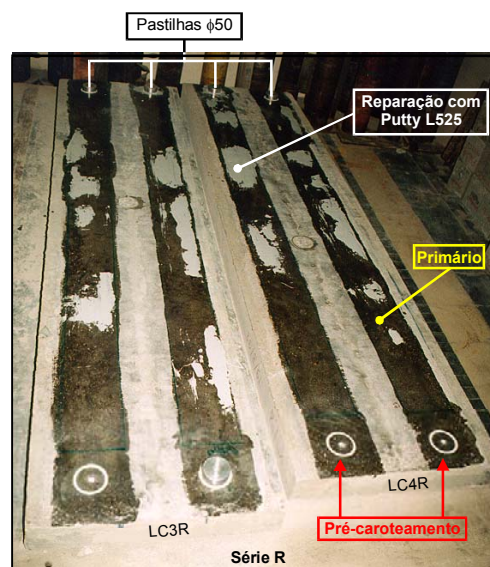
Segundo a literatura específica nesta área, depois de tratada a superfície do betão, devem realizar-se ensaios de "bond-test", isto é, ensaios de caracterização das tensões de tracção e de corte superficiais do betão, para se estimar o valor máximo da designada *tensão de aderência* ( $\tau_{máx} = \tau_b$ ) da ligação entre os materiais (junta betão-adesivo-compósito). Este aspecto ainda não está definido de forma clara na literatura internacional. Contudo, os modos de rotura e o valor de ruína da tensão média de aderência ( $\tau_{med} = \tau_{bm}$ ) podem ser estimados a partir de vários ensaios, que foram resumidos no Capítulo 2, item 2.3.3.2. A superfície do betão deve apresentar a maior resistência possível à tracção e ao corte, de modo a permitir a máxima transferência de forças entre si e o compósito. Nestes termos, a tensão de aderência ao betão no ensaio de arrancamento por tracção ou "pull-off" é aceitável para valores médios de tensão de tracção ( $f_{ctm,p}$ ) iguais ou superiores a  $1.4 \text{ MPa}$ , segundo o ACI 440F (1999), e a  $1.5 \text{ MPa}$ , propostos pelo CEB (CEB-GTG 21, 1990), por Meier (1997-b) e pelas homologações Nr. Z-36.12-29 (1997) e Nr. Z-36.12-54 (1998) do DIBt. Caso contrário, não é conveniente efectuar o reforço exterior com colagem.

Os ensaios directos de aderência sobre a superfície do betão podem ser executados de duas formas, mediante os objectivos que se pretenda obter, mas sempre com o princípio comum de que se avaliam características superficiais (Tabela 2.7 do item 2.3.3.2). No caso de arrancamento por tracção de uma pastilha metálica previamente colada no betão (teste de "pull-off" subscrito na pré-norma prEN 1542; 1998), mede-se a resistência à tracção perpendicular à ligação ( $f_{ctm,p}$ ). Se a mesma pastilha for extraída por um movimento de torção ("torque-test"), quantifica-se a resistência ao corte.

Tabela 4.2 - Tratamento da superfície de betão.



a) Passagem com o esmeril.



c) Reparação pontual com “Putty” L 525 (cor clara)

Do conjunto reduzido de ensaios definidos por vários investigadores sobre este assunto, o *ensaio de arrancamento por tracção* é, actualmente, utilizado "in situ" para análise da aderência na ligação entre materiais e superfícies de betão. O ensaio consiste na medição da força de tracção necessária para o arrancamento de pastilhas metálicas (secção circular ou quadrada) previamente coladas à superfície de betão com uma cola tipo epoxídica. O valor da *tensão de tracção*,  $f_{ct,p}$  (neste contexto admite-se igual à *tensão de aderência*) obtém-se dividindo o esforço de tracção na rotura pela secção da pastilha. Para circunscrever a tensão de aderência à área real da colagem, pode efectuar-se uma pré-carotagem no perímetro da pastilha (secção circular), de modo a penetrar cerca de *1.5 cm* no elemento de betão (LNEC FE-Pa36, 1986; prEN 1542, 1998).

Na Figura 4.3, ilustra-se a fotografia do aspecto geral do ensaio e os esquemas de tracção directa com (e sem) pré-carotagem da superfície de betão. O equipamento usado consta de:

- carotadora portátil com coroas de  $\phi 50\text{ mm}$ ;
- aparelho de tracção de referência "SETA bond-test" (capacidade  $1000\text{ daN}$ );
- bateria de suporte;
- pastilhas metálicas com diâmetro de  $\phi 50\text{ mm}$ ;
- dois tipos de cola: "araldite rapid" e "massa corfer" de betume ferro;
- colas de base dos CFRP: adesivo *Sikadur 30* (CarboDur) e resina de saturação *L700W* (Replark).

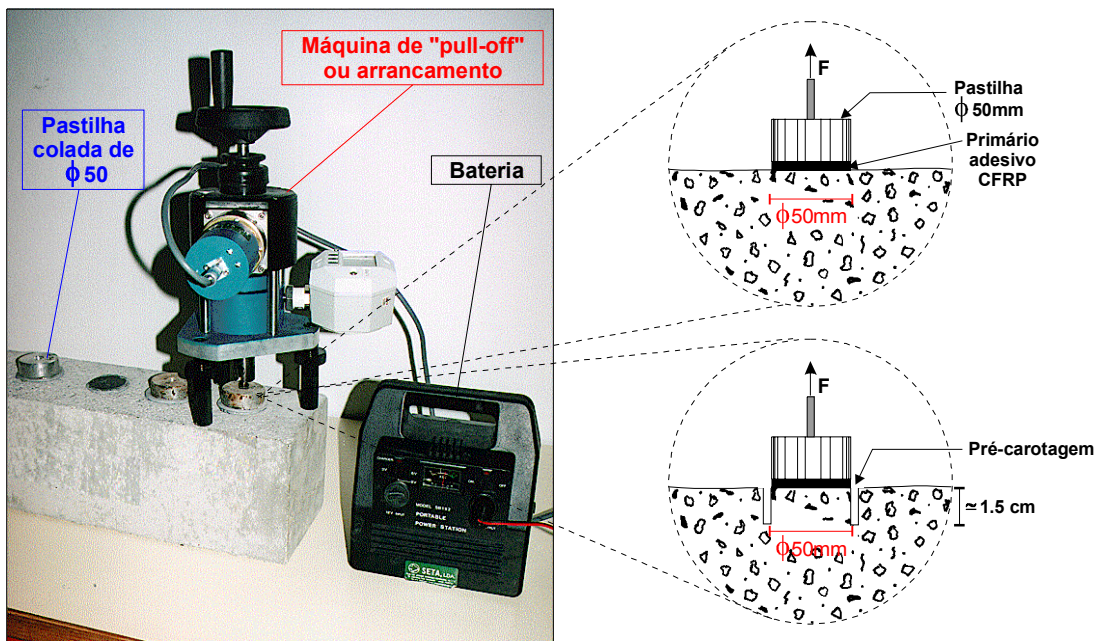


Figura 4.3 - Ensaio de arrancamento por tracção ou "pull-off".

Por limitação de equipamento e de tempo, neste trabalho só foram realizados os ensaios de arrancamento por tracção (não os por torção) para caracterizar a aderência da interface betão-adesivo-CFRP-pastilha e da ligação betão-adesivo-pastilha.

Os modos de ruína podem ocorrer por corte integral ao longo de uma superfície de betão, por rotura do adesivo, por destacamento na interface de ligação dos materiais ou, por último, pela conjugação dos três casos (observar Figura 4.4). Se a ruína se manifestar no betão ou no adesivo, determina-se a resistência à tracção dos mesmos, e este valor é um limite mínimo para a resistência da ligação. Se a ruína ocorrer, uma parte na interface de ligação e a outra no betão ou no adesivo, significa que a resistência à tracção dos dois é semelhante e o valor determinado é considerado como um valor médio da aderência.

Antes de se descrever os ensaios e para se interpretar melhor os resultados, os modos de ruína esperados apresentam-se, resumidamente, na Figura 4.4 e com a legenda seguinte (com ou sem carotagem prévia do betão):

- Tipo 1 - Destacamento por corte no betão;
- Tipo 2 - Rotura parcial por corte no betão e descolagem na interface adesivo-betão (ou adesivo-material de reparação superficial);
- Tipo 3 - Destacamento pela superfície da interface de ligação adesivo-betão ou adesivo-material de reparação superficial (ou ainda adesivo-pastilha);
- Tipo 4 - Destacamento por corte no betão de juntas tipo betão-adesivo-CFRP-pastilha (com carotagem prévia).

Os ensaios de aderência (por arrancamento) vão incidir sobre as superfícies de betão a reforçar, distribuídos pelos dois programas de trabalho em questão, ou seja, em primeiro lugar, pelo estudo de três séries de vigas e, posteriormente, pela análise de reforço de duas séries de faixas de laje. Infelizmente, pelo facto de ter-se disponibilizado demasiado tarde o equipamento para os ensaios de "pull-off", o primeiro programa de ensaios (a série de vigas) realizou-se na sua maior parte após se efectuarem os testes de flexão sobre os modelos. Pelo contrário, o segundo programa decorreu normalmente, antes de se executar a fase de reforço da série de faixas de laje.

#### 4.2.1 - Série de vigas

##### (i) - Modelos recentes (séries tipo A e tipo B)

Os ensaios de arrancamento por tracção foram executados na superfície da viga, com o tratamento prévio do betão descrito no item 4.1 e correspondente à área ocupada pelo reforço com o laminado de CFRP. Paralelamente, recorreu-se a ensaios sobre alguns prismas de betão, respeitando as amassaduras correspondentes às vigas em estudo, de modo a avaliar-se melhor a aderência.

Neste primeiro grupo de ensaios incluem-se os modelos de vigas designadas pelas séries *tipo A* e *tipo B*. Na Tabela B.4, apresentada no anexo B, resume-se toda a informação sobre os critérios e os resultados destes ensaios, incluindo o modo de ruína de cada pastilha. Apesar dos testes indicarem

alguma dispersão de resultados, o caso mais corrente foi o tipo de ruína pelo betão (tipo 1/tipo 4). Para se ter uma ideia dos valores da resistência superficial do betão à tracção, apresenta-se na Tabela 4.3 os valores médios das tensões de "pull-off" (designadas também por tensões de aderência) medidos, agrupando-os segundo o número da amassadura, a sigla da viga submetida ao ensaio e o tipo de adesivo usado na colagem das pastilhas metálicas ao betão.

### ENSAIO DE ARRANCAMENTO POR TRACÇÃO - Modos de Ruína

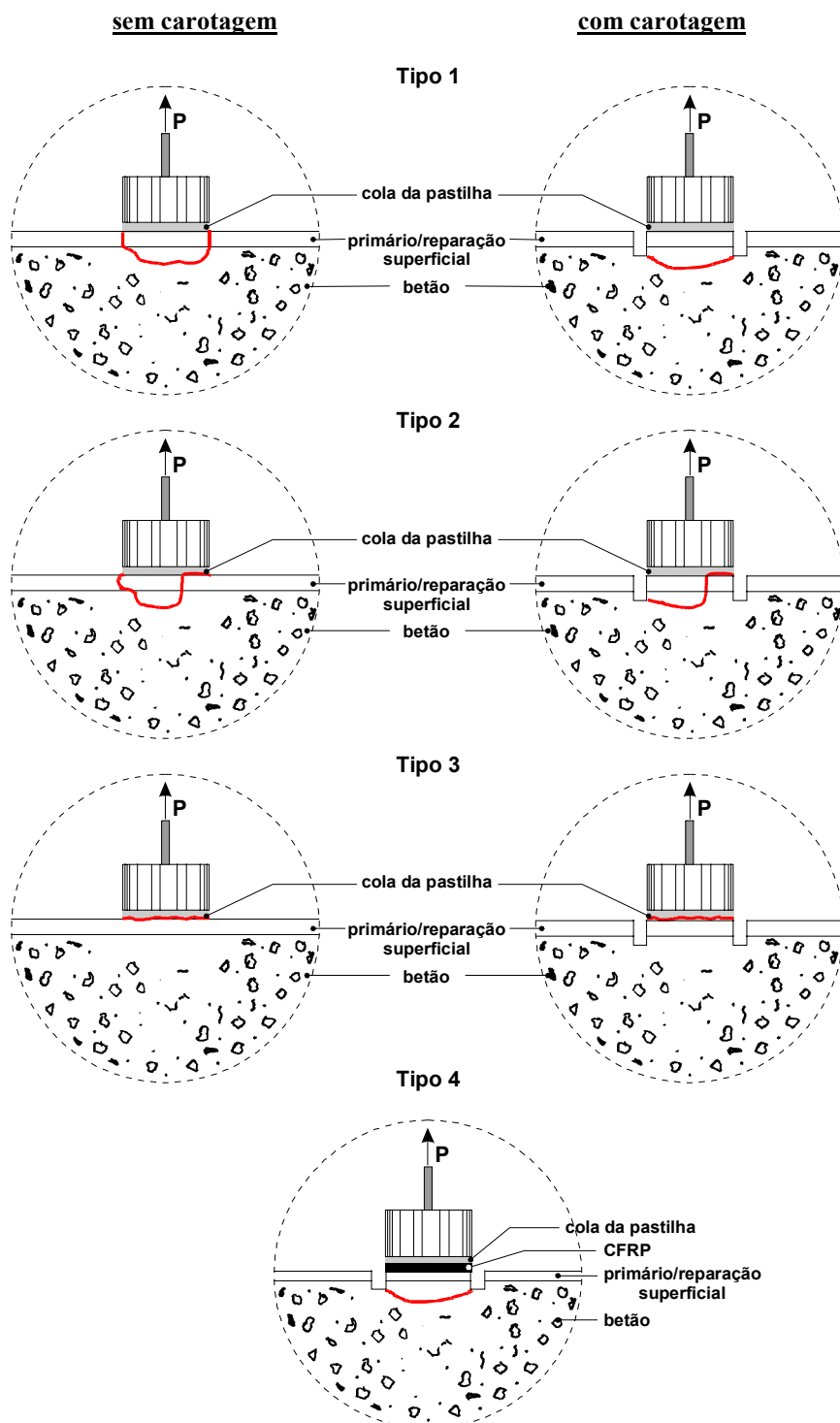


Figura 4.4 - Modos de ruína do ensaio de arrancamento por tracção ("pull-off").

Tabela 4.3 - Valores médios de  $f_{ctm,p}$  obtidos nos ensaios de arrancamento sobre as vigas *tipo A* e *tipo B*.

Amassadura n°	Viga	$f_{ctm,j}$ [i] (MPa)	$f_{ctm,p}$ (MPa) [iii]		
			massa corfer	araldite rapid	Sikadur 30
<b>Vigas tipo A</b>			(sem carotagem)		
③	A.1	2.5	1.5	-	-
④	A.2	3.2	1.4	-	-
⑤	A.3, A.4	2.9	1.6	-	-
<b>Vigas tipo B</b>			(sem carotagem)		
②	B.1, B.2	2.4 - 2.5	1.6	-	-
⑥	B.4, B.13	2.9 - 3.2	-	-	-
⑦	B.5, B.6	2.9	1.2	-	-
⑧	B.7, B.8	2.8	2.3	2.6	3.1
⑨	B.9, B.10	2.7	1.7	-	3.5
⑩	B.11, B.12	2.5	1.8	2.0	-
⑥	B.3 [ii]	3.1	2.5	-	-

[i] - Valores retirados da Tabela 3.8;

[ii] - Pastilha colada sobre o primário tipo *Sikadur 31*;

[iii] - Distribuição dos valores da aderência (admite-se que  $\tau_{bm} = f_{ctm,p}$ ) segundo os tipos de adesivos usados na colagem das pastilhas ao betão (consultar Tabela B.4 do anexo B).

Em termos gerais, pode concluir-se que:

- 1 - Obtiveram-se valores baixos de aderência, sobretudo nos ensaios de arrancamento sobre as vigas, quando comparados com os valores previstos da resistência à tracção do betão na data dos ensaios ( $f_{ctm,j}$ ). Isto deve-se provavelmente ao facto destes testes se realizarem sobre um betão microfendilhado (após ensaios de flexão das viga) e a colagem das pastilhas não ser efectuada com o adesivo mais conveniente;
- 2 - Nas poucas situações em que houve oportunidade de executar os testes de "pull-off" sobre prismas (resultantes das mesmas amassaduras) e com o adesivo *Sikadur 30*, os resultados são mais fiáveis e próximos da realidade (valores de  $f_{ctm,p}$  superiores a  $3.0 \text{ MPa}$ );
- 3 - Por se tratarem dos primeiros ensaios realizados pelo autor (prática diminuta), por as superfícies do betão não serem as mais convenientes (após ensaios de flexão) e pelo facto de a cola "massa corfer" apresentar comportamento inferior em relação à "araldite rapid" e ao *Sikadur 30*, justifica-se a dispersão dos valores descritos na Tabela 4.3. Contudo, em média, o valor da aderência na superfície do betão das vigas *tipo A* e *tipo B* é superior ao valor mínimo de  $1.5 \text{ MPa}$ , proposto pela literatura internacional para estas circunstâncias.

(ii) - Modelos com oito anos (série tipo C)

Esta série de vigas apresenta um betão poroso e de baixa qualidade, com um certo grau de deterioração, devido a oito anos de exposição ambiente, avaliado por alguns ensaios *destrutivos* e *não destrutivos* efectuados sobre as vigas, após os ensaios de flexão (consultar Capítulo 3). Destes últimos, descreve-se agora os ensaios de arrancamento por tracção que são repartidos por duas etapas:

- 1- Primeiro, esses arrancamentos são executados na *superfície exposta* da viga após a preparação da zona do betão correspondente à área ocupada pelo reforço com o laminado de CFRP (superfície deteriorada);
- 2- Depois, os testes de tracção são efectuados na *zona interior* das vigas, nas superfícies de betão expostas pelos provetes prismáticos serrados das mesmas (consultar Capítulo 3) e segundo o plano indicado na Figura 4.5. A escolha desta zona da viga deve-se ao facto de se pretender evitar a influência da deterioração superficial do betão nos resultados do ensaio e, deste modo, analisar a diferença da resposta nas duas circunstâncias.

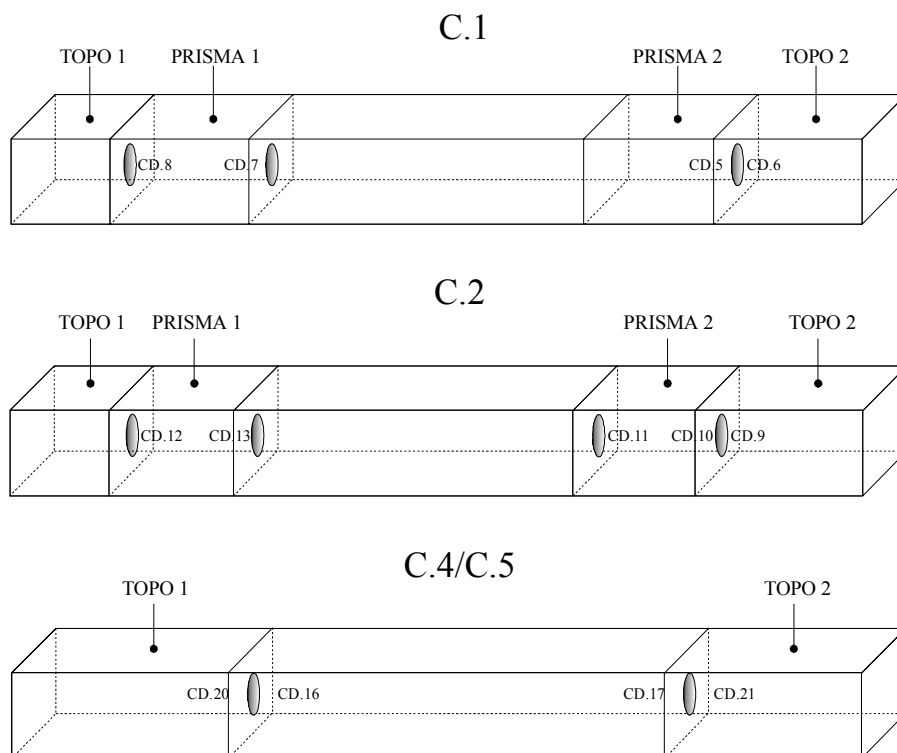
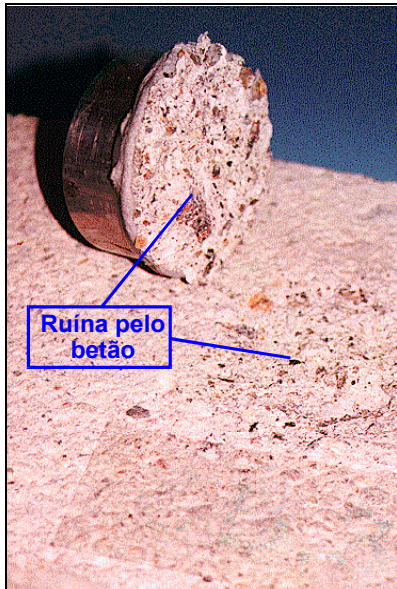


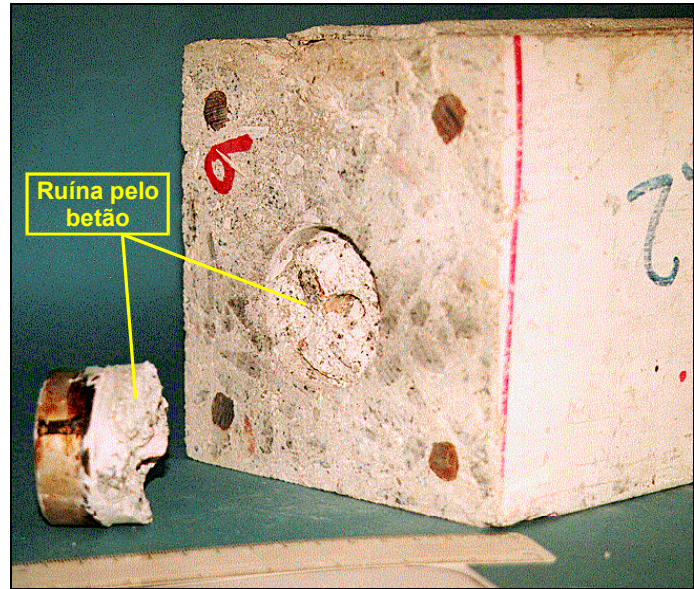
Figura 4.5 - Localização das pastilhas na zona interior dos prismas serrados às vigas C.1, C.2, C.4 e C.5.



A Tabela B.5, incluída no anexo B, resume toda a informação correspondente aos dois tipos de testes mencionados, descrevendo-se o modo de ruína obtido para cada um. Os casos mais correntes foram do tipo ruína pelo betão (tipo 1/tipo 4), como se pode observar nas Figuras 4.6-a a 4.6-c, sem e com pré-carotagem do betão. Os casos de ruína por deficiente aderência da cola à pastilha (não desejáveis) foram repetidos e conduziram, posteriormente, à situação anterior.



a) Aspecto da ruína superficial do betão (sem carotagem).



b) Aspecto da ruína no interior da viga (com carotagem).



c) Provetes após o "pull-off" no interior da viga C.2 (com carotagem).

Figura 4.6 - Ensaio de arrancamento por tracção sobre as vigas *tipo C*.

Comparando os valores médios das tensões de tracção ( $f_{ctm,p}$ ) obtidos nas duas superfícies de betão (à superfície e no interior da viga) e nas várias vigas (descritos na Tabela 4.4), verifica-se:



- 1- Em termos médios e à superfície, a aderência apresenta valores próximos entre si e da ordem de  $1 \text{ MPa}$ , apesar da excepção de  $0.7 \text{ MPa}$  obtido para a viga C.2. Consta-se um aumento deste valor quando a superfície não é carotada previamente;
- 2- Um ligeiro aumento da resistência à extracção da pastilha quando se passa de uma superfície de betão carbonatada para outra, no interior da viga não carbonatada. De qualquer modo, os resultados de  $0.9 \text{ MPa}$  e de  $1.1 \text{ MPa}$  correspondem a valores de aderência característicos de um betão pobre;
- 3- O aspecto referido no ponto 2 é acentuado, sobretudo quando se substitui a "massa corfer" pelo adesivo "araldite rapid" na colagem das pastilhas metálicas ao betão, sendo este último adesivo responsável pela extracção de uma parcela maior de betão no ensaio de "pull-off".

Tabela 4.4 - Valores médios de  $f_{ctm,p}$  obtidos nos ensaios de arrancamento sobre as vigas tipo C.

Vigas	Amassadura (nº, $f_{ctm,j}$ )	$f_{ctm,p}$ (MPa) [i]			
		À superfície		Zona interior	
C.1	① 1.6 MPa	com carotagem	[ii]	com carotagem	[ii]
C.2		1.12	0.9	1.03	1.1
C.3		0.70		1.12	
C.4		sem carotagem		com carotagem	
C.5		1.92	1.5	2.6 (*)	2.3
		1.05		2.1 (*)	

[i] - Todas as pastilhas metálicas foram coladas ao betão com a "massa corfer", excepto os casos indicados por (\*), onde recorreu-se à cola "araldite rapid"; [ii] - Média dos valores.

Em termos gerais, conclui-se que os valores de aderência superficial (por arrancamento) das vigas tipo C são inferiores ao mínimo de  $1.5 \text{ MPa}$  aconselhável pela literatura específica desta área (CEB-GTG21, 1990; Homologação Nr. Z-36.12-29, 1997), o que justifica o destacamento antecipado dos laminados de carbono, aquando dos ensaios de flexão de vigas (descrito no Capítulo 5).

#### 4.2.2 - Série de faixas de laje

Os ensaios incidiram sobre a aplicação de pastilhas metálicas ( $\phi 50 \text{ mm}$ ) em dois casos diferentes de superfícies de betão, ou seja, primeiro, directamente sobre as faixas de laje a reforçar e, segundo, sobre um grupo de provetes prismáticos obtidos nas betonagens A, B e C destas faixas.

## (i) - Lajes tipo R e S

Os ensaios de arrancamento por tracção foram efectuados na superfície de betão da face, onde serão executadas as colagens dos compósitos de CFRP. Estas superfícies apresentam o tratamento descrito no ponto 4.1 anterior, para os modelos *tipo R* e *tipo S*. Nos primeiros distinguem-se os ensaios com e sem carotagem da superfície. Excepcionalmente neste item, recorre-se não só às lajes principais (*1ª Fase*), como também aos ensaios realizados sobre a superfície de betão do grupo de lajes da *2ª Fase*, designadas por *LA3R* e *LB1R* (*tipo R*) e por *LA4S* e *LB2S* (*tipo S*). Como foi referido no Capítulo 3, este grupo não é objecto de estudo deste trabalho, contudo é conveniente adicionar à base de dados os ensaios de arrancamento destes, para se obterem conclusões mais precisas sobre os resultados da avaliação da aderência nas juntas betão-adesivo-CFRP, entre betões semelhantes (betonagens A, B e C).

Na Tabela 4.5 descreve-se o critério de distribuição dos ensaios de aderência ("pull-off") pelas faixas de laje. Por sua vez, o esquema da Figura 4.7 identifica e localiza, nos modelos, a distribuição das pastilhas metálicas, segundo o mesmo critério. Estas informações podem ser observadas, igualmente, nas fotografias do aspecto geral dos ensaios representadas na Figura 4.8.

Tabela 4.5 - Critério dos ensaios de arrancamento por tracção nas lajes.

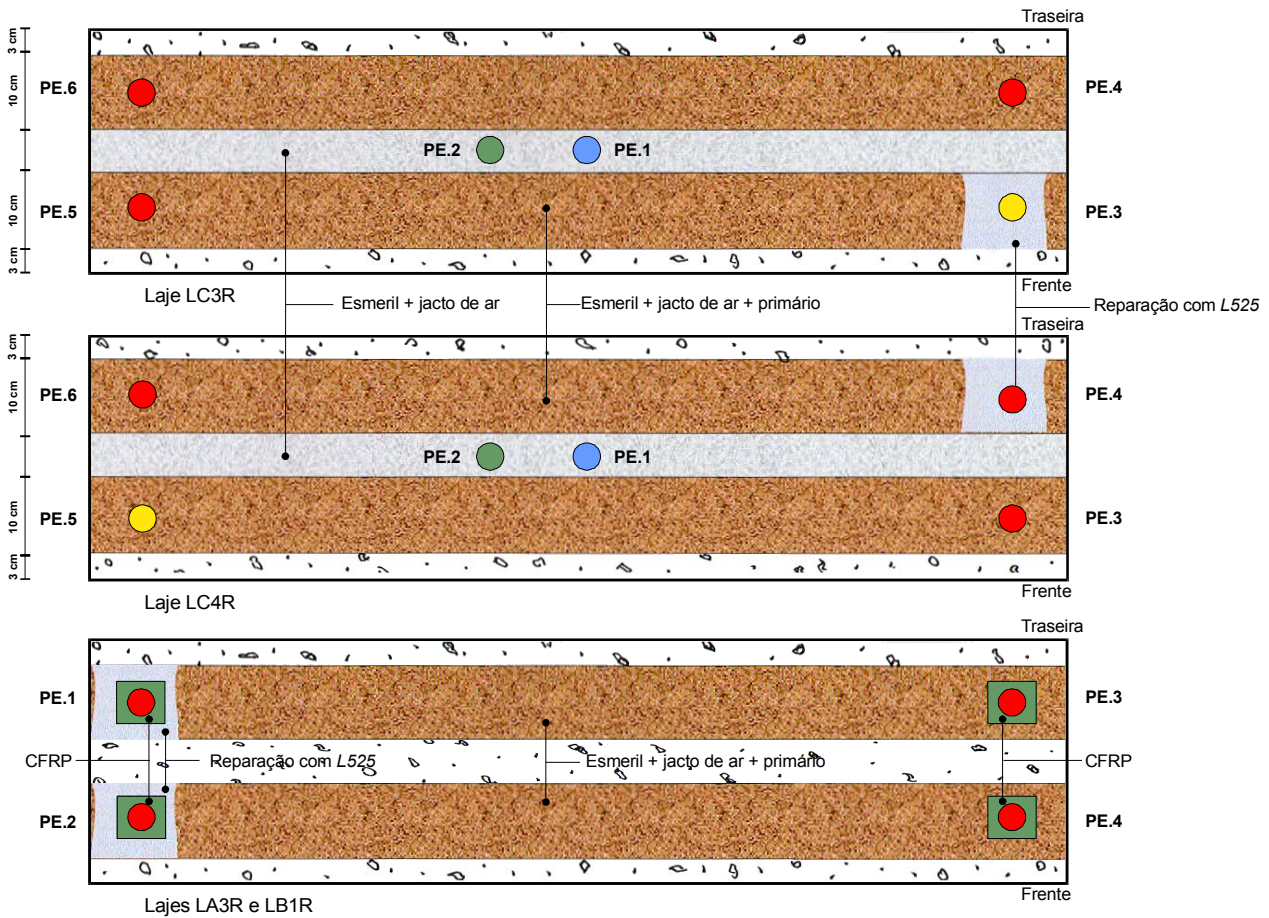
Lajes tipo		Preparação da superfície				Pastilhas de $\phi 50\text{ mm}$		
		Tratamento	Primário	Reparação [i]	Carotagem prévia	Adesivo	Laje 1 [ii]	Laje 2 [iii]
1ª Fase	Série R	esmeril + jacto de ar	sem	sem	sem	Massa corfer	PE.1	PE.1
						Araldite rapid	PE.2	PE.2
			com PS 301	com L525	Araldite rapid	PE.3	-	
					L700 W	-	PE.4	
				sem	Araldite rapid	-	PE.5	
					L700 W	PE.4,PE.5,PE.6	PE.3, PE.6	
	Série S	martelo de agulhas + jacto de ar	sem	sem	sem	Massa corfer	PM.1, PM.4	PM.1, PM.4
						Sikadur 30	PM.2, PM.3	PM.2, PM.3
2ª Fase	Série R	esmeril + jacto de ar	com PS 301	com L525	com	L700 W	PE.1, PE.2	PE.1, PE.2
				sem			PE.3, PE.4	PE.3, PE.4
	Série S	martelo de agulhas + jacto de ar	sem	sem	com	Sikadur 30	PM.1, PM.4	PM.1, PM.4

[i] - Rectificação pontual de imperfeições na superfície de colagem;

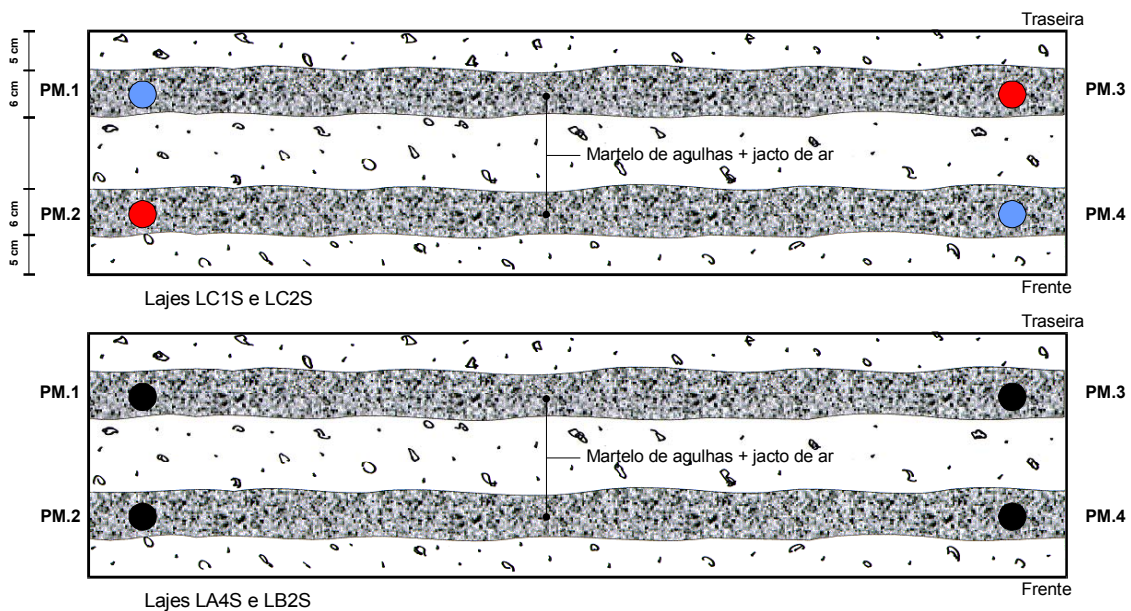
[ii] - 1ª Fase: Laje LC3R (*série R*) ou laje LC1S (*série S*) / 2ª Fase: laje LA3R (*série R*) e laje LA4S (*série S*);

[iii]- 1ª Fase:Laje LC4R (*série R*) ou laje LC2S (*série S*) / 2ª Fase: Laje LB1R (*série R*) e laje LB2S (*série S*).

**Série R (Replark 20)**



**Série S (CarboDur S 512)**

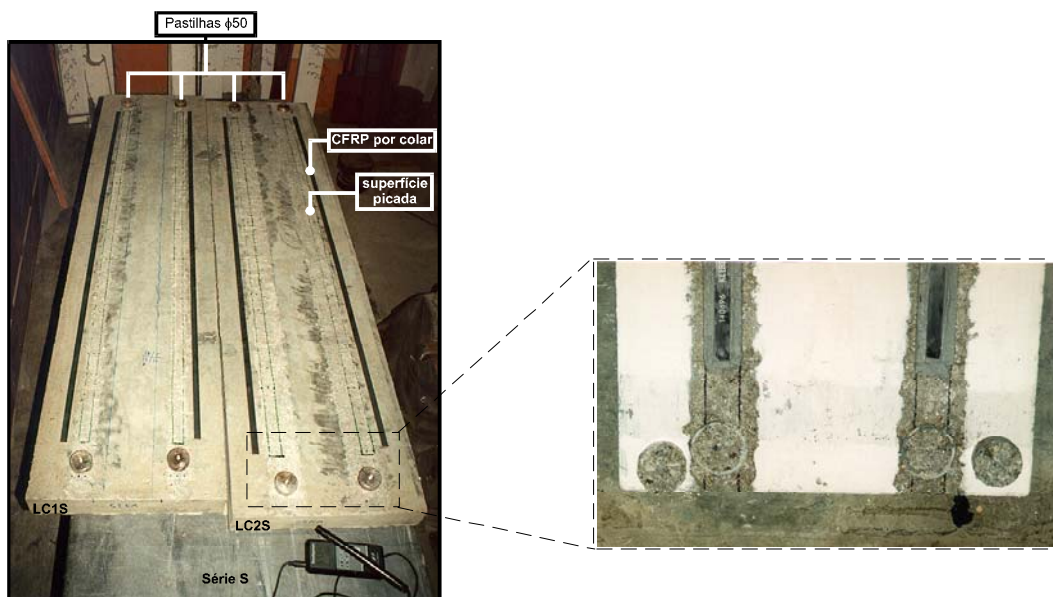


- |  |  |
|--|--|
| Pastilhas de $\phi 50$ mm (sem carotagem):                             | Pastilhas de $\phi 50$ mm (com carotagem):                           |
| <span style="color: blue;">●</span> - coladas com "Massa de ferro"     | <span style="color: yellow;">●</span> - coladas com "Araldite rapid" |
| <span style="color: green;">●</span> - coladas com "Araldite rapid"    | <span style="color: red;">●</span> - série R: coladas com "L700W"    |
| <span style="color: red;">●</span> - série S: coladas com "SikaDur 30" | <span style="color: black;">●</span> - colados com "SikaDur 30"      |

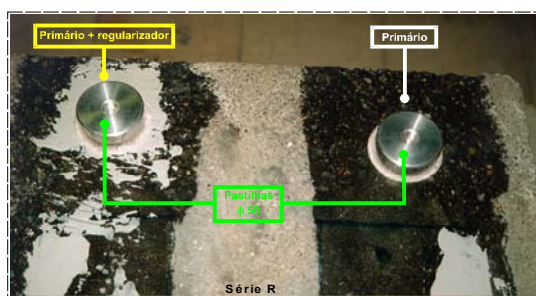
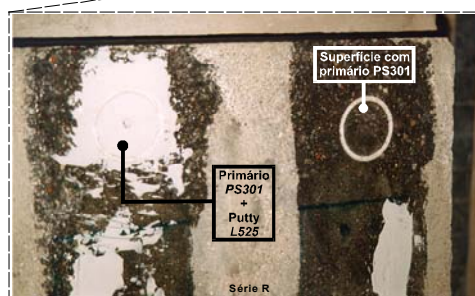
Figura 4.7 - Distribuição dos ensaios de arrancamento por tracção, pelas faixas de lajes.



**Série Tipo S**



**Série Tipo R**



ou

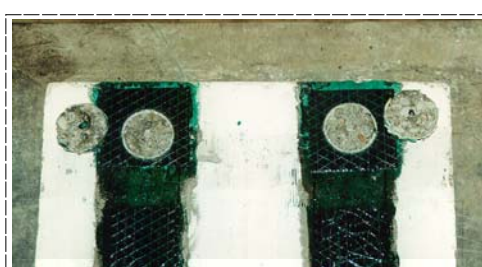
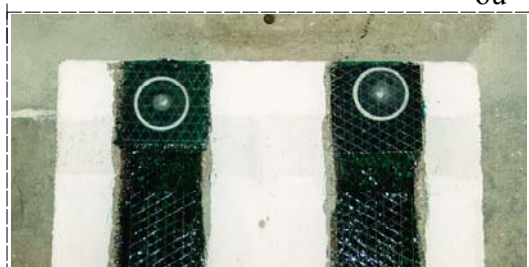


Figura 4.8 - Aspecto geral dos ensaios de "pull-off" nos modelos de laje (s/ e c/ carotagem).

As Tabelas B.6 e B.7, representadas no anexo B, resumem toda a informação obtida nos testes efectuados, incluindo o modo de ruína de cada pastilha. Os casos mais correntes foram do tipo ruína pelo betão (tipo 1 ou tipo 4) e os menos frequentes, os casos de ruína por deficiente aderência da cola à pastilha (não desejáveis). Comparando os valores médios das tensões de aderência,  $f_{ctm,p}$  (ou  $\tau_{bm}$ ), obtidos nos modelos de laje (*série R e S*) das duas fases e apresentados na Tabela 4.6, verifica-se que:

- 1 - Os valores da aderência diminuem ligeiramente com a pré-carotagem da superfície de colagem (3.5 - 3.7 MPa para 3.3 - 3.4 MPa);
- 2 - Para betões semelhantes ( $f_{ctm,j}$  idêntico) e independentemente do critério de tratamento da superfície (*tipo R* ou *tipo S*), as tensões são próximas entre si;
- 3 - Os valores máximos de aderência obtêm-se com os adesivos (ou resina de saturação) propostos pelos fornecedores dos sistemas compósitos e os mínimos quando se utiliza o tipo "massa corfer".
- 4 - Apesar do número reduzido de testes, o valor da aderência aumenta com a idade do betão, à semelhança do que se passa com o valor médio da tensão de tracção simples ao "j" dias ( $f_{ctm,j}$ ) e é da ordem de grandeza de 80% a 90% deste mesmo valor na data do ensaio;
- 5 - A presença da reparação com o "Putty" L 525, sobretudo na 2ª Fase da série *tipo R* (lajes LA3R e LB1R), nada parece acrescentar ou diminuir em relação aos resultados dos ensaios com aplicação simples do primário PS 301. Por exemplo, os valores medidos na laje LB1R indicam que com "Putty",  $f_{ctm,p} = 3.9$  MPa e sem "Putty",  $f_{ctm,p} = 4.0$  MPa.

Contudo, em todas as situações, as tensões de aderência são superiores ao mínimo de 1.5 MPa aconselhável por vários documentos (Meier, CEB, Homologações do DIBt).

Tabela 4.6 - Resumo dos valores médios da aderência ( $f_{ctm,p}$ ) dos ensaios de arrancamento nas lajes.

Betão [i] (idade, $f_{ctm,j}$ )		Laje	$f_{ctm,p}$ (MPa)	Observações
Betongem C	50 a 61 dias 4.2 MPa	<i>tipo R</i>	3.3 - 3.4	pastilhas com carotagem
			3.5 - 3.7 [iii]	pastilhas sem carotagem
		<i>tipo S</i>	2.2 - 2.4 [ii]	pastilhas sem carotagem
			3.8 - 3.9	
Betongem A	335 dias 4.2 MPa	<i>tipo R</i>	3.7 - 3.8	pastilhas com carotagem e com ou sem "Putty"
		<i>tipo S</i>	3.7	pastilhas com carotagem
Betongem B	308 dias 4.3 MPa	<i>tipo R</i>	3.9 - 4.0	pastilhas com carotagem e com ou sem "Putty"
		<i>tipo S</i>	3.9	pastilhas com carotagem

[i] -  $f_{ctm,j} = 1.4 [(f_{cm,j} - 8) / 10]^{2/3}$  e  $j$  = idade do betão na data do ensaio (consultar a Tabela 3.12);

[ii] - Pastilhas coladas com "massa corfer"; [iii] - Pastilhas coladas com "massa corfer" ou com "araldite rapid".

## (ii) - Prismas (betonagens A, B e C)

Recorrendo aos provetes de betão ensaiados à flexão aos 28 dias, correspondentes às três betonagens efectuadas (A, B, C), decidi estudar-se o efeito dos diferentes procedimentos no tratamento da superfície de betão sobre o valor da tensão de aderência (por arrancamento) correspondente. Desse modo, constituíram-se dois grupos com três prismas cada (betonagens A, B e C), distinguindo-se pelo sistema de decapagem superficial da leitada, ou seja, a utilização do esmeril num grupo e do martelo de agulhas no outro. Por sua vez, cada prisma é constituído por duas partes, após o ensaio de flexão, e numa delas é aplicado o primário de referência *PS 301* (sistema Replark). Nessa zona, regularizou-se pontualmente a superfície com a massa tipo "Putty" *L 525* (sistema Replark). Finalmente, colaram-se cinco pastilhas metálicas  $\phi 50$  mm a cada prisma, num total de 30 para os dois grupos, recorrendo a um único adesivo tipo "massa corfer" sendo efectuada, no mínimo, uma pré-carotagem de uma amostra por prisma.

A Tabela 4.7 resume o critério utilizado na distribuição dos ensaios de arrancamento por tracção sobre os dois grupos de prismas.

Tabela 4.7 - Critérios dos ensaios de arrancamento por tracção nos prismas.

Provetes	Tratamento mecânico	Primário <i>PS 301</i> [ii]	Reparação c/ <i>L 525</i> [iii]	Carotagem prévia	Pastilhas $\phi 50$ mm [iv]				
					Betonagem A	Betonagem B	Betonagem C		
prismas [i]	esmeril + jacto de ar (3 prismas)	sem (3x1/2 prisma)	sem	sem	PE.4, PE.5	PE.4, PE.5	PE.4, PE.5		
		com (3x1/2 prisma)			PE.1, PE.2	PE.2	PE.2		
		Martelo de agulhas + jacto de ar (3 prismas)		sem (3x1/2 prisma)	com	sem	-	PE.1	PE.1
				com (3x1/2 prisma)	com	sem	PM.1, PM.2	PM.2, PM.3	PM.2, PM.3
	Martelo de agulhas + jacto de ar (3 prismas)	sem (3x1/2 prisma)	sem	sem	com	PM.3	PM.1	PM.1	
		com (3x1/2 prisma)			sem	PM.4, PM.5	PM.4	PM.4, PM.5	
		Martelo de agulhas + jacto de ar (3 prismas)		sem (3x1/2 prisma)	com	sem	-	PM.5	-
				com (3x1/2 prisma)		com	sem	-	PM.5

[i] - Prismas usados nos ensaios de flexão (dois/betonagem);

[ii] - Aplicação efectuada sobre uma das duas partes em que se dividiu cada prisma após flexão;

[iii] - Rectificação pontual de imperfeições na superfície de colagem já com o primário aplicado;

[iv] - Cola tipo "massa corfer" usado na aplicação de todas as pastilhas.

Estas informações podem ser confirmadas nos esquemas da Figura 4.9 (prismas c/esmeril) e da Figura 4.11 (prismas c/martelo de agulhas) e nas fotografias ilustradas nas Figuras 4.10 e 4.12.

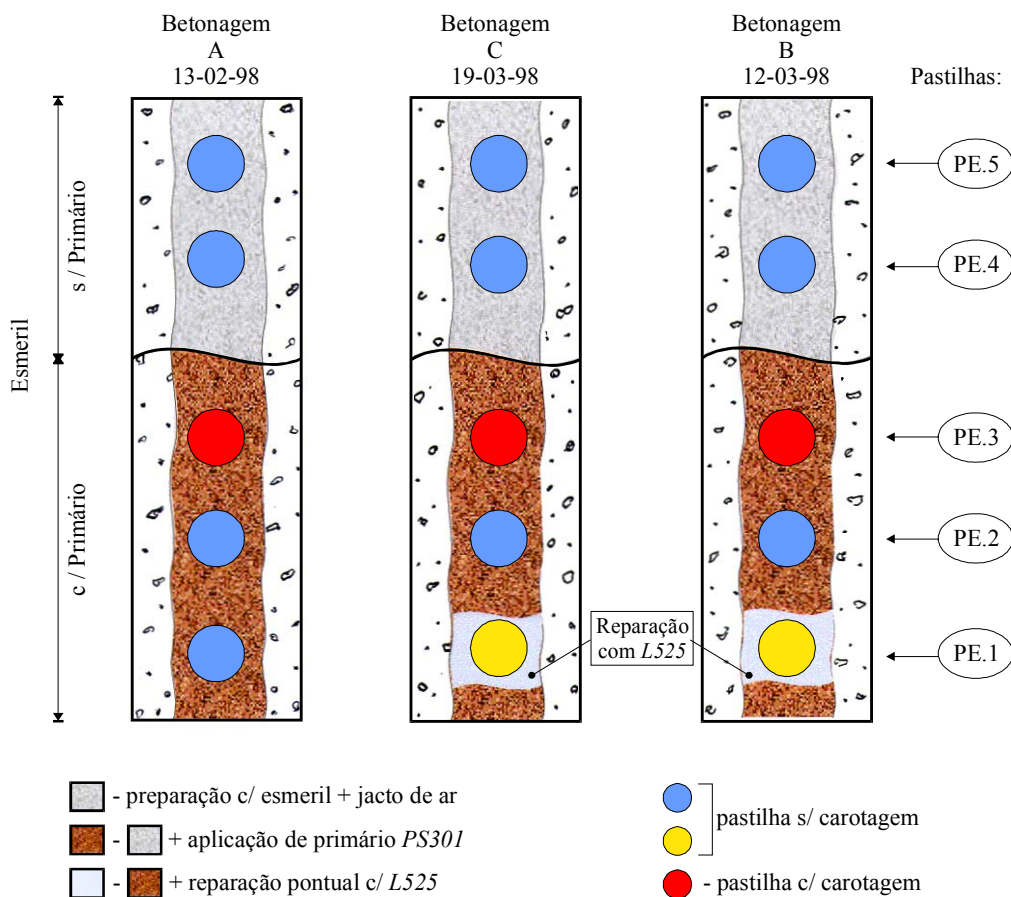


Figura 4.9 - Ensaios de arrancamento por tracção em prismas (c/ esmeril).

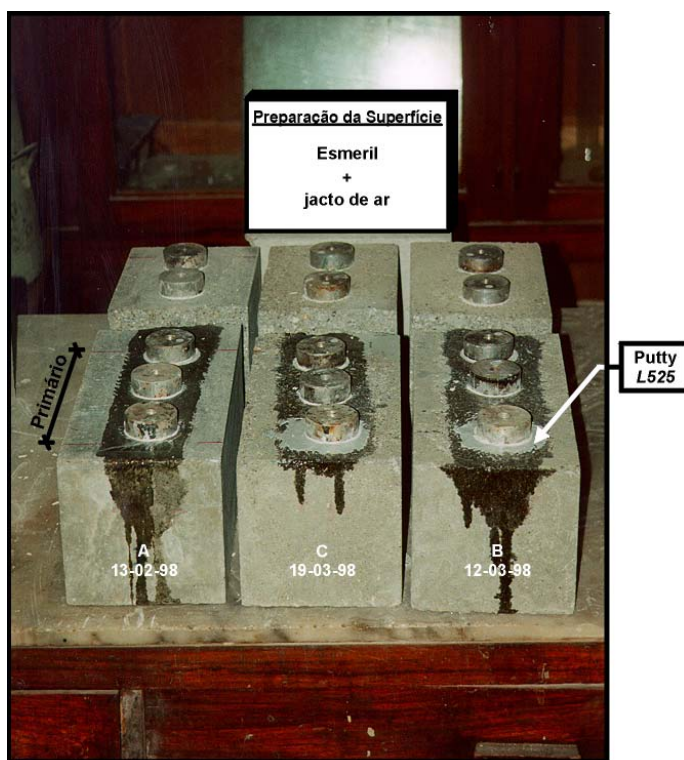


Figura 4.10 - Aspecto geral dos prismas e das pastilhas metálicas (c/ esmeril).



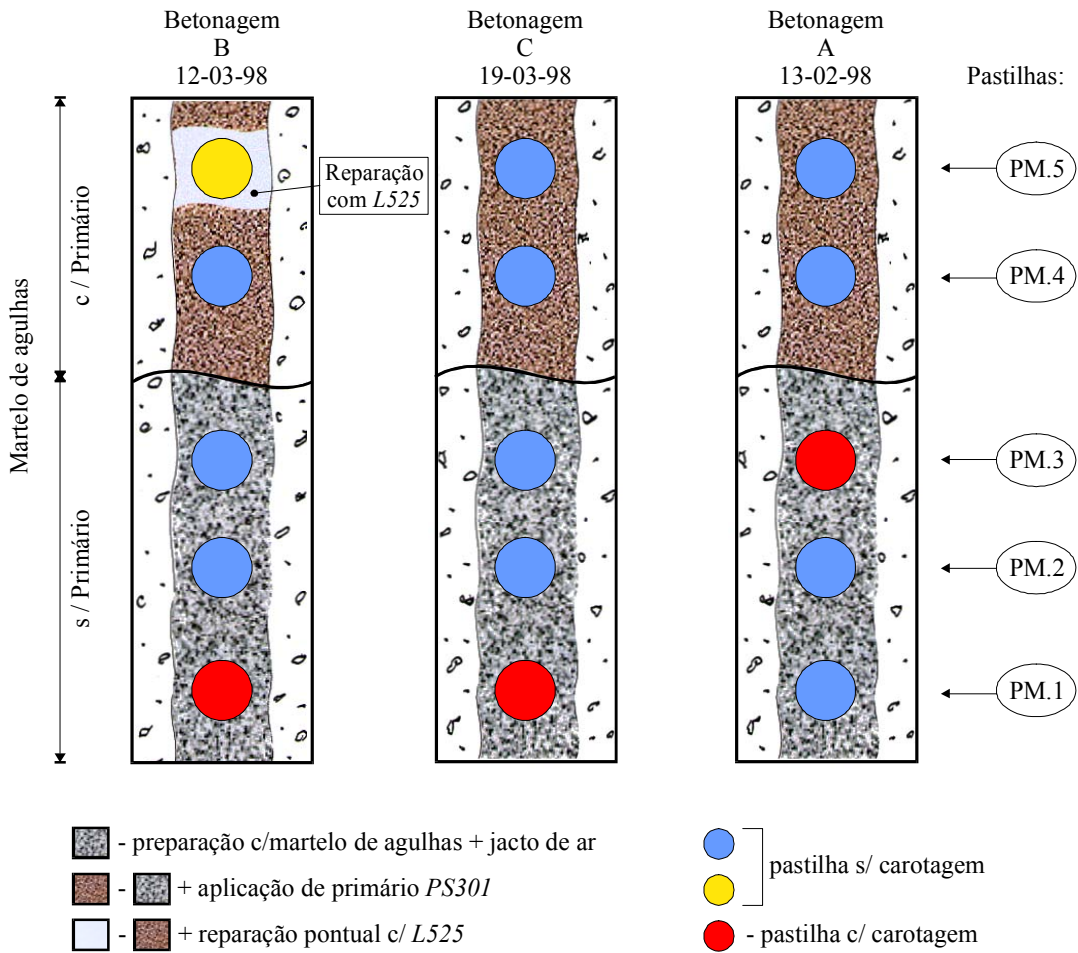
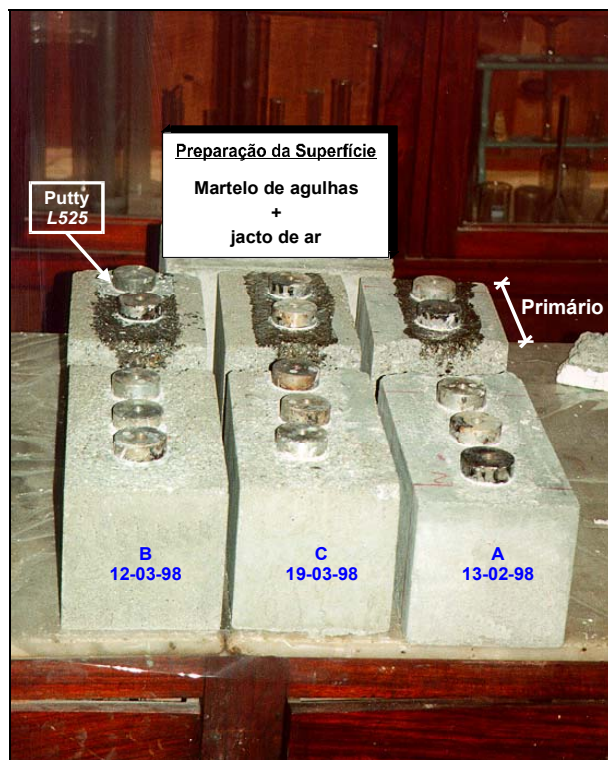


Figura 4.11 - Ensaios de arrancamento por tracção em prismas (c/ martelo de agulhas).



Figuras 4.12 - Aspecto geral dos prismas e das pastilhas metálicas (c/ martelo de agulhas).



Os resultados dos testes descrevem-se nas Tabelas B.8 (sem primário) e B.9 (com primário), incluídos no anexo B, e os modos de ruína estão ilustrados nas fotos das Figuras 4.13 e 4.14 para os grupos de prismas preparados com o esmeril e com o martelo de agulhas, respectivamente. Na generalidade dos casos, a rotura ocorreu próximo da ligação betão-adesivo (com ou sem carotagem), expressa nos esquemas da Figura 4.4. Os dois casos de descolagem na ligação adesivo-"Putty" (ruína tipo 3) indicam a insuficiente capacidade de aderência da "massa corfer", na ligação ao produto de regularização "Putty".

Apesar do número reduzido de amostras ensaiadas, a dimensão discutível do diâmetro  $\phi 50 \text{ mm}$  da pastilha utilizada e alguma dispersão nos resultados medidos, já realçados por outros autores sobre a natureza destes ensaios, na Tabela 4.8 apresenta-se o resumo dos valores médios da *tensão de aderência* por arrancamento ( $\tau_{bm} = f_{ctm,p}$ ) obtidos nos ensaios.

Tabela 4.8 - Resumo dos valores médios da tensão de aderência ( $f_{ctm,p}$ ) nos prismas [i].

Prisma (tratamento)	$f_{ctm,p}$ (MPa)					$f_{ctm,j}$ (MPa)
	s/ primário		c/ primário PS 301		c/ primário + "Putty"	
	s/c	c/c	s/c	c/c	s/c [ii]	
martelo de agulhas	1.9	1.8	4.7	-	5.3	4.5 - 5.0
esmeril	3.4	-	4.7	3.7	5.5	

[i] - os valores desta tabela são informativos da ordem de grandeza das tensões porque o nº de amostras é reduzido;

[ii] - valores da única amostra ensaiada;

s/c - sem carotagem; c/c - com carotagem.

As principais conclusões a referir em seguida devem ser interpretadas no contexto das restrições supostas à partida, sobretudo devido ao adesivo "massa corfer" usado na colagem das pastilhas metálicas.

1 - Deste estudo, sublinha-se a importância da aplicação do primário, após a decapagem superficial do betão, que conduziu a um aumento da aderência nos dois grupos de prismas, nomeadamente de 47% no caso do grupo tratado com o martelo de agulhas. Isto resulta do facto do produto impregnar-se no betão, aumentando a coesão entre os inertes mais superficiais e melhorando a aderência na interface de ligação do adesivo ao betão. Nestas condições, a ruína traduz-se por uma superfície de corte mais profunda no betão;

### Superfícies tratadas com esmeril



Figura 4.13 - Aspecto geral dos modos de ruína (tratamento c/ esmeril).

## Superfícies tratadas com martelo de agulhas

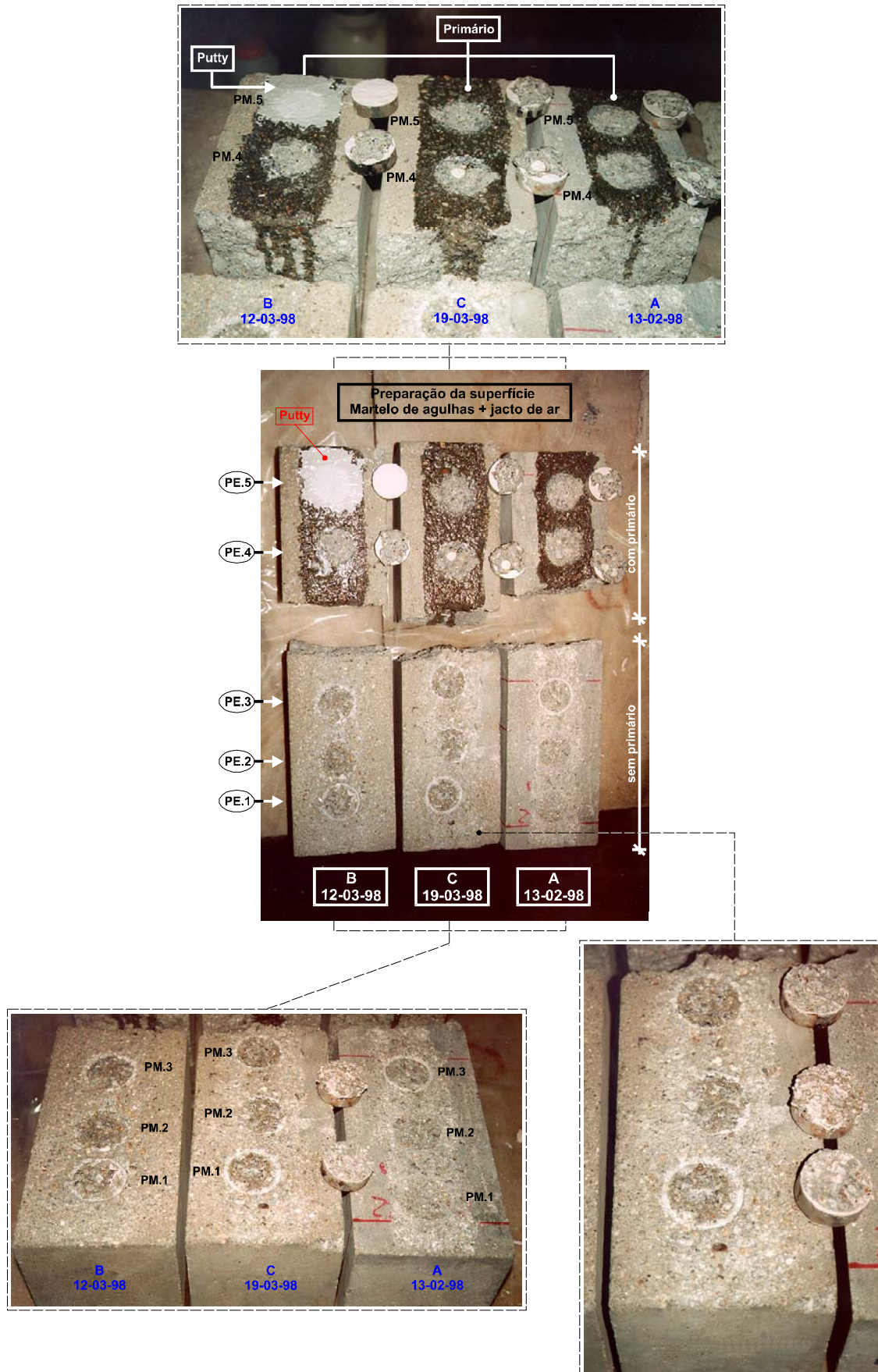


Figura 4.14 - Aspecto geral dos modos de ruína (tratamento c/ martelo de agulhas).



- 2 - Nas circunstâncias do ponto 1, verifica-se que os valores médios da tensão de aderência são semelhantes nos dois processos de tratamento da superfície (martelo e esmeril) e próximos do valor da resistência à tracção simples do betão aos "j" dias ( $f_{ctm,j}$ ), isto é, na data dos testes de "pull-off";
- 3 - Sem a aplicação de um primário sobre a superfície de betão, a rugosidade final do tratamento com o esmeril conduziu a melhores tensões de aderência do que o grupo de prismas tratados com o martelo de agulhas. O grau de rugosidade excessiva da superfície deixada por este último parece, neste caso, intervir desfavoravelmente na área real de contacto, quando a pastilha é colada directamente sobre o betão (sem "putty " ou primário). Nesta situação, talvez o factor de escala da relação rugosidade/área da pastilha tenha interferido na redução da superfície real de aderência (área da pastilha) entre os elementos devido, principalmente, à criação de vazios;
- 4 - Uma vez mais, a pré-carotagem da superfície de betão avalia a aderência, um pouco por defeito, em consequência da concentração de tensões no betão na zona circunscrita à pastilha;
- 5 - Por último, constata-se que o efeito da relação rugosidade/área da pastilha referido no ponto 3 é eliminado, no caso de pastilhas coladas a superfícies com primário e "Putty", na medida em que proporciona a extracção de uma superfície maior de betão e o aumento aparente do valor da aderência (passagem de 4.7 MPa para 5.3 - 5.5 MPa).

### 4.2.3 - Conclusões

Após a conclusão dos ensaios de aderência executados directamente sobre os modelos de vigas e de lajes, para além do caso extraordinário dos testes efectuados em alguns provetes prismáticos de betão, conclui-se que é possível obter uma previsão da resistência média de aderência ( $\tau_{bm}$ ) da junta de ligação betão-adesivo-CFRP. O valor dessa resistência aproxima-se do valor médio da tensão obtida nos ensaios de arrancamento por tracção ( $f_{ctm,p}$ ) sobre a superfície do betão a reforçar (testes de "pull-off), desde que a ruína ocorra por corte no betão (indicados na Figura 4.4 por tipo 1 e tipo 4 e referidos na pré-norma prEN 1542, 1998).

No entanto, sublinha-se que este critério fica vulnerável à natureza de realização destes ensaios, em particular nos aspectos como o número reduzido de amostras, a morfologia e o estado de deterioração superficiais do betão, a existência ou não de carotagem prévia da superfície, o valor

discutível do diâmetro da pastilha utilizada no ensaio e a dispersão natural dos resultados que se podem obter.

Embora apresente as vantagens práticas de um ensaio "*in situ*", outros autores propõem os ensaios complementares descritos no Capítulo 2, em especial nas Tabelas 2.7 e 2.8 do item 2.3.3.2. Alguns destes modelos de ensaio têm a vantagem de permitir a construção de uma *lei constitutiva* para a junta e estabelecer uma informação sobre a distribuição dos esforços rasantes ao longo da zona de colagem.

Apesar de o estudo realizado neste trabalho se reportar somente ao comportamento a *curto prazo* da junta colada, convém alertar que as conclusões agora expostas podem sofrer alterações com os condicionantes referidos no Capítulo 2, sobre a intervenção a *longo prazo*. Estas modificações das propriedades ocorrem, sobretudo, ao nível dos produtos que são colocados sobre a superfície do betão para melhorar a aderência (primários e regularizadores) mas que, numa situação crítica, podem proporcionar a ruína prematura (indesejável) na interface betão-adesivo-CFRP em certas condições higrotérmicas (por exemplo um baixo valor de  $T_g$ ), muito tempo antes do esgotamento das capacidades do betão e do compósito (consultar item 2.2.2).

Em relação a cada um dos modelos em análise neste trabalho, sublinham-se os aspectos a seguir resumidos.

(i) - *Modelos de viga*

Por se tratarem dos primeiros ensaios realizados pelo autor, agravados com o facto de a superfície das vigas expor uma microfendilhação após a realização dos ensaios de flexão e pelo uso exagerado da cola tipo "massa corfer", os resultados de "pull-off" nas séries de vigas (com idades recente ou menos recente) apresentam alguma dispersão de valores com difícil interpretação.

Em média, o valor da aderência na superfície do betão dos modelos recentes (vigas *tipo A* e *tipo B*) é superior ao valor mínimo de  $1.5MPa$  proposto em vários trabalhos. Em contra partida, os modelos com oito anos de idade (vigas *tipo C*), por apresentarem um betão pobre e com alguma carbonatação superficial, conduzem a valores baixos de aderência ( $\tau_{bm} \cong 1.0MPa$ ) e inferiores ao mínimo estipulado. Esta relação da aderência com o tipo de betão foi referida, também, no trabalho de Horiguchi et al. (1997).

Um aspecto constante nos ensaios de qualquer um dos modelos de vigas é que, pela primeira vez, se compreendeu que a colagem das pastilhas metálicas com "massa corfer" conduz a uma interpretação inferior da aderência em relação a outros adesivos testados, porque os resultados traduzem-se em modos de ruína do tipo 1 (ou do tipo 4), ao longo de uma superfície imediatamente adjacente à do adesivo.

(ii) - *Modelos de faixas de laje*

Qualquer dos modelos a reforçar com um dos sistemas de CFRP apresenta uma tensão de aderência por arrancamento superior ao mínimo de  $1.5 \text{ MPa}$  aconselhável pela literatura específica.

Na generalidade das situações em que ocorreu a ruína do tipo 1 / tipo 4 (corte pelo betão), o valor médio da resistência de aderência,  $\tau_{bm}$ , obtido nas lajes e nos prismas é semelhante entre si (com carotagem prévia), como também é independente dos processos de preparação e de colagem, designados pelos dois sistemas de reforço com CFRP (laminados e mantas).

Em termos de comportamento a *curto prazo* (estático) e a nível de ensaios de "pull-off", verifica-se que os critérios de preparação da superfície de betão e de selecção do tipo de adesivo (ou resina de saturação), propostos nas recomendações dos sistemas Sika-CarboDur e Replark, são os indicados para a aplicação da técnica de reforço por colagem às faixas de laje.

Por fim, os valores das tensões de aderência (por arrancamento) nos prismas são ligeiramente superiores aos obtidos nos testes sobre os modelos de lajes. As discrepâncias, à partida não esperadas, podem ser justificadas, uma vez que, embora as betonagens sejam iguais (consultar Capítulo 3), o número da amassadura, a dimensão dos provetes, o sistema de vibração e a data dos testes são diferentes entre si.

### 4.3 - APLICAÇÃO DO REFORÇO EXTERIOR

Nos modelos de viga e laje em questão, a execução da *1ª fase* de tratamento da superfície para cada um dos sistemas de reforço (laminado e manta) foi descrita no item 4.1.

A *2ª fase*, relativa aos procedimentos mais importantes de aplicação dos mesmos compósitos aos modelos de betão, discrimina-se em seguida, de acordo com os critérios propostos pelos seus fornecedores e ajustando-se às séries de vigas e às séries de faixas de laje em análise.

Assim, distinguem-se as técnicas de colagem dos sistemas de *laminado pré-fabricado* e de *manta flexível pré-impregnada*.

### 4.3.1 - Laminado pré-fabricado

Os procedimentos gerais do reforço com laminados *CarboDur S 512* foram estabelecidos, pela primeira vez, na aplicação deste sistema aos modelos de viga de betão, executados no Laboratório de Estruturas da FEUP (LE). A Tabela 4.9 descreve as várias fases dessa realização e apresenta a legenda seguinte:

- 1 – Limpeza do laminado de CFRP com *Sika Cleaner 205*;
- 2 – Aspecto e proporção dos dois componentes A e B constituintes do adesivo (mistura tipo);
- 3 – Aspecto final do adesivo depois de misturados os componentes convenientemente;
- 4 – Aspecto da superfície da viga de betão a reforçar depois de preparada, medidos o teor de humidade e a temperatura da superfície e do meio;
- 5 – Primeiro, aplicação do adesivo no laminado com a espátula, concentrando-o mais na faixa central deste, de modo a formar uma meia lua que facilitará a eliminação do ar na junção ao betão;
- 6 – Depois, aplicação de adesivo na viga de betão nas mesmas condições;
- 7 – Junção do laminado com a superfície de betão a reforçar, seguindo-se a compressão do conjunto para obter e uniformizar a espessura da colagem ( $\cong 2 \text{ mm}$ ) com a exclusão das partes de adesivo em excesso;
- 8 – Aspecto final da viga reforçada com o laminado de CFRP.

No fim de cada operação de reforço de um grupo de vigas, foram construídos provetes para a caracterização das misturas adesivas entretanto concebidas. A verificação da qualidade da junta colada, sobretudo em relação à existência de bolhas de ar no adesivo, foi efectuada através do controlo sonoro de pancadas suaves sobre o laminado de CFRP. Por sugestão do fornecedor e do documento D0144 (1997), é conveniente efectuar esta tarefa sempre que não se disponha de equipamento adequado para análise do controlo da qualidade da ligação, como por exemplo a termografia por infravermelhos.

Tabela 4.9 – Fases da aplicação do laminado *CarboDur S 512* a uma viga de betão armado.

<p>1</p> 	<p>2</p> 
<p>3</p> 	<p>4</p> 
<p>5</p> 	<p>6</p> 
<p>7</p> 	<p>8</p> 



No caso dos modelos de laje *tipo S*, o laminado foi primeiro serrado em tiras de *1.6 cm* de largura e, depois, aplicado segundo duas faixas de reforço por cada modelo, de acordo com os critérios estabelecidos no Capítulo 3.

Os procedimentos de aplicação do sistema *CarboDur S 512* nas lajes são os mesmos que os descritos para o grupo de vigas de betão armado anteriores. Na Figura 4.15, ilustra-se o aspecto final da face reforçada para as duas lajes *tipo S*.

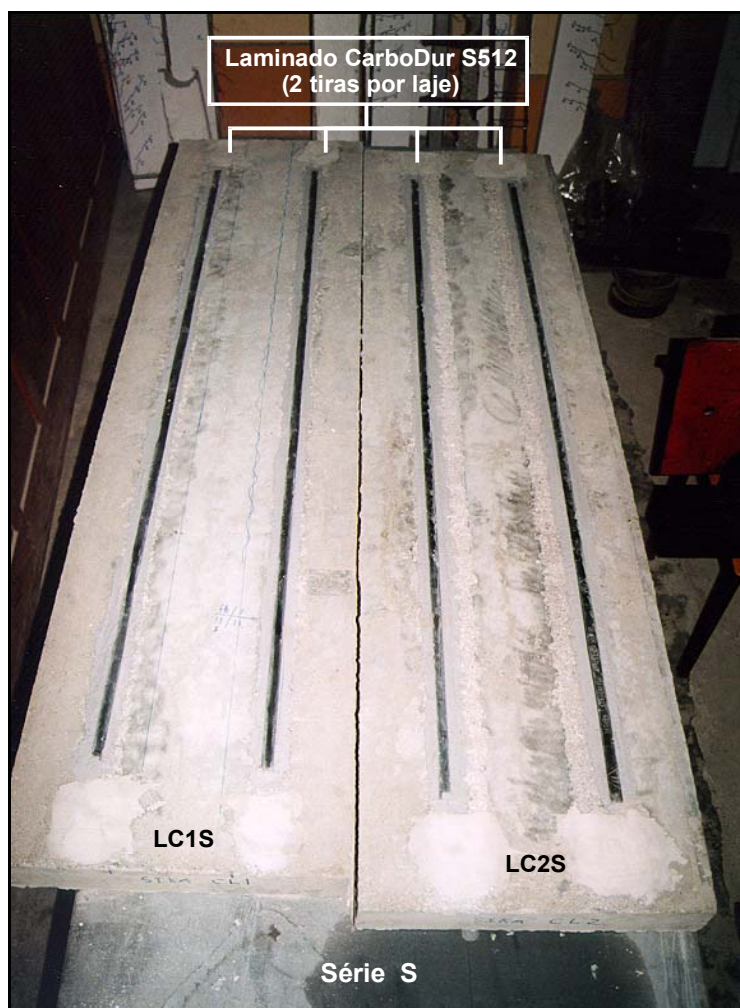


Figura 4.15 - Aspecto final do reforço das lajes *tipo S*.

### 4.3.2 - Manta flexível e pré-impregnada

No caso do sistema Replark que, segundo o item 2.2.1 se classifica como um *sistema curado "in situ"*, as especificações do fornecedor para a realização completa de uma aplicação de reforço a um elemento de betão propõem o cronograma de procedimentos apresentado na Figura 4.16. Neste cronograma refere-se, ainda, a hipótese de se admitir a adição de mais do que uma camada de material compósito, com a orientação desejável para a fibra ( $0^\circ$  a  $\pm 90^\circ$ ). Um exemplo das texturas sucessivas da superfície de betão, correspondente a cada passo efectuado neste processo, está ilustrado na Figura 4.17, para a situação de uma aplicação de duas camadas de Replark com direcções ortogonais entre si ( $0^\circ$  e  $90^\circ$ ).

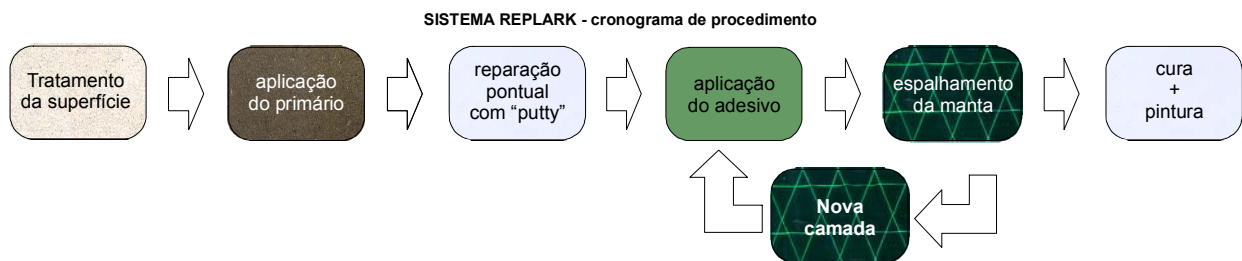


Figura 4.16 - Cronograma de procedimentos do sistema Replark (1997).

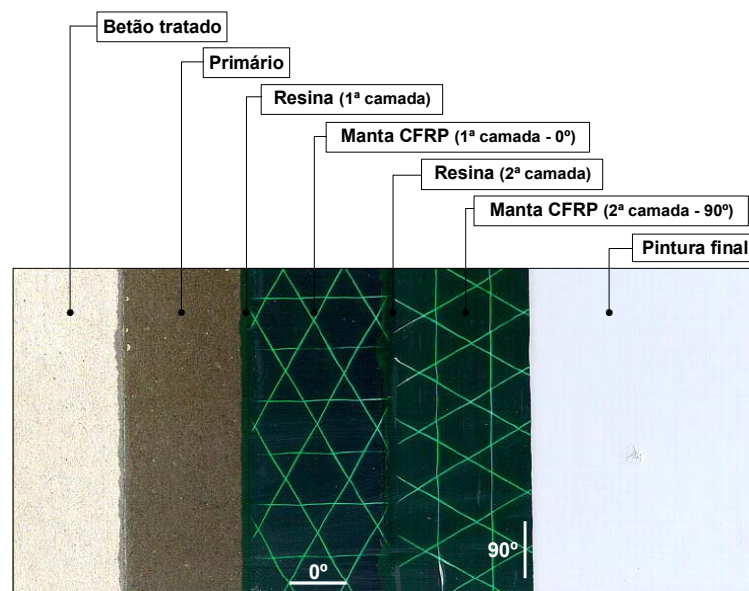


Figura 4.17 - Aspecto das texturas sucessivas após aplicação de cada material à superfície do betão.

Assim, a segunda fase de aplicação da manta flexível de CFRP, no reforço exterior dos modelos de laje, acompanhou o critério estipulado no esquema apresentado na Figura 4.18. A área de compósito necessária ao reforço foi distribuída por duas faixas com larguras de influência iguais, de modo a traduzir o efeito de escala pela utilização de um modelo reduzido. Por sua vez, cada faixa é

composta por duas camadas com a mesma orientação (direcção  $0^\circ$  e  $0^\circ$ ) e com as larguras de  $7.5\text{ cm}$  ( $1^\text{a}$  camada) e  $6.5\text{ cm}$  ( $2^\text{a}$  camada). A Tabela 4.10 ilustra as fotografias das etapas realizadas nesta última fase, com a legenda seguinte:

- 1 - Divisão da manta *Replark 20* em faixas de  $7.5\text{ cm}$  e  $6.5\text{ cm}$  de largura;
- 2 - Aplicação, a pincel, da  $1^\text{a}$  camada de adesivo/resina de saturação *PS 301*;
- 3 - Espalhamento do adesivo (ou resina) com um rolo;
- 4 - Adição da  $1^\text{a}$  camada de *Replark 20* (largura de  $7.5\text{ cm}$ ) e compressão desta, de modo a impregnar as fibras e eliminar vazios;
- 5 - Aplicação, a pincel, da  $2^\text{a}$  camada de adesivo/resina de saturação *PS 301*;
- 6 - Espalhamento do adesivo (ou resina) com um rolo;
- 7 - Adição da  $2^\text{a}$  camada de *Replark 20* (largura de  $6.5\text{ cm}$ ) e compressão da mesma;
- 8 - Aspecto final das lajes *tipo R* reforçadas com as mantas *Replark 20* e apresentando pastilhas metálicas coladas nas extremidades, para ensaio de arrancamento por tracção.

### 2ª FASE - Aplicação da manta flexível

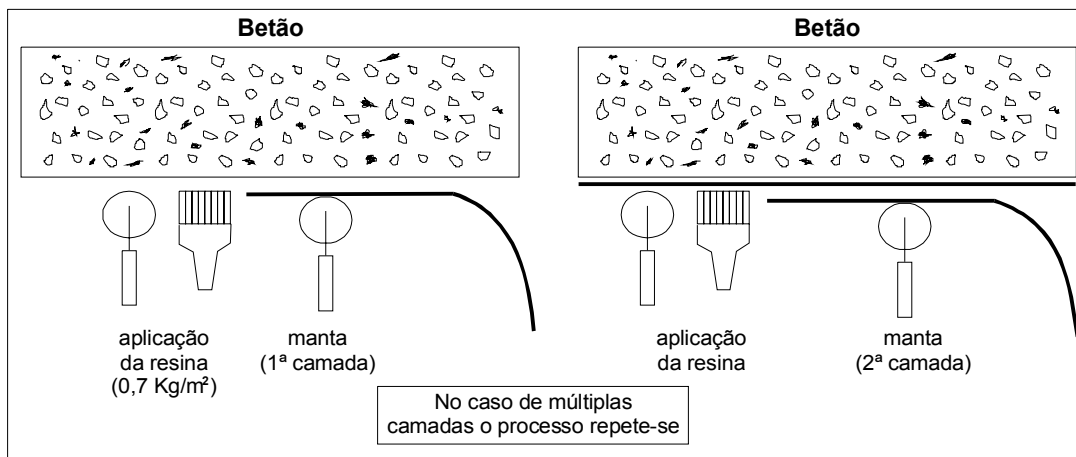
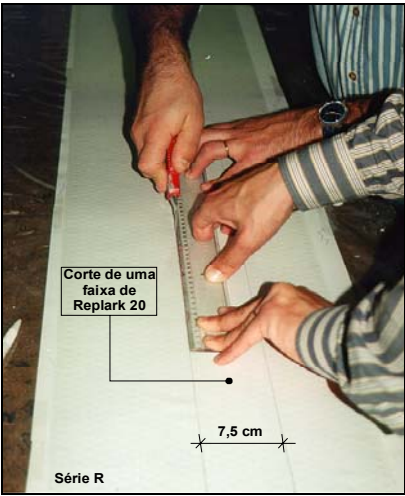
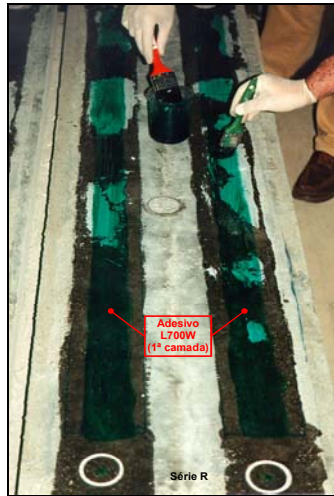

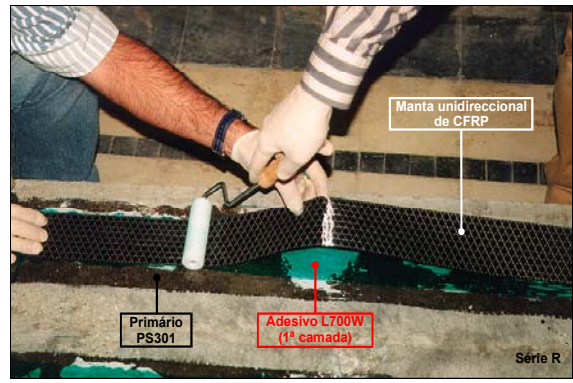


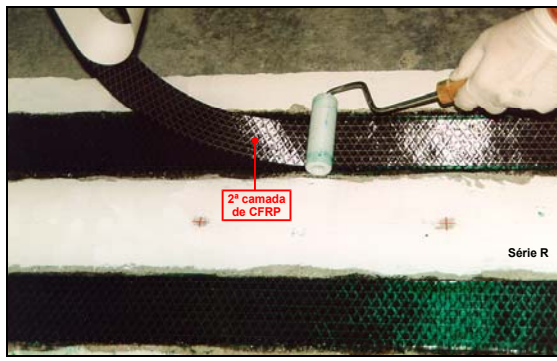
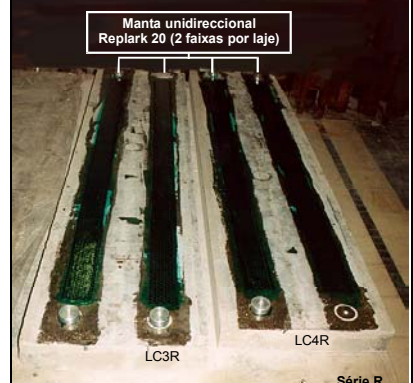


Figura 4.18 - Esquema da  $2^\text{a}$  fase de aplicação da manta flexível (Replark, 1997).

Somente após a conclusão do ciclo de cura do sistema compósito, que nas condições de temperatura ( $23^\circ\text{C}$ ) e humidade ambientes a literatura (Replark, 1997) recomenda o período de uma semana, pode admitir-se que o produto *Replark 20* satisfaz as condições de uma armadura adicional do tipo CFRP.



Tabela 4.10 – 2ª Fase de aplicação da manta *Replark 20* às lajes de betão, *tipo R*.

<p>1</p>  <p>Corte de uma faixa de Replark 20</p> <p>7,5 cm</p> <p>Série R</p>	<p>2</p>  <p>Adesivo L700W (1ª camada)</p> <p>Série R</p>
<p>3</p>  <p>Espalhamento do adesivo (1ª camada)</p> <p>Série R</p>	<p>4</p>  <p>Primário PS301</p> <p>Adesivo L700W (1ª camada)</p> <p>Manta unidireccional de CFRP</p> <p>Série R</p>
<p>5</p>  <p>2ª camada de adesivo L700W</p> <p>Série R</p>	<p>6</p>  <p>Espalhamento do adesivo (2ª camada)</p> <p>Série R</p>
<p>7</p>  <p>2ª camada de CFRP</p> <p>Série R</p>	<p>8</p>  <p>Manta unidireccional Replark 20 (2 faixas por laje)</p> <p>LC3R</p> <p>LC4R</p> <p>Série R</p>

#### 4.4 - CONCLUSÕES

O trabalho de caracterização da técnica de reforço com compósitos de CFRP unidireccionais, exposto ao longo deste Capítulo, permite pôr em destaque algumas conclusões sobre os três pontos abordados.

##### *(i) - Tratamento da superfície*

O controlo da rugosidade, da humidade, da temperatura, do padrão de fendilhação e da deterioração da camada superficial do betão a reforçar origina um critério para o despiste das ruínas, por falta de aderência no contacto betão-adesivo.

O grau de rugosidade do betão desejado para o reforço com sistemas *laminados pré-fabricados* é diferente do definido para os sistemas de *mantas flexíveis curadas "in situ"*. Nos primeiros, recomenda-se a limpeza do betão com a passagem de jacto de areia ou de um martelo de agulhas e nos segundos o polimento com um esmeril e a projecção de um jacto de ar, de modo a obter-se uma superfície lisa com exposição dos inertes. Após aspiração da superfície, melhora-se a adesividade entre a resina de saturação (adesivo) e o betão, com o espalhamento obrigatório de um primário.

Em qualquer dos dois sistemas, devem corrigir-se as irregularidades pontuais da superfície do betão, com o revestimento à espátula de uma argamassa de resina epóxida, de modo a proporcionar a plena adesão da área do compósito ao betão. As superfícies com concavidades devem ser, igualmente, evitadas ou corrigidas, visto serem zonas propícias ao destacamento prematuro do CFRP (Homologação Nr. Z-36.12-29, 1997).

##### *(ii) - Avaliação da aderência ao betão*

A resistência de uma ligação colada é ditada pelo valor máximo entre os materiais envolvidos na ligação. Concretamente, na interface betão-adesivo-compósito e atendendo aos modos de ruína teoricamente possíveis, o problema surge ao nível da comparação dos valores da resistência ao corte e à tracção na camada superficial do betão, da resistência coesiva do adesivo e da resistência interlaminar do compósito. Dos três casos, o condicionante será o que apresentar menor valor, adiantando-se que nos casos correntes observados o betão tem sido o principal responsável.

Deste Capítulo, fica-se com a informação de que os *ensaios de arrancamento por tracção* ou "pull-off" são admitidos na avaliação da aderência da ligação entre materiais compósitos e superfícies de betão, mas sempre com o princípio comum de que se analisam características superficiais. Estes ensaios apresentam vantagens, como a fácil utilização, a imediata interpretação dos resultados e a

possibilidade de aplicação directa nas situações práticas da construção civil (incluem-se no grupo dos ensaios "*in situ*" referidos no item 2.3.3.2). Contudo, sublinha-se que este critério de interpretação da aderência para uma ligação colada ao betão é susceptível de flutuações devido a condicionantes, nomeadamente o número de amostras ensaiadas; o valor discutível do diâmetro  $\phi 50\text{mm}$  da pastilha utilizada; o estado superficial do betão em termos de limpeza, fendilhação e deterioração; a execução ou não de pré-carotagem da superfície na zona da amostra; o tipo de cola usado na fixação das pastilhas ao betão.

Para efeitos de estabelecimento de uma lei constitutiva da interface betão-adesivo-CFRP, constata-se que os ensaios de "pull-off" são insuficientes. No entanto, a sugestão de trabalhos como Petersen et al. (1997) e Emmons et al (1997) (consultar Tabela 2.7 do item 2.3.3.2) permite referir que o uso adicional de um outro ensaio "*in situ*", designado por ensaio de arrancamento por torção ou "torque-test" e o recurso a critérios do tipo Mohr-Coulomb, possibilite trabalhar os resultados dos dois ensaios, com o objectivo de ajustar uma lei de cedência para a junta. Ainda sobre esta matéria, adianta-se que deve ser prestada particular atenção à avaliação do comportamento da interface betão-adesivo-compósito através de outro tipo de ensaios, nomeadamente os descritos no Capítulo 2 (item 2.3.3.2) como *ensaios de corte*, com modelos de junta simples ou junta dupla. Apesar de não concretizados neste trabalho, estes ensaios estão programados para futuro desenvolvimentos.

### *(iii) - Aplicação do reforço exterior*

O trabalho realizado sobre a aplicação dos reforços nos vários modelos testados demonstrou a simplicidade e a facilidade de execução, quer dos laminados quer das mantas flexíveis, confirmando as opiniões de vários autores ao referirem-nos como métodos de aplicação mais económicos do que os tradicionais, recorrendo a chapas metálicas. Os procedimentos a ter na sua aplicação são facilmente normalizáveis, proporcionando um controlo de qualidade e de segurança (Nr. Z-36.12-29, 1997; Nr. Z-36.12-54, 1998), além de não exigirem custos exagerados com o equipamento e com a mão de obra especializada.

Para reforçar o facto destes sistemas parecem ser os indicados para as situações complexas de aplicação de armaduras adicionais na construção civil, sublinha-se que as características dos compósitos e dos adesivos/resinas de saturação usados, permitem obter o estado final de cura do sistema FRP nas condições de temperatura e humidade ambiente, não obstante existirem outros processos de polimerização acelerada, que talvez não sejam os mais apropriados para a construção em Portugal (EUROCOMP, 1996; Juvandes et al., 1996-a).



# Capítulo 5

---

## Resultados dos Ensaios de Flexão

Os resultados dos ensaios de flexão em quatro pontos de carga e de modo estático serão expostos, quer para os modelos das três séries de vigas, sendo umas recentes e outras com oito anos, quer para os modelos das três séries de faixas de laje. Em ambos os casos, as estruturas de betão são reforçadas com materiais compósitos de CFRP unidireccionais. Os testes mostram, claramente, que é possível aumentar a capacidade resistente dos modelos de betão armado, através da adição de armaduras de material compósito pela técnica da colagem com um adesivo epóxico.

O Capítulo é dividido em três secções, com a descrição dos resultados dos ensaios, primeiramente do grupo de vigas recentes (série *tipo A* e *tipo B*), depois do grupo de vigas com oito anos de idade (série *tipo C*) e por último do grupo que constitui a série de faixas de laje (*tipo N*, *tipo R* e *tipo S*).

Os primeiros ensaios realizados na FEUP (grupo de vigas) apresentam o carácter de testes piloto, além de desenvolverem o conhecimento, a confiança e a experiência na utilização dos novos materiais compósitos de CFRP (projecto, aplicação e comportamento do laminado pré-fabricado) para o reforço e reabilitação de elementos de betão armado. Esta experiência está presente, igualmente, no primeiro relatório experimental de Juvandes et al. (1998-a).

A segunda etapa de ensaios (grupo de lajes) surge a partir do pressuposto dos conhecimentos adquiridos na análise das vigas, integra no estudo outro material compósito de CFRP do tipo manta flexível e pré-impregnada e apresenta o objectivo de avaliar a eficiência do comportamento dos dois materiais (laminado e manta), no reforço em laboratório de modelos reduzidos de betão armado representativos do tabuleiro de uma ponte. A experiência desta segunda etapa é descrita, também, no segundo relatório experimental de Juvandes et al. (1998-b).

### 5.1 - FLEXÃO DE VIGAS RECENTES

Neste primeiro grupo de modelos, incluem-se as séries de vigas de betão armado de idade inferior a um ano, aquando da realização dos ensaios de flexão. Estes modelos recentes são constituídos pelas séries designadas pelo *tipo A* e pelo *tipo B*.



### 5.1.1 - Introdução

Nesta secção, expõem-se os resultados dos vários ensaios de flexão em quatro pontos e de modo estático realizados sobre os modelos de viga em estudo. Nesta fase, o programa de investigação prosseguiu de acordo com o programa das tarefas referido no anexo A (Tabela A.1).

A série de vigas *tipo A* procurou simular o modelo utilizado no teste de corte em flexão para vigas reforçadas por colagem de chapas metálicas (Van Gemert, 1980). Em primeiro lugar, foram testados dois modelos com o carácter de testes piloto e sem aquisição de dados sobre a deformação do laminado de CFRP. Com os restantes dois modelos da série, realizou-se uma segunda fase de ensaios, considerando-se algumas correcções no modelo, os conhecimentos anteriores e a aquisição extensométrica da deformação do compósito.

A série de vigas *tipo B* é composta por 13 modelos de protótipo usado correntemente no Laboratório de Estruturas de DECivil e pretende estudar o seu comportamento, quando reforçados exteriormente com a colagem do laminado pré-fabricado de material compósito CFRP. Para facilitar a resposta aos aspectos equacionados no Capítulo 3 (item 3.1.2.1), os resultados desta série discriminam-se segundo cinco pontos considerados relevantes.

### 5.1.2 - Vigas *tipo A*

O aspecto geral do teste de flexão em quatro pontos utilizado para o efeito foi ilustrado na Figura 3.21 (Capítulo 3), observando-se o modelo de viga, a estrutura base do ensaio e toda a instrumentação principal de aquisição de resultados (em falta o equipamento de extensometria usado nas vigas *A.3* e *A.4*). Para ajudar a interpretação dos resultados dos ensaios, recorda-se que estas vigas apresentam os valores da percentagem de armadura (aço e CFRP, Figura 3.3) seguintes:  $\rho_s = 2.68\%$ ,  $\rho_w = 0.93\%$ ,  $\rho_L = 0.4\%$ .

#### (i) - Vigas *A.1* e *A.2* (1ª Fase)

O padrão de fendilhação que se desenvolveu durante o carregamento foi semelhante nas duas vigas, apesar do maior número de fendas instalado na viga *A.1*. Entre os pontos de carga, originaram-se as primeiras fendas verticais, por flexão. Com o aumento da carga, seguiram-se fendas de flexão ao longo do comprimento de reforço com CFRP, principalmente no caso *A.1*. Junto à secção de descontinuidade do betão, as fendas progrediram na direcção dos pontos de carga à medida que o ensaio prosseguia. Entretanto, as restantes fendas apenas apresentavam profundidades na ordem de 1 cm a 2 cm. A cedência das vigas ocorreu, por destacamento frágil e antecipado do laminado na interface betão-adesivo. Na viga *A.1*, o destacamento deu-se no lado direito da viga, iniciando-se a

partir dessa extremidade livre do CFRP até ao centro (interpretação visual). No caso *A.2*, a cedência do compósito surgiu também, no lado direito, mas principiou no centro e progrediu bruscamente para a extremidade, amortecida depois, pela "ancoragem" do laminado sobre o apoio. A Figura 5.1 apresenta uma fotografia do pormenor de destacamento do laminado e da superfície de rotura no betão observados na *viga A.1*, enquanto a Figura 5.2 expõe duas fotografias (a) e (b) da *viga A.2* nas mesmas circunstâncias.

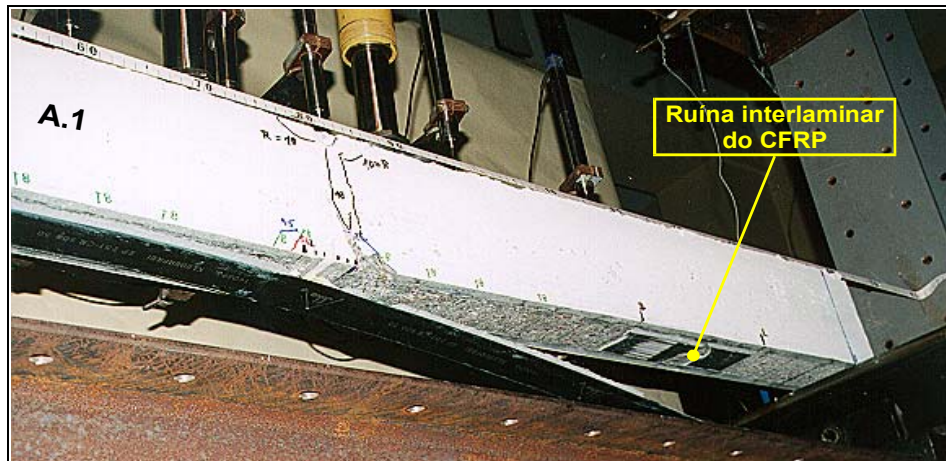
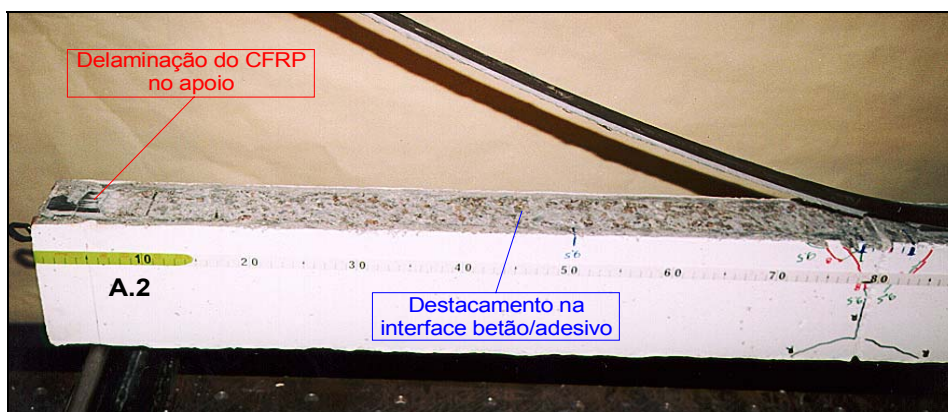


Figura 5.1 – Pormenor da ruína na *viga A.1*.



a) Forma do destacamento do laminado



b) Superfície de ruína

Figura 5.2 – Pormenor da ruína na *viga A.2*.

Na Figura 5.3, ilustra-se as respostas carga total vs deslocamento próximo do meio vão (informação do LVDT nº 3) obtidas para as vigas desta série já ensaiadas. Estas apresentam um comportamento regular até valores da carga total de  $19\text{ kN}$  iniciando-se, em seguida, o escorregamento e destacamento do reforço por corte longitudinal no betão para cargas últimas de  $20.5\text{ kN}$  e  $19.3\text{ kN}$  nas vigas *A.1* e *A.2*, respectivamente.

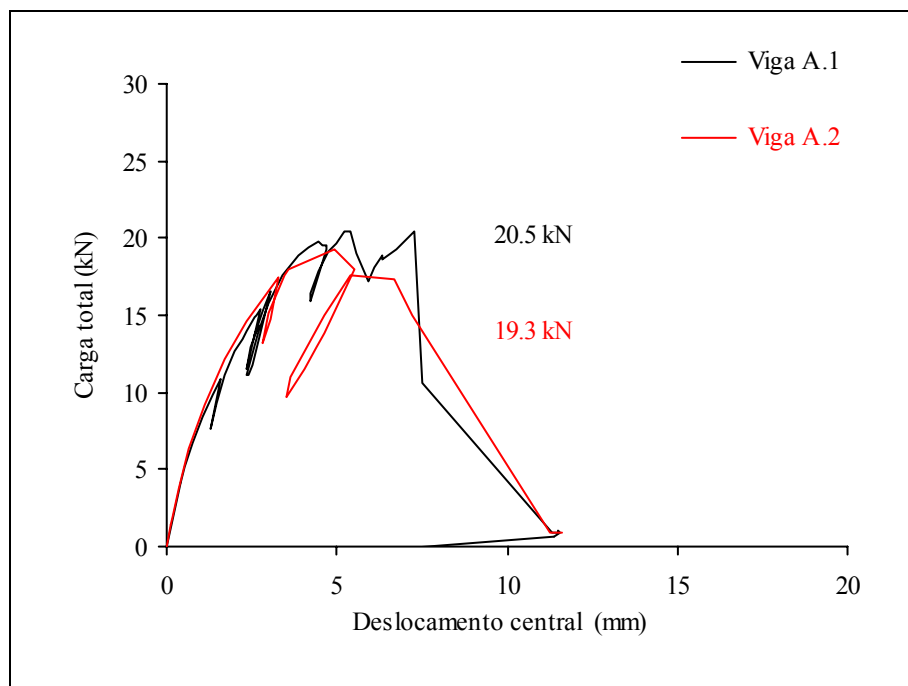


Figura 5.3 – Curvas carga total vs deslocamento do LVDT nº 3 (próximo do meio vão).

Apesar do número de modelos ensaiados nesta fase ser escasso (apenas quatro) e só se ter obtido os valores das extensões nos casos A.3 e A.4, é possível, pela simples observação das superfícies de ruína no betão adjacente à interface betão-adesivo (Figuras 5.1 e 5.2-b), confirmar a opinião de alguns investigadores (Van Gemert, Deuring, Neubauer entre outros referidos no item 2.3.2 do Capítulo 2) sobre a ocorrência de ruínas intercalares que culminam com o colapso prematuro do reforço exterior. Este deve-se à concentração de tensões de corte e de tracção, sobretudo nas extremidades livres dos laminados, que segundo Roberts (1989) se ilustra na Figura 5.4, o que origina o destacamento do reforço e/ou o arrancamento de partes do betão coladas ao laminado (fenómeno de "peeling" definido no item 2.3.2).

Com efeito, as superfícies de ruína quer da *A.1* quer de *A.2* apresentam dois modos distintos, ou seja, um por corte longitudinal no betão e outro por ruína interlaminar do compósito junto à sua extremidade livre. Este último justifica-se pela concentração de tensões normais de tracção que, conjuntamente com a progressão da fenda longitudinal de corte no betão, fomentam a extracção ou a ruína interlaminar do laminado (modo de ruína ilustrado na Figura 2.20 do item 2.3.2).

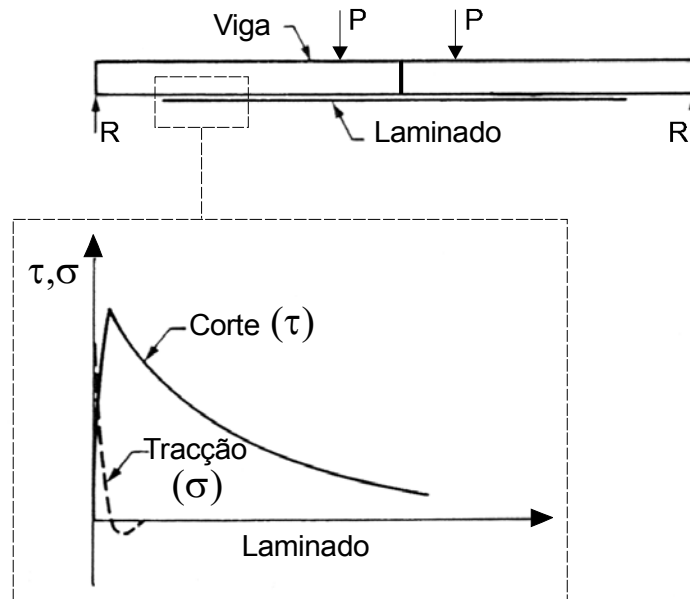


Figura 5.4 – Distribuição das tensões de corte e normais na extremidade da interface betão-adesivo (Roberts, 1989).

Por fim, as informações correspondentes, nomeadamente, à distribuição de fendilhação, ao modo de ruína e a outros resultados dos ensaios efectuados sobre as vigas *A.1* e *A.2* resumem-se nas Tabelas C.1 e C.2 do anexo C.

(ii) - Vigas *A.3* e *A.4* (2ª Fase)

Os modelos *A.3* e *A.4* apresentam um padrão de fendilhação extenso, com número e profundidade de fendas maiores do que os da anterior fase.

No caso de *A.3*, a fendilhação principal surgiu na zona central da viga, progredindo para os apoios com o aumento da carga. A aproximação da ruína faz-se notar através da audição de sucessivos sons crepitantes resultantes de fendas de betão, que prosseguem na espessura do adesivo. Após a carga máxima de 26 kN, segue-se o destacamento de troços de betão entre fendas consecutivas, que, para o valor da carga de 23.5 kN, conduzem à ruína do tipo frágil por destacamento do laminado de CFRP na parte direita da viga (Figura 5.5). Observando-se a superfície de ruína do laminado, pormenor exposto na fotografia da Figura 5.6, podem distinguir-se morfologias diferentes, como zonas de corte e destacamento do betão e zonas de ruína interlaminar do CFRP.

Por outro lado, no modelo *A.4* o padrão de fendilhação é constituído por fendas de flexão igualmente espaçadas e com o comprimento maior no centro das zonas de CFRP coladas ao betão. A ruína ocorreu de uma forma brusca por destacamento da parte direita do laminado e para a carga total de 20.4 kN (Figura 5.7).



Estes e outros aspectos registados nos ensaios desta fase resumem-se nas Tabelas C.3 e C.4, incluídas no anexo C.

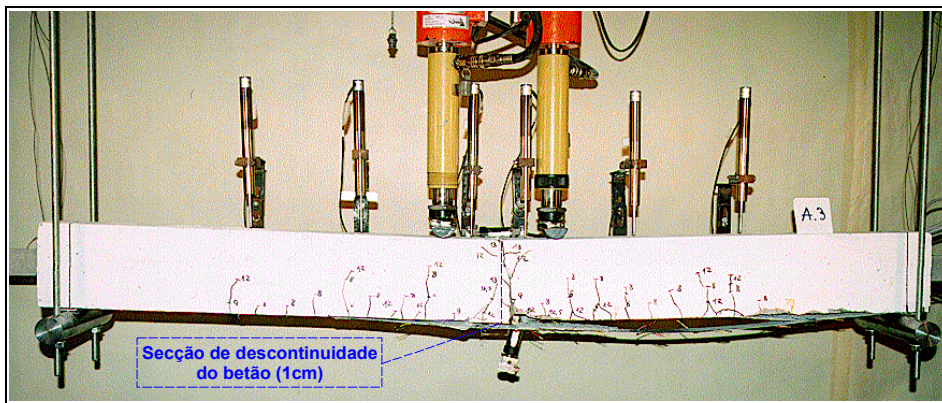


Figura 5.5 - Aspecto geral da ruína da viga A.3.

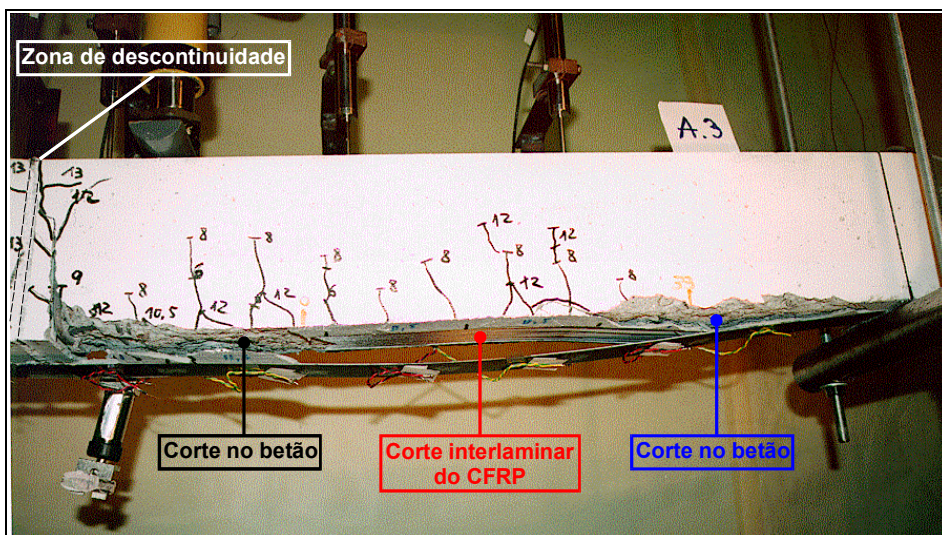


Figura 5.6 - Pormenor da morfologia da superfície de ruína na viga A.3.

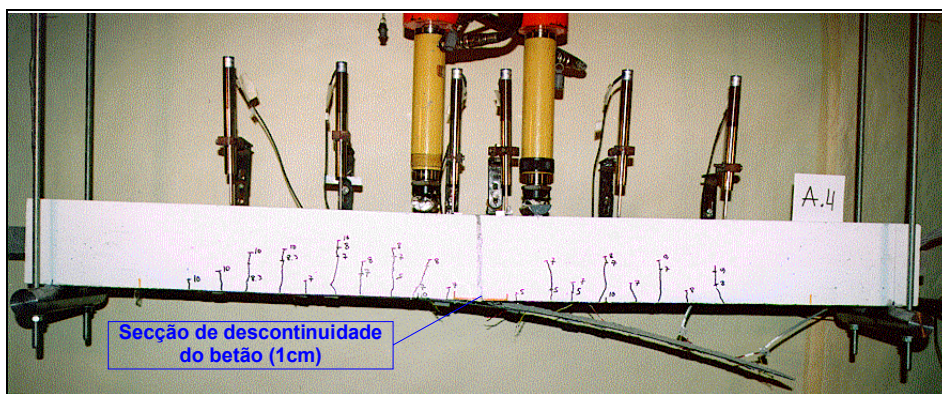


Figura 5.7 - Aspecto geral da ruína da viga A.4.

Na Figura 5.8, ilustra-se a traço contínuo a resposta carga total vs deslocamento próximo do meio vão (informação do LVDT nº 3), resultante dos modelos ensaiados nesta fase e a tracejado a resposta das vigas *A.1* e *A.2* (1ª fase). As curvas apresentam um comportamento regular até um valor máximo, 26 kN e 20.4 kN nos casos *A.3* e *A.4*, iniciando-se, depois, a redução da carga para um valor constante, devido a escorregamentos sucessivos do CFRP entre fendas do betão. A ruína surge, em seguida, para os valores da carga já mencionados, inferiores aos valores máximos, com os modelos a trabalharem em pleno reforço.

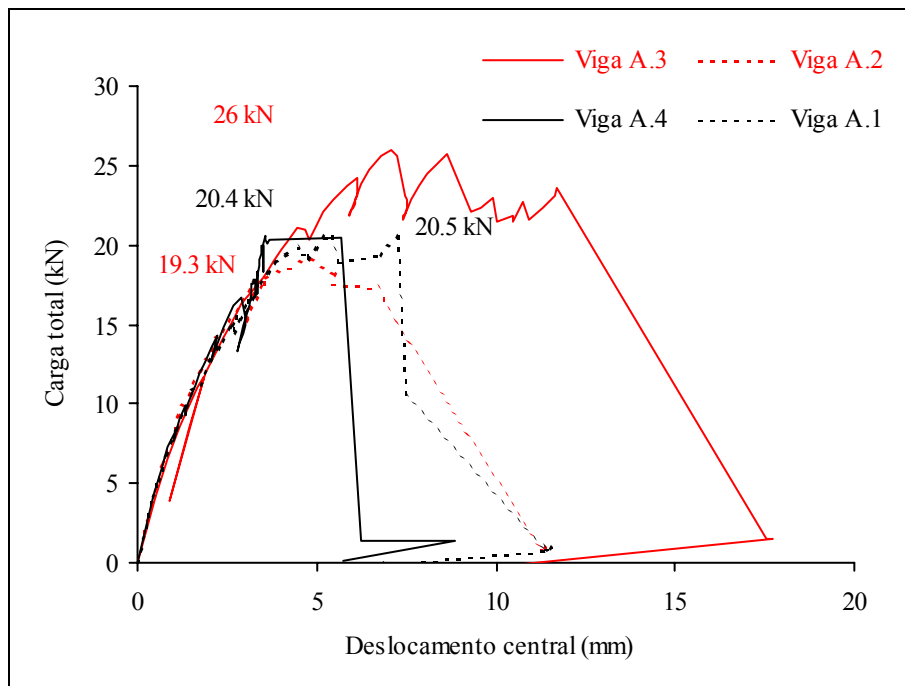
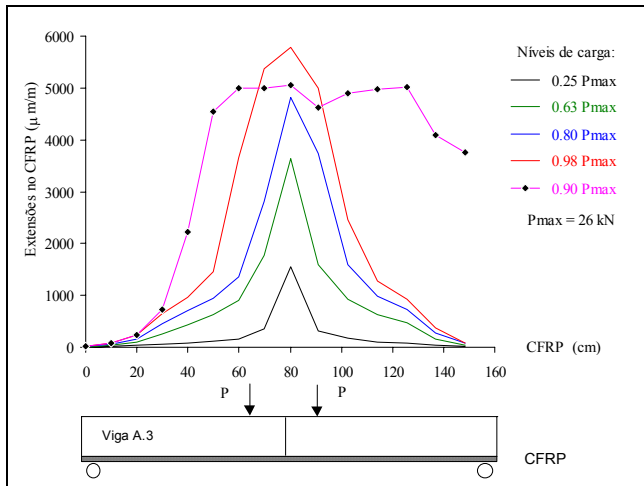


Figura 5.8 - Curvas carga total normalizada vs deslocamento do LVDT nº 3 para as vigas *A.3* e *A.4*.

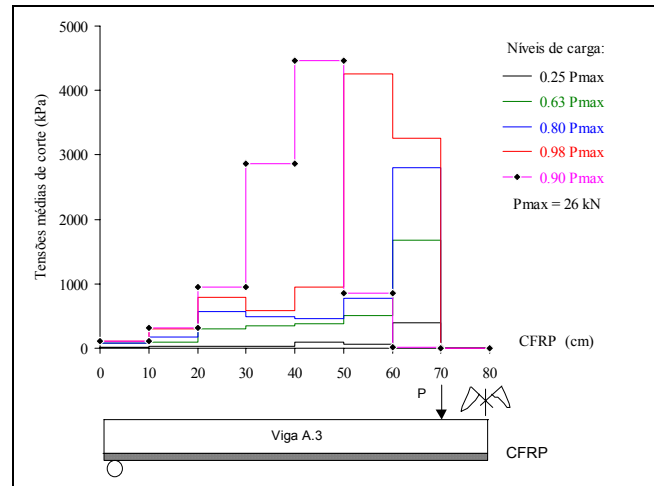
A variação da extensão ao longo do comprimento do CFRP, nesses modelos, é apresentada nas Figuras 5.9-a e 5.9-c, para vários níveis de carga, sendo um dos quais próximo da cedência ( $0.98 P_{máx}$ ). No caso da viga *A.3* representa-se, também, a leitura registada após a carga máxima da viga ( $0.90 P_{máx}$ ). A distribuição das tensões médias de corte ao longo de metade do comprimento da interface betão-laminado está exposta nas Figuras 5.9-b e 5.9-d, para os mesmos níveis de carga.

Nas primeiras Figuras, verifica-se que a deformação máxima do CFRP concentra-se junto ao início da interface betão-CFRP (zona central da viga) e rapidamente tende para zero (forma aproximadamente exponencial), à medida que se afasta deste sector. O aumento da sollicitação e da consequente fendilhação na superfície da viga introduz delaminações entre fendas na junta, sobretudo por fractura do betão adjacente. Este facto conduz à alteração da posição da área activa de aderência na ligação, expressa no alargamento do sector com o valor máximo da extensão do CFRP e na translação das curvas para as extremidades da junta (livre, *A.4* ou sobre os apoios, *A.3*). Este fenómeno repete-se até se atingir o destacamento do laminado, por propagação da delaminação e

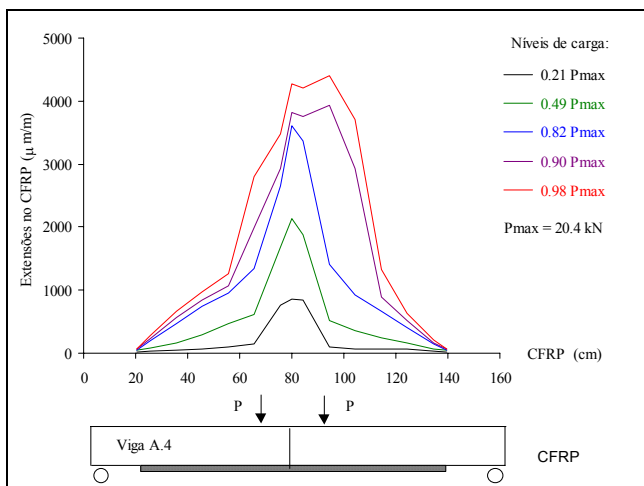
perda da área efectiva de ancoragem e é traduzido no esquema da Figura 5.10 com a distribuição das curvas de extensão do CFRP registadas no trabalho de Maeda et al. (1997).



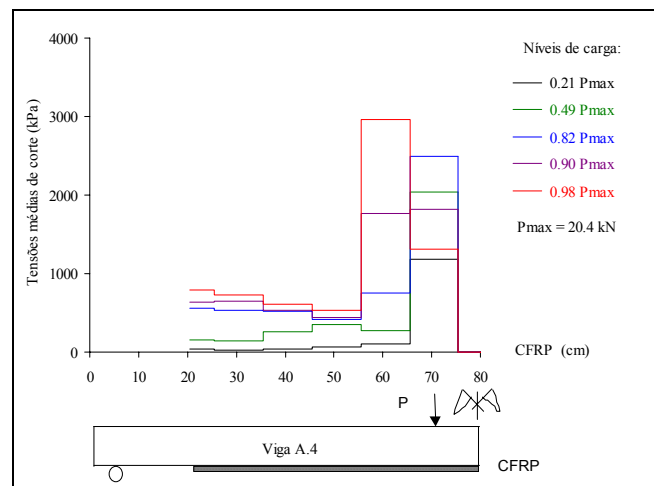
a) Extensões (A.3).



b) Tensões médias de corte (A.3).



c) Extensões (A.4).



d) Tensões médias de corte (A.4).

Figura 5.9 - Diagramas de extensões e de tensões médias de corte ao longo de metade do comprimento do CFRP (A.3 e A.4).

Nas Figuras 5.9-b e 5.9-d, observa-se que as forças de corte transferidas do laminado para o betão são nulas no troço central da viga, zona do laminado não aderente ao betão. De seguida, atinge-se o valor máximo no início da colagem e rapidamente estas forças tendem para zero, à medida que se caminha para as extremidades da junta. Com o início da fendilhação e de eventuais delaminações intercalares para solicitações superiores, as tensões de corte máximas afastam-se progressivamente do centro até aos quartos dos vãos, próximo da carga de cedência da viga. O efeito da presença (ou não) da "ancoragem" do laminado sobre a secção de apoio conduz à diminuição, num caso, e ao aumento (efeito semelhante ao descrito na Figura 5.4), no outro, das tensões de corte na sua vizinhança.

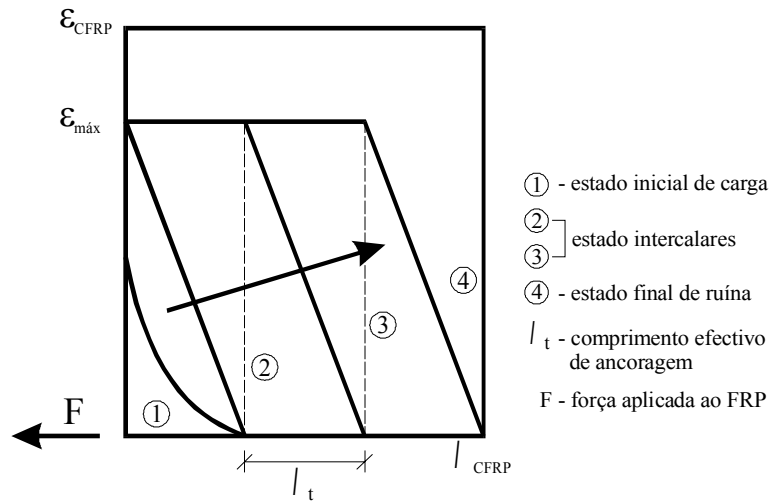


Figura 5.10 - Esquema de distribuição das deformações do laminado (ensaio de corte de Maeda et al., 1997).

Da série de modelos *tipo A*, é possível resumir as principais informações na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Resumo dos ensaios de flexão das vigas *tipo A*.

VIGA	$P_{máx}$ (kN) [i]	$\delta_{máx}$ (mm) [i]	CFRP [ii]		MODO DE RUÍNA [iii]
			$\sigma_{máx}$ [MPa]	$\tau_{máx}$ [KPa]	
Laminado: 1 $_{CFRP} = 72.5$ (colado) + 5 ou 9 (deslocado) + 72.5 (colado) [cm]					
A.1	20.5	5.4	-	-	<p>corte no betão + ruína interlaminar</p>
A.4	20.4	3.6	710	3046	<p>destacamento do CFRP pelo betão</p>
Laminado: 1 $_{CFRP} = 74$ (colado) + 5 ou 9 (deslocado) + 74 (colado) [cm]					
A.2	19.3	4.9	-	-	<p>destacamento do CFRP pelo betão</p>
A.3	26.0	8.6	925	4469	<p>corte no betão + ruína interlaminar</p>

[i] - Valores máximos da carga total e da flecha central medidos nas vigas com o reforço;  
 [ii] - Valores máximos das tensões de tracção no CFRP e de corte na interface betão-CFRP;  
 [iii] - Consultar o esquema dos modos de ruína nas tabelas incluídas no anexo C.



### 5.1.3 - Vigas tipo B

Vários modelos foram submetidos a ensaios de flexão em quatro pontos, cujo aspecto geral do teste está ilustrado na Figura 3.22 (Capítulo 3), onde se indica o sistema de instrumentação para aquisição dos resultados do ensaio.

Para uma melhor exposição deste item, optou-se por apresentar os resultados dos modelos desta série B não pela ordem que foram ensaiadas, mas por grupos, de acordo com o objectivo em estudo.

#### 1 – Modelos não reforçados

(i) - Vigas B.2, B.4(1) e (2)

Este conjunto de vigas foi ensaiado durante os trabalhos práticos da disciplina de Estruturas de Betão do curso de Engenharia Civil da FEUP. Elas representam alguns dos modelos de referência da série tipo B, com valores da percentagem de aço de  $\rho_s' = 1.34\%$ ,  $\rho_s = 0.126\%$  e  $\rho_w = 0.31\%$ . Os resultados desses ensaios discriminam-se na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Resultados dos ensaios.

VIGA	AMASSADURA Nº [i]	ENSAIOS				
		Data	Tipo	$P_{máx}$ (kN) [ii]	$\delta_{máx}$ (mm) [ii]	Modo de ruína [iii]
B.2	②	Nov.95	flexão em 4 ptos	33.68	20.5	
B.4(1)	⑥	28/10/96	flexão em 3 ptos	30.40	15.0	
B.4(2)	⑥	30/10/96	flexão em 3 ptos	30.07	19.8	

[i] - Consultar as características do betão nas Tabelas 3.7 e 3.8 (Capítulo 3);

[ii] - Valores máximos da carga total e do deslocamento central registados próximo da ruína;

[iii]- Modos de ruína correntes em vigas de betão armado.

Na Figura 5.11, apresentam-se os diagramas da relação carga total vs deslocamento a meio vão destes modelos de viga e também os diagramas para os casos B.6 e B.12 a descrever em seguida. Por comodidade de exposição, na mesma figura representam-se os comportamentos à flexão em 3 e em 4 pontos, apesar de não serem curvas relacionáveis directamente.

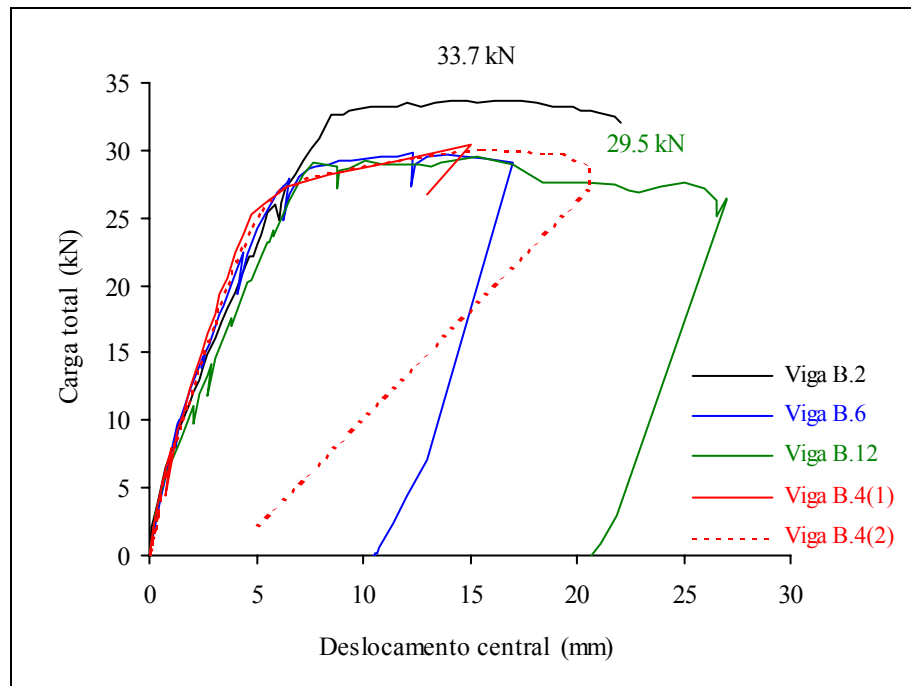


Figura 5.11 - Curvas carga total vs deslocamento central das vigas *B.2*, *B.6* e *B.12* (flexão em 4 pontos) e vigas *B.4(1)* e *B.4(2)* (flexão em 3 pontos).

(ii) - Vigas *B.6* e *B.12*

Ambos os modelos apresentaram uma fendilhação regular típica de uma viga de betão armado. A viga *B.6* cedeu por esmagamento da camada comprimida do betão na zona central (Figura 5.12) e, em contrapartida, o modelo *B.12* ruiu, por desenvolvimento acentuado de duas fendas de flexão com a direcção de uma das secções de carregamento (observar o pormenor da Figura 5.13).

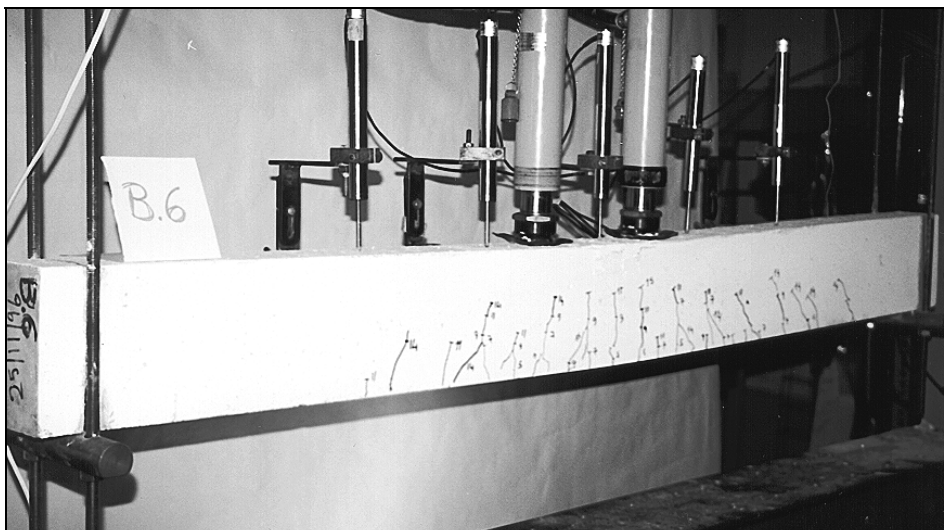


Figura 5.12 – Aspecto geral da cedência da viga *B.6*.

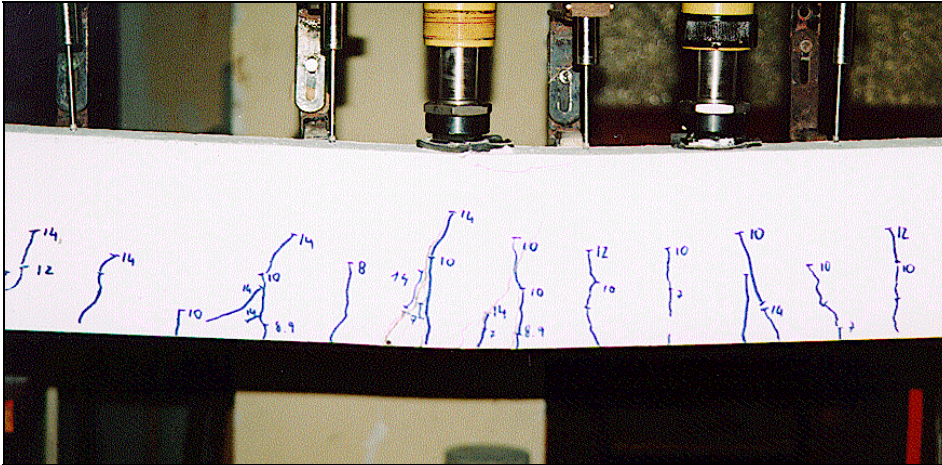


Figura 5.13 – Pormenor da secção de ruína da *viga B.12*.

Por observação da Figura 5.11, conclui-se que os cinco modelos ensaiados expressam um comportamento muito semelhante, embora dois deles traduzam a flexão em 3 pontos (*vigas B.4(1)* e *B.4(2)*), destacando-se a *viga B.2* em estado limite último.

Nas Tabelas C.8 e C.14 incluídas no anexo C, apresentam-se o padrão de fendilhação e os resultados da cedência das *vigas B.6* e *B.12* obtidos dos ensaios e que devem ser considerados, também, como padrão de comparação com os modelos de betão desta série reforçados com o compósito de CFRP.

## 2 – Adesivos diferentes e reforço ancorado sobre os apoios

Os resultados dos ensaios descrevem-se, segundo os três casos diferentes de processamento da colagem do laminado ao betão com *Sikadur 31* (como adesivo), com *Sikadur 31* (como primário) e *Sikadur 30* (como adesivo), e unicamente com *Sikadur 30* (como adesivo). Lembra-se que as *vigas* deste grupo apresentam os valores da percentagem de aço de  $\rho_{s'} = 1.34\%$ ,  $\rho_s = 0.126\%$ ,  $\rho_w = 0.31\%$  e de CFRP de  $\rho_L = 0.53\%$ , relacionados pelo quociente  $A_L E_L / A_s E_s = 3.40$ .

### (i) - *Viga B.1* (com o adesivo *Sikadur 31*)

Este modelo desenvolveu um padrão de fendilhação uniformemente distribuído ao longo do vão entre apoios. Muito próximo da carga total (soma das duas células de carga) de  $31.2 \text{ kN}$ , o estado de fendilhação por flexão e corte é acentuado, o que vai proporcionar a cedência da *viga*. Esta surge de um modo frágil por escorregamento do laminado no apoio e destacamento do betão entre fendas adjacentes à interface betão-laminado, em metade do modelo. Na Figura 5.14 apresenta-se a fotografia do aspecto geral da ruína da *viga B.1*.

O comportamento da viga, em termos da relação carga total vs deslocamento a meio vão (LVDT nº 3), está ilustrado na Figura 5.15. Além desta, estão também traçadas as curvas de resposta obtidas para os casos *B.3*, *B.5* e *B.8* que são objecto de análise comparativa.

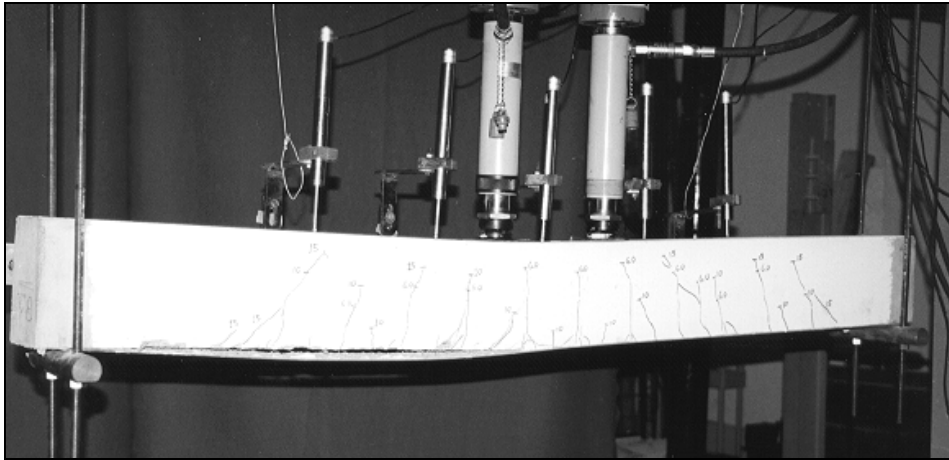


Figura 5.14 – Aspecto geral da ruína da viga *B.1*.

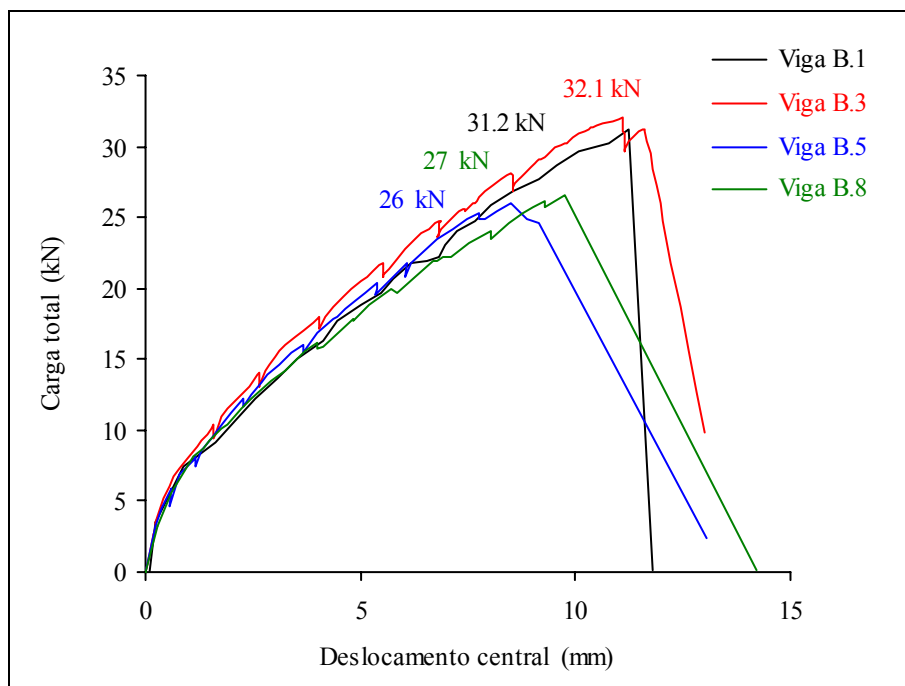


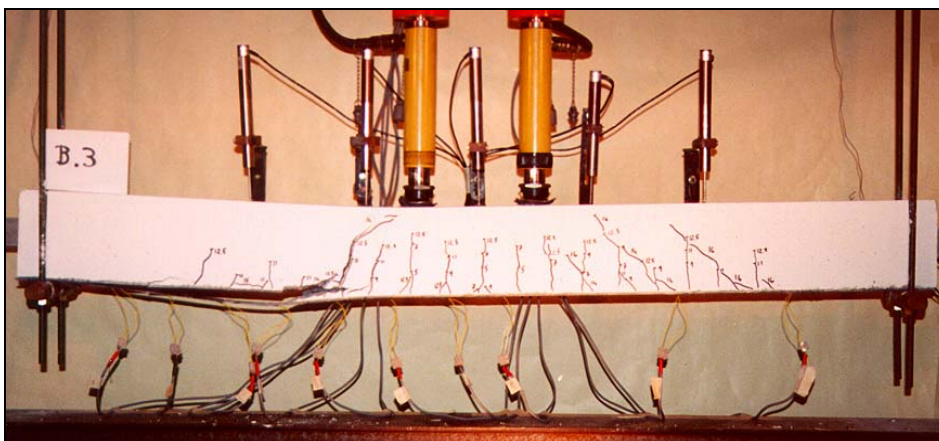
Figura 5.15 – Curvas carga total vs deslocamento a meio vão das vigas *B.1*, *B.3*, *B.5* e *B.8*.

À semelhança do que ocorreu com algumas vigas *tipo A*, este modelo não foi instrumentado com extensómetros eléctricos. Nessas circunstâncias, não é possível medir o comportamento das zonas de interface betão-adesivo-laminado em termos de transferência de forças. Na Tabela C.5 do anexo C, expõem-se os dados recolhidos no ensaio de flexão na viga *B.1* e um pormenor com o escorregamento do laminado sobre o apoio por ruína interlaminar deste.

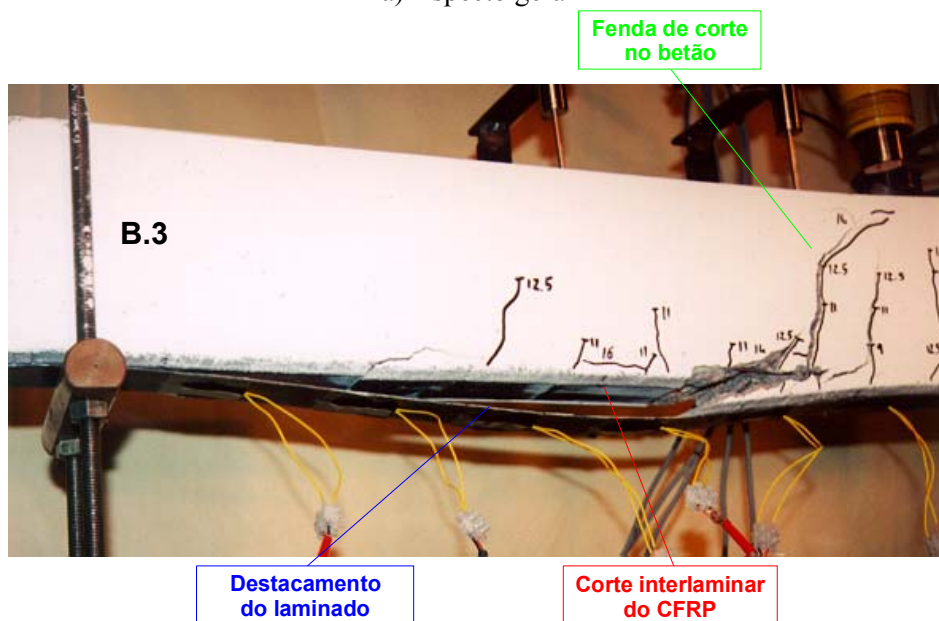
(ii) - *Viga B.3* (com o primário Sikadur 31 e o adesivo Sikadur 30)

O aspecto da fendilhação que se desenhou neste modelo durante o ensaio é perfeitamente regular, coincidindo a localização das fendas com a posição da armadura de corte (estribos). Depois de atingida a carga total máxima de  $32.1\text{ kN}$ , a ruína surgiu de um modo brusco para o valor de  $31.1\text{ kN}$ , através do desenvolvimento de uma fenda de corte sobre uma das células de carga, assim como a conseqüente progressão da superfície de cedência até ao apoio por destacamento do CFRP (Figura 5.16-a). Da observação mais detalhada dessa superfície (Figura 5.16-b), constata-se a formação de um modo de ruína por rotura interlaminar do CFRP adjacente à interface laminado-adesivo e desenvolvendo-se numa extensão de  $AB = 46\text{ cm}$ .

Estes e outros aspectos registados no ensaio da *viga B.3* resumem-se no anexo C na Tabela C.6. Nela exhibe-se, ainda, uma fotografia com o pormenor da superfície de ruína do laminado.



a) Aspecto geral



b) Pormenor da superfície de ruína

Figura 5.16 – Ruína da *viga B.3*.

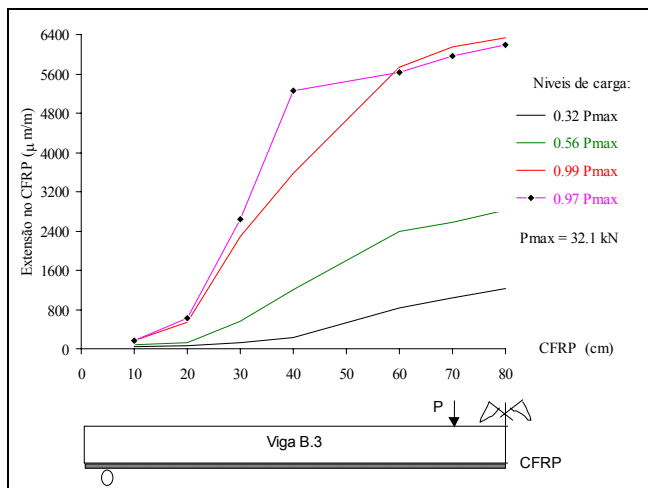
O diagrama de resposta força total vs deslocamento a meio vão (LVDT nº3) está ilustrado na Figura 5.15, como já foi referido, onde se observa que *B.3* tem o melhor desempenho de todos os modelos. A variação da extensão ao longo de metade do comprimento do laminado é apresentada na Figura 5.17-a, para quatro níveis de carga, sendo um dos quais próximo da cedência e outro de pós-cedência (curvas a vermelho e rosa com  $0.99P_{máx}$  e  $0.97 P_{máx}$ , respectivamente). A distribuição das tensões médias de corte (aderência) ao longo do mesmo comprimento da interface betão-laminado está exposta na Figura 5.17-b, para os mesmos níveis de carga. Para facilitar o estudo comparativo, nas restantes parcelas da Figura 5.17 (c, d, e, f) apresentam-se os mesmos diagramas para os casos das vigas *B.5* e *B.8*, respectivamente. Observa-se, desta figura, que as forças de corte transferidas do laminado para o betão vão aumentando do centro para a extremidade do reforço, à medida que os níveis de carga progridem. O valor máximo da tensão média de corte é maior no caso *B.3* e ocorre junto à extremidade do laminado. Este facto deve-se a três aspectos, ou seja, à melhoria da ligação através da utilização de um primário, à presença da "ancoragem" do CFRP sobre os apoios e ao aumento de fendas no betão que reduz a transferência de forças de corte entre partes fendilhadas.

(iii) - Vigas *B.5* e *B.8* (com o adesivo Sikadur 30)

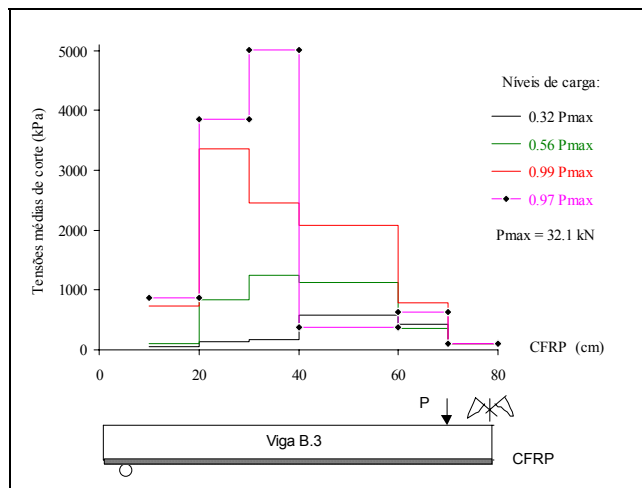
As vigas apresentam um padrão de fendilhação semelhante, em termos de fendas de flexão e de corte, verificando-se, contudo, um aumento do comprimento das mesmas, mais pronunciado no caso *B.5*.

Em ambas, a rotura surgiu de forma frágil por destacamento do laminado, ao longo de uma superfície de corte no betão adjacente à interface betão-adesivo e após a demarcação significativa de uma fenda de corte direccionada para a carga, como na viga *B.5*, ou depois da fragilização do betão (fendas de flexão e esmagamento do betão à compressão) no vão entre as secções de carregamento, como no modelo *B.8*. Nas Figuras 5.18-a e 5.18-b, apresentam-se o aspecto geral da ruína e o pormenor do modo como cedeu a viga *B.5*. Por outro lado, a Figura 5.19 ilustra a forma como ocorreu a cedência da viga *B.8*. Por observação das superfícies de ruína dos modelos ao longo da extensão do CFRP que se destacou, constatou-se que, além de ambos compreenderem uma zona por arrancamento do betão, existiu corte interlaminar do CFRP sobre o apoio, como se pode verificar na fotografia da Figura 5.20 para a viga *B.8* (extensão *AB*).

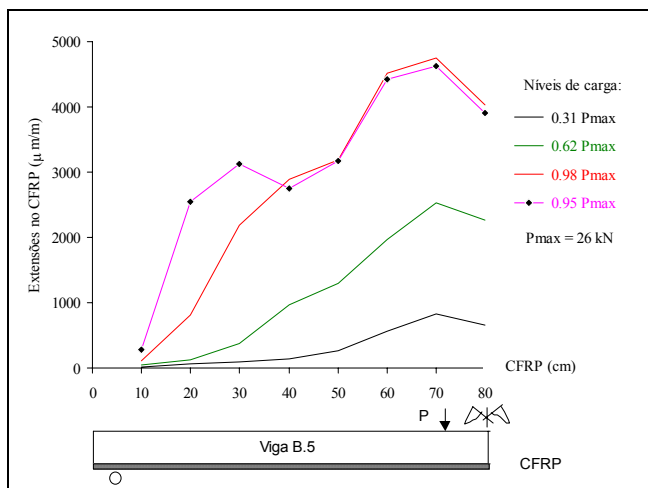




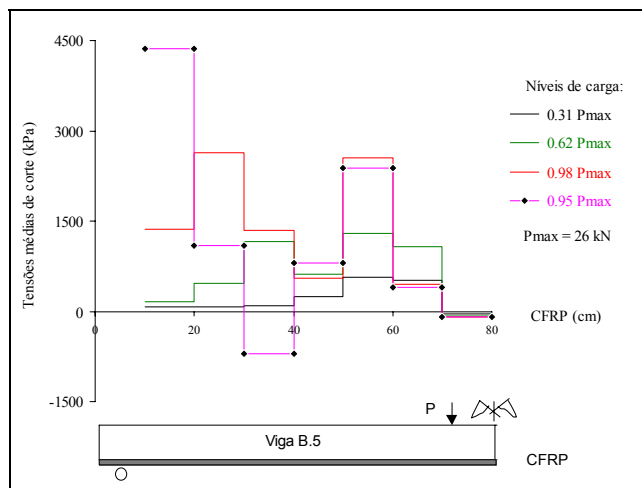
a) Extensões (B.3)



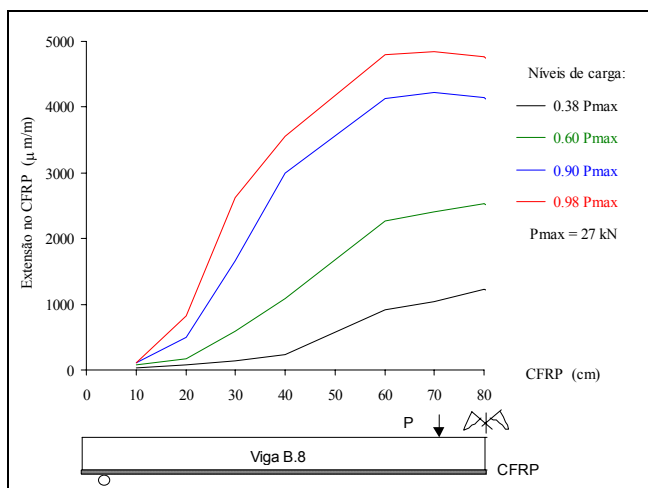
b) Tensões médias de corte (B.3)



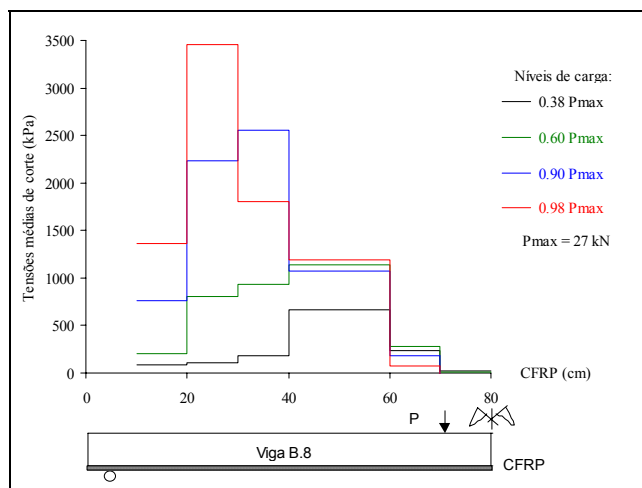
c) Extensões (B.5)



d) Tensões médias de corte (B.5)

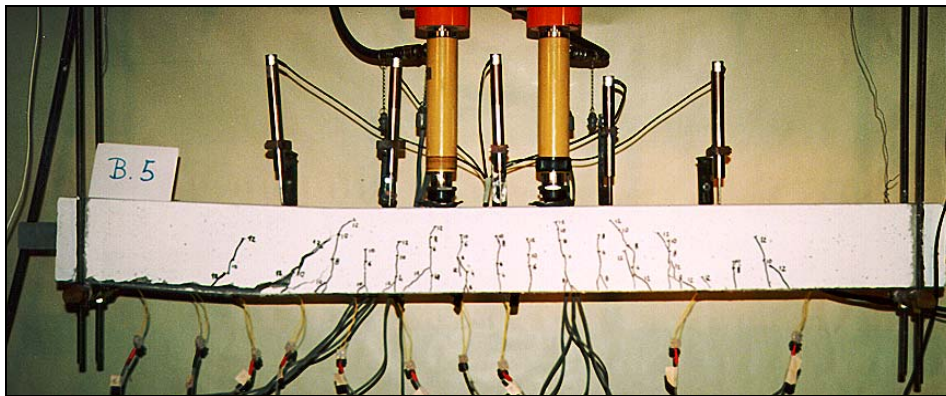


e) Extensões (B.8)

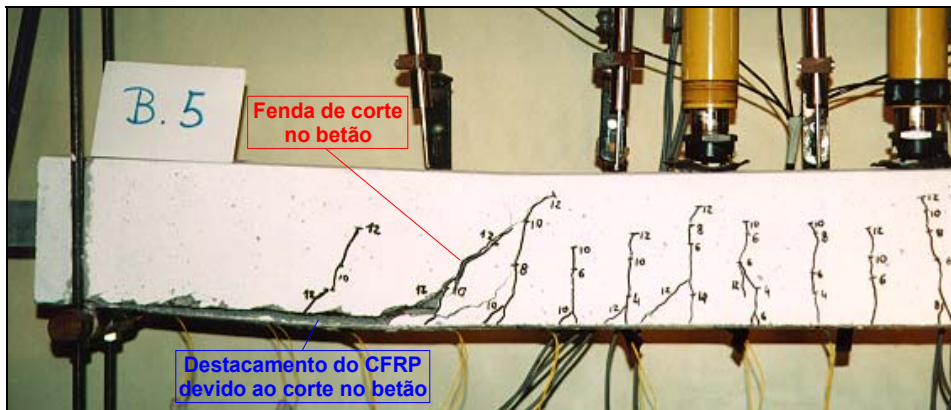


f) Tensões médias de corte (B.8)

Figura 5.17 – Diagramas de extensões e de tensões médias de corte ao longo de metade do comprimento do CFRP (B.3, B.5 e B.8).



a) Aspecto geral.



b) Pormenor da ruína.

Figura 5.18 – Ruína da viga B.5.

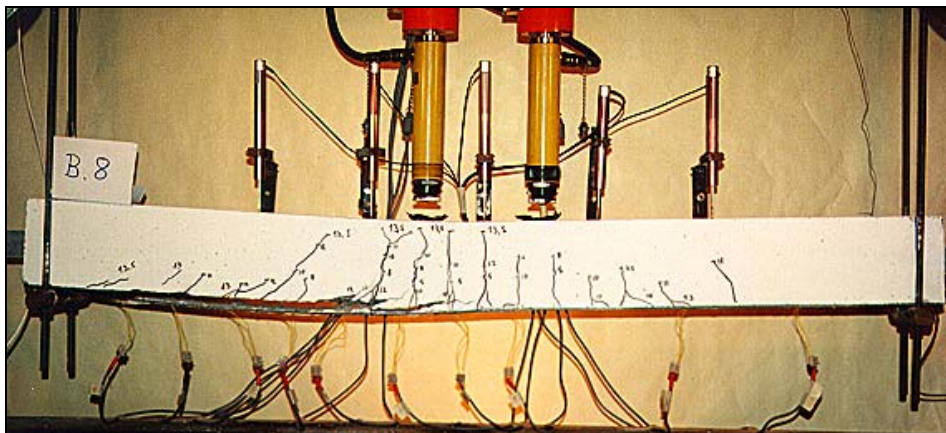


Figura 5.19 – Aspecto geral da cedência da viga B.8.



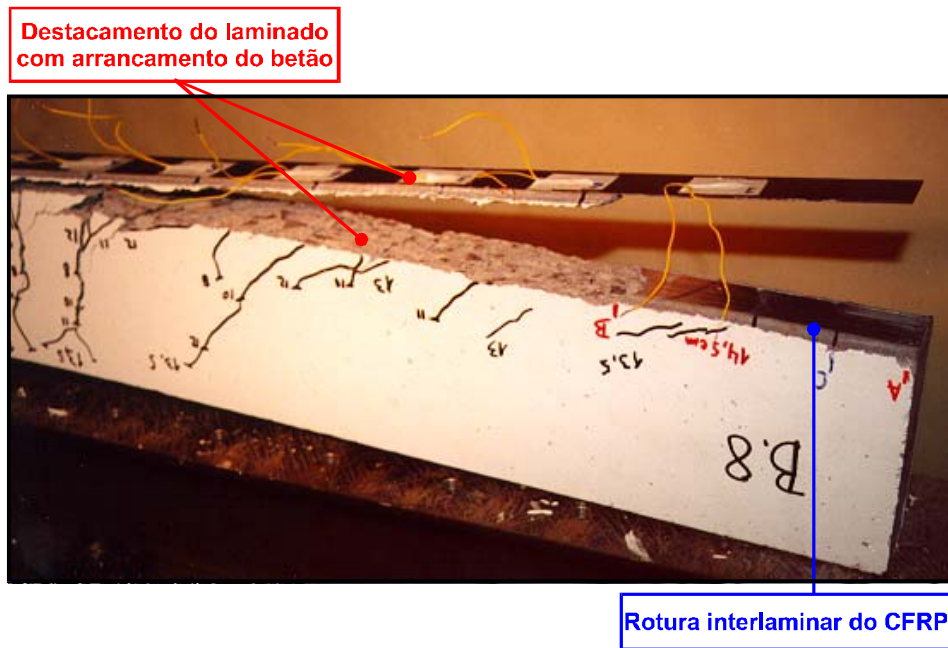


Figura 5.20 – Superfície de destacamento do CFRP (viga *B.8*).

Os diagramas de resposta força total-deslocamento a meio vão (LVDT nº 3) estão ilustrados na Figura 5.15.

Como se pode observar nos diagramas das Figuras 5.17-c e 5.17-d, para a viga *B.5* existe uma natural interferência do padrão de fendilhação na forma irregular das curvas, a partir da carga de  $16.1\text{ kN}$ . A progressão do estado de fendilhação, do centro da viga para a zona do apoio, originou que os valores máximos das tensões médias de corte se localizem nas extremidades do reforço onde existe aderência. A capacidade da estrutura ainda reforçada com o compósito fica comprometida a  $26\text{ kN}$ , iniciando-se a redução da contribuição de aderência betão-laminado entre fendas e, conseqüentemente, o processo de destacamento deste por arrancamento do betão até próximo do apoio. Junto à rotura, o reforço funciona numa zona restrita do apoio devido ao efeito de ancoragem, vindo a viga a ceder com a carga de  $24.6\text{ kN}$ , através do desenvolvimento da superfície de rotura já descrita. Em contrapartida, da análise das Figuras 5.17-e e 5.17-f correspondentes à viga *B.8*, verifica-se um comportamento mais regular que o de *B.5*, devido ao padrão de fendilhação formado (Figuras 5.18-a e 5.19). No entanto, o valor máximo da tensão média de corte volta a ocorrer junto à extremidade do laminado, devido às mesmas circunstâncias indicadas para *B.3* e *B.5*.

Nas Tabelas C.7 e C.10, apresentadas em anexo C, resumem-se os resultados dos ensaios dos modelos *B.5* e *B.8*, respectivamente, incluindo-se em cada uma delas a figura com o padrão de fendilhação final após a ruína.

### 3 – Modelos com reforço de diferentes comprimentos.

Neste grupo, descrevem-se os ensaios das vigas em que o reforço com o material compósito não foi ancorado sobre os apoios, mantendo-se os valores das percentagens de aço e de compósito do grupo de vigas anterior.

#### (i) - Vigas B.7 e B.11

O modelo B.7 apresentou um padrão de fendilhação bastante acentuado e distribuído, até atingir a sua capacidade máxima na ordem de 25.0 kN. Logo após, a cedência da viga surgiu de um modo frágil através de uma superfície de ruína, que envolveu o destacamento da metade direita do laminado e o agravamento de duas fendas de corte direccionadas até à secção de uma das cargas. Este modelo de ruína é referido, habitualmente, noutros trabalhos de investigação que versam esta matéria. Este processo ocorreu de modo mais brusco do que os modelos já descritos devido, em parte, à ausência de qualquer tipo de ancoragem na extremidade do reforço. Na Figura 5.21, apresenta-se uma fotografia com o aspecto geral de cedência deste modelo.

Em oposição, a viga B.11 não beneficiou do efeito causado pela presença do reforço exterior, visto que a formação bem visível de uma fenda de corte no betão, junto à extremidade do laminado, precipitou a ruína do conjunto. Esta acção deveu-se ao efeito da transição brusca de rigidez nessa secção, acrescida da insuficiência de armadura longitudinal para absorver os esforços de flexão, naquela secção.

Nestas circunstâncias, na Figura 5.22 observa-se que o padrão de fendilhação instalado na viga é pouco significativo, excepto na secção de ruína, e que não há qualquer tipo de cedência do laminado em toda a sua extensão.

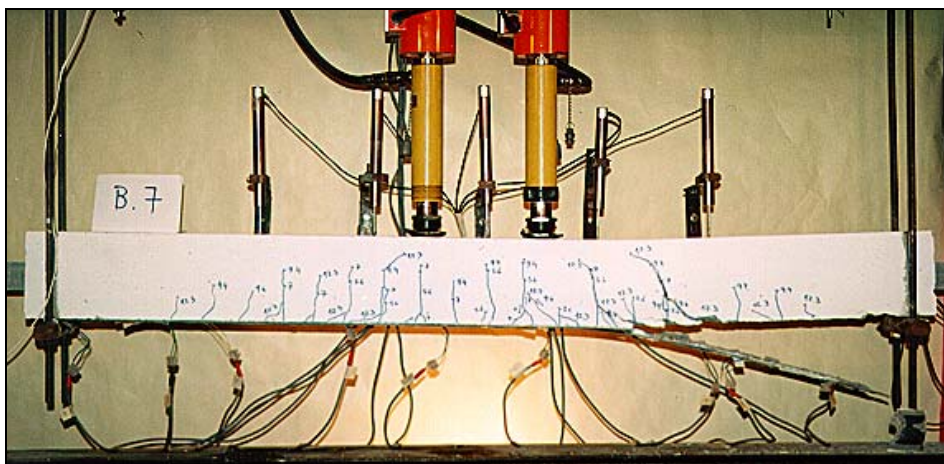


Figura 5.21 – Aspecto geral da ruína da viga B.7.

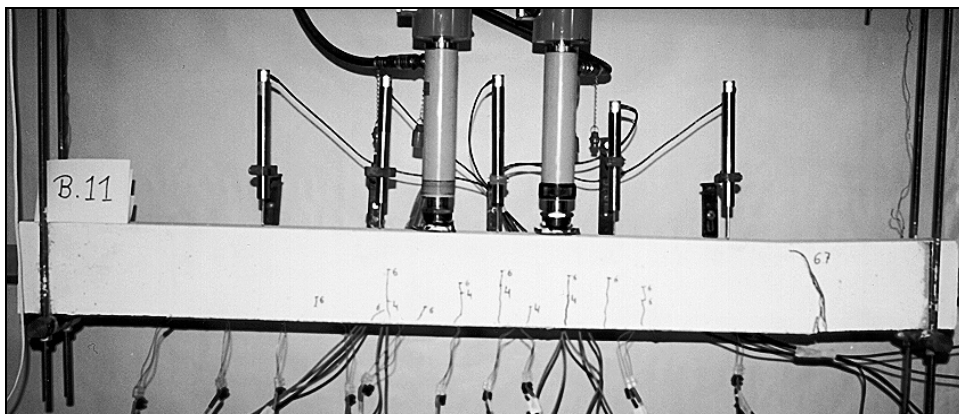


Figura 5.22 – Aspecto geral da ruína da viga *B.11*.

A Figura 5.23 ilustra o diagrama com as curvas carga total vs deslocamento a meio vão (LVDT nº 3) dos modelos de vigas em análise, inscrevendo-se também a curva equivalente obtida para a viga *B.3*, de modo a permitir uma comparação simples.

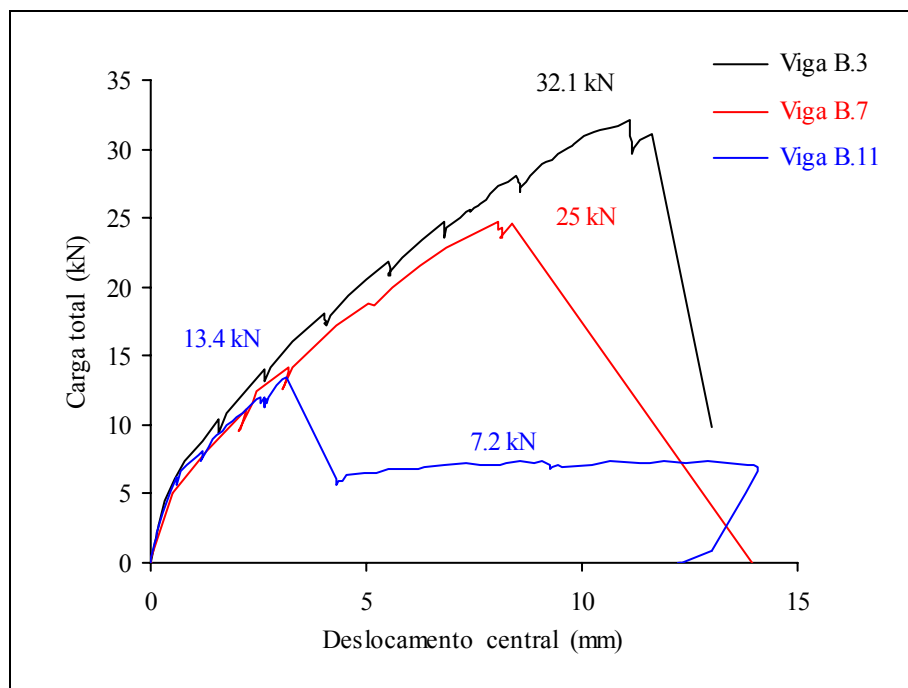
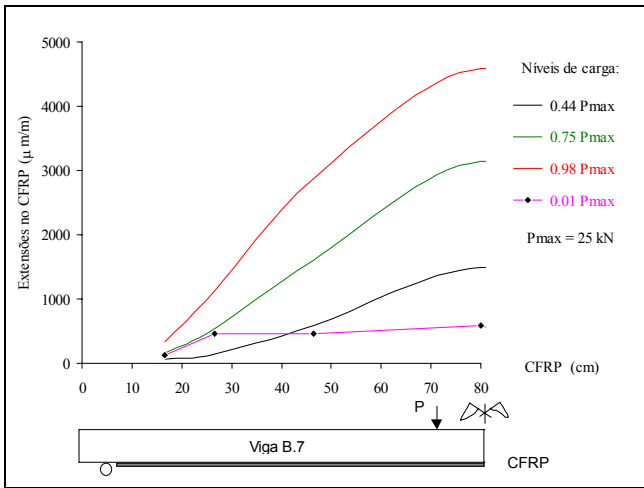


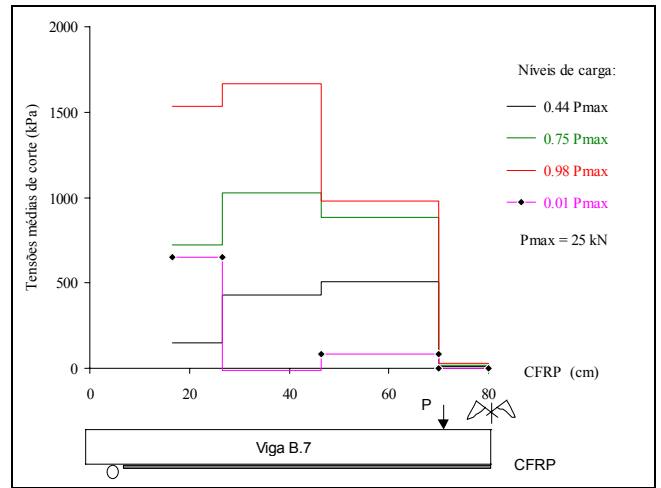
Figura 5.23 – Curvas carga total vs deslocamento central das vigas *B.3*, *B.7* e *B.11*.

Destes dois exemplos, pode concluir-se que diferentes comprimentos de colagem do laminado resultam em modos de ruína como os apresentados, em particular, no caso da cedência antecipada da viga por deficiente armadura ao esforço transversal.

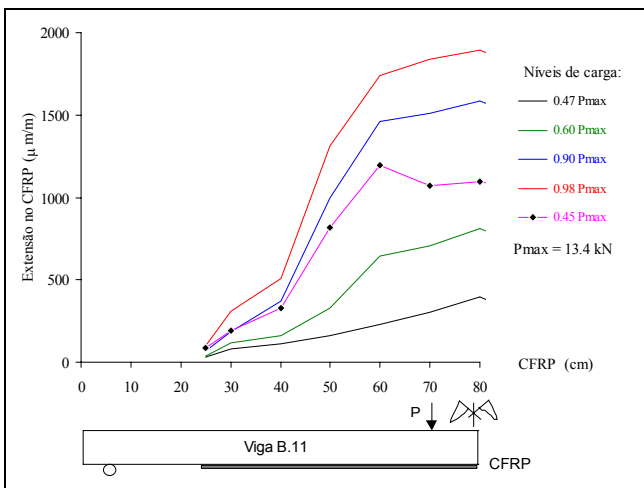
O uso de "ancoragem" sobre os apoios nas extremidades do reforço (estudado no grupo anterior) conduziu ao aumento da carga última, como se deduz da comparação do comportamento das vigas *B.7* e *B.8* com reforços de comprimentos semelhantes e de extremidades diferentes. Este efeito está registado nos diagramas de distribuição das extensões e das tensões médias de corte ao longo do comprimento da interface betão-CFRP, para vários níveis de carga (desde 44% a 98% de  $P_{máx}$ ) e para as vigas *B.7* (Figuras 5.24-a e 5.24-b) e *B.11* (Figuras 5.24-c e 5.24-d).



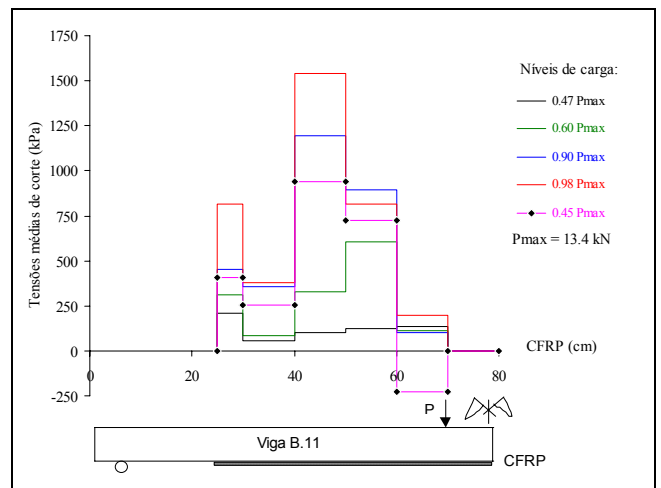
a) Extensões (*B.7*).



b) Tensões médias corte (*B.7*).



c) Extensões (*B.11*).



d) Tensões médias corte (*B.11*).

Figuras 5.24 – Extensões e tensões médias de corte ao longo de metade do comprimento do CFRP.

Nas Tabelas C.9 e C.13, incluídas no anexo C, expõem-se o padrão de fendilhação, o modo de ruína e outros dados registados nos ensaios de flexão das vigas *B.7* e *B.11*, respectivamente.

#### 4 – Modelos com percentagens de armadura diferentes

O comportamento deste grupo de vigas é apresentado de acordo com a modificação processada ao nível da percentagem de armadura utilizada nos modelos, para resistir à tracção e ao corte, em relação à secção corrente da armadura usada nas vigas *tipo B*.

##### (i) - Viga B.9

Na execução deste modelo, inverteu-se a posição corrente das armaduras de tracção e de compressão. A face a reforçar, posteriormente com o compósito, dispõe de uma armadura de  $3\phi 8$  ( $\rho_s = 1.34\%$ ), em lugar dos habituais  $2\phi 3$  ( $\rho_s = 0.126\%$ ) empregues nas restantes vigas da *série B* (consultar o item 3.1.2.1). Este factor conduziu a um aumento da capacidade resistente, da rigidez e da ductilidade da viga, como se depreende da observação da Figura 5.25, que consiste no diagrama de resposta carga total vs deslocamento a meio vão (LVDT nº 3) dos modelos B.3, B.6 (já interpretados), comparado com os dos modelos B.9 e B.13.

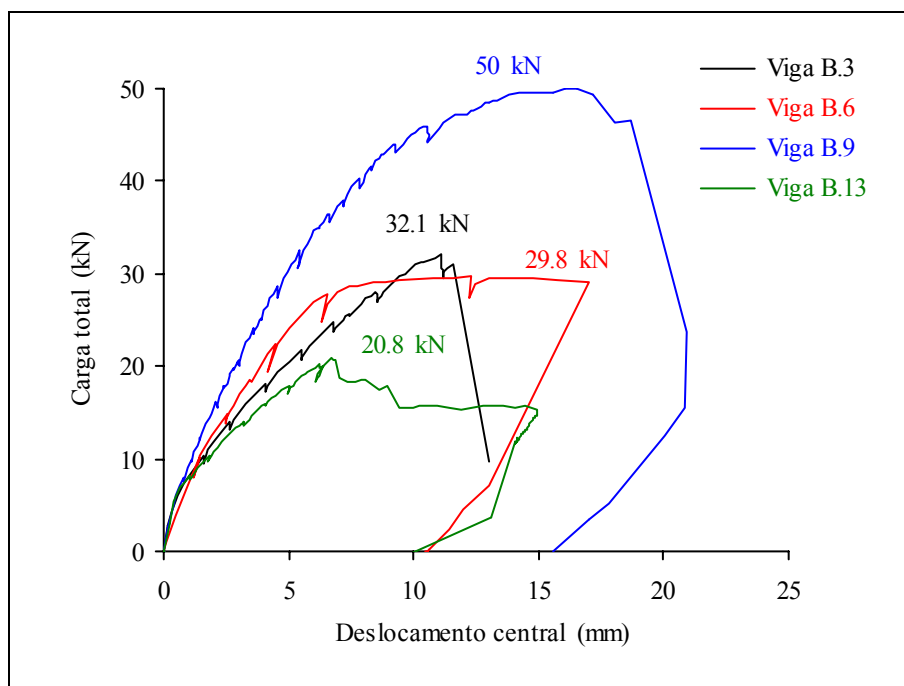


Figura 5.25 – Curvas carga total vs deslocamento central das vigas B.3, B.6, B.9 e B.13.

O nível de cargas a que se submeteu a *viga B.9* permitiu o desenvolvimento de uma malha de fendilhação bastante demarcada em toda a viga, provocando o destacamento do laminado (1º efeito) para a carga de  $50\text{ kN}$  e numa extensão de, sensivelmente,  $2/3$  da distância entre apoios. Em seguida,



o nível de cargas reduziu e quando se registou o valor de  $46.3 \text{ kN}$  nas células de carga, surgiu a cedência da viga por esmagamento da camada superior de compressão do betão (2ºefeito).

Comparativamente à viga de referência *B.6* obteve-se em aumento de resistência de 68% e, para a carga de serviço de  $P_{m\acute{a}x, B.6}/2 = 15 \text{ kN}$ , mede-se um acréscimo da rigidez entre flechas de 1.39. Na Figura 5.26, apresenta-se uma fotografia do aspecto geral da viga após a cedência. Observando, com mais detalhe, a superfície de ruína por destacamento do laminado, verifica-se a demarcação de três sectores, ou seja, um de corte pelo betão na extremidade sobre o apoio esquerdo, outro de ruína interlaminar do compósito numa extensão de 39 cm (ver Figura 5.27) e ainda outro por arrancamento do betão adjacente à interface betão-adesivo com o comprimento aproximado de 73 cm.

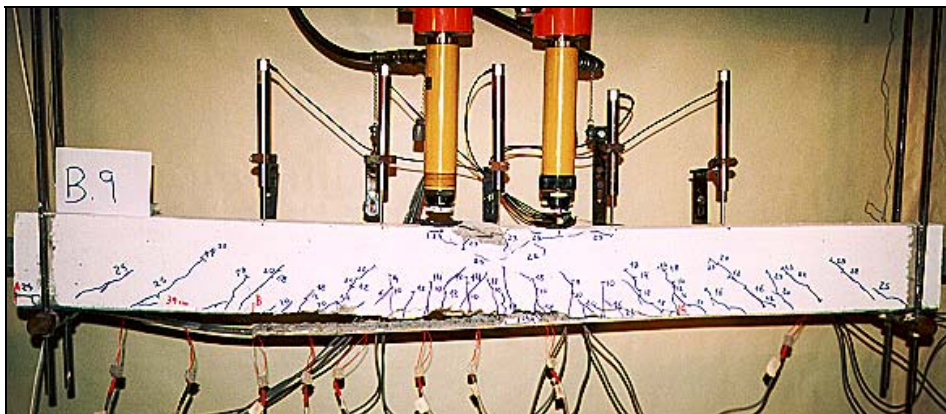


Figura 5.26 – Aspecto geral da cedência da viga *B.9*.

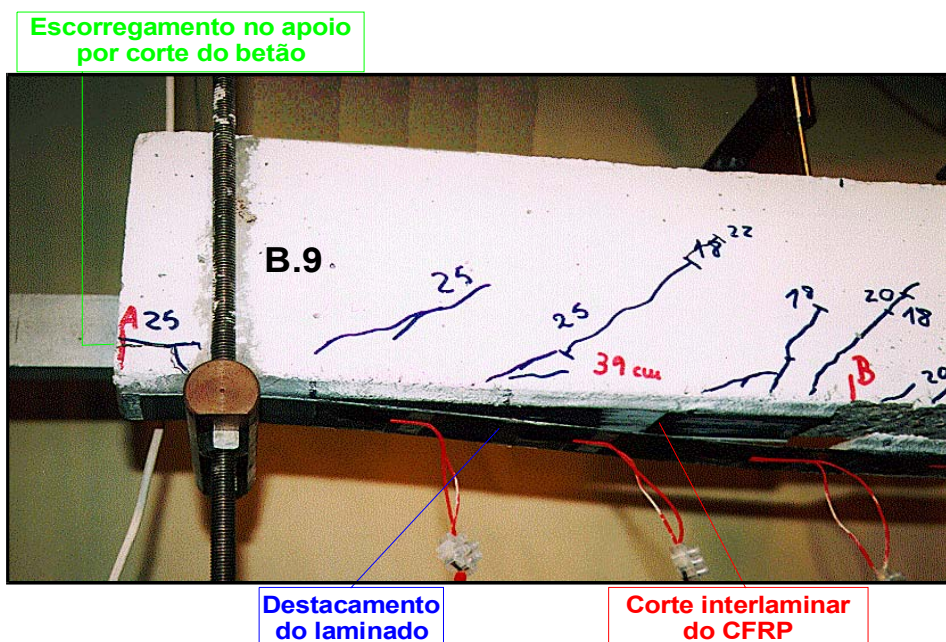
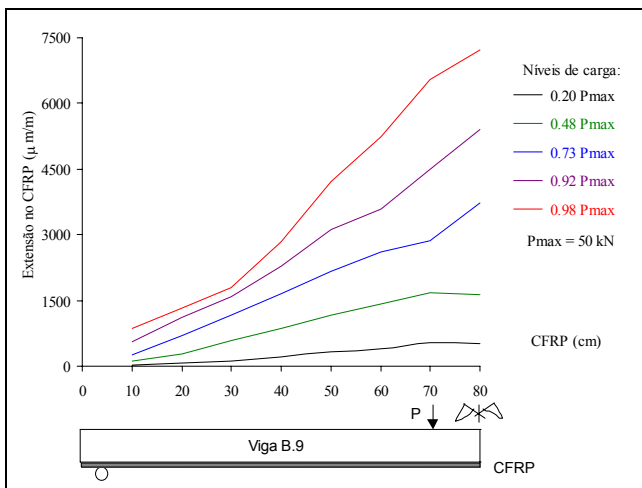
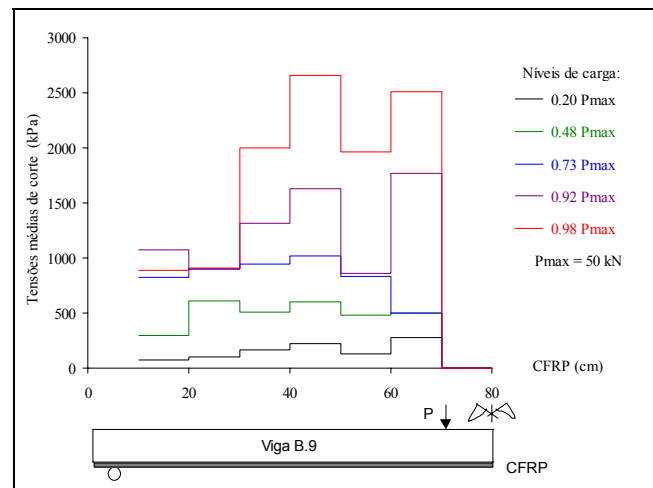


Figura 5.27 – Pormenor da ruína interlaminar do CFRP (viga *B.9*).

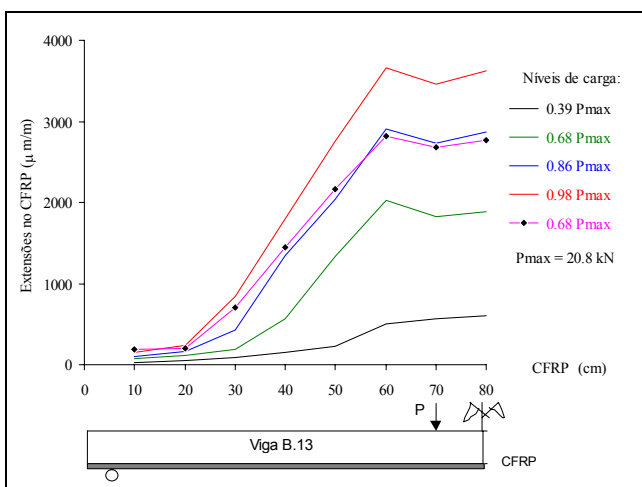
As Figuras 5.28-a e 5.28-b mostram os diagramas de distribuição das extensões e das tensões médias de corte deste modelo, para vários níveis de carga. Da análise destes, verifica-se que até se atingir a carga máxima de  $50 \text{ kN}$ , a aderência betão-laminado comporta-se regularmente com as habituais interferências na distribuição das tensões de corte, devido ao aparecimento das fendas de flexão e de corte no betão. Após este valor e até ocorrer a ruína a  $46.3 \text{ kN}$ , inicia-se um sector de destacamento do laminado por arrancamento do betão, conduzindo a tensões de corte praticamente nulas. Contudo, a aderência ao betão parece continuar junto aos apoios e, com o aumento da carga, essas tensões assumem valores elevados na zona dos quartos de vão da viga. Este último comprimento de aderência é destruído com a cedência da viga e coincide com o sector de ruína interlaminar do CFRP já mencionado.



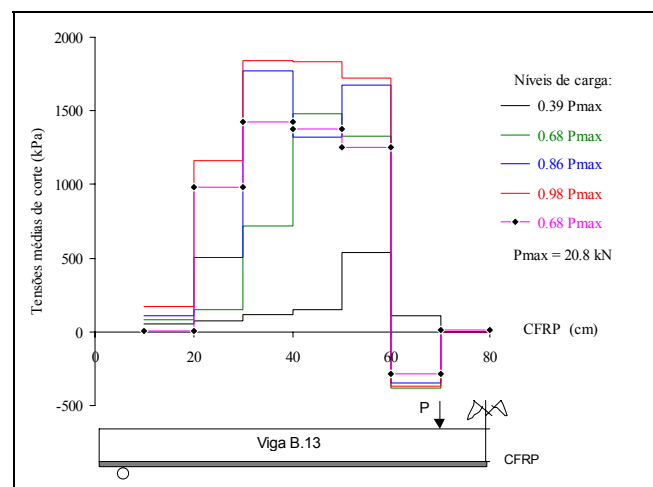
a) Extensões (B.9).



b) Tensões médias de corte (B.9).



c) Extensões (B.13).



d) Tensões médias de corte (B.13).

Figura 5.28 – Extensões e tensões médias de corte ao longo de metade do comprimento do CFRP.

A Tabela C.11, do anexo C, resume o comportamento da *viga B.9* ao ensaio de flexão em quatro pontos.

(ii) - *Viga B.13*

A redução da percentagem de armadura do esforço transversal de  $\rho_w = 0.31\%$  para  $\rho_w = 0.19\%$ , pela alteração do afastamento entre os estribos para  $10\text{ cm}$ , criou um padrão de fendilhação com maior distância entre fendas do que a dos outros modelos. Este factor também se repercutiu no modo de ruína do modelo, através de um escorregamento gradual (não frágil) de duas partes da viga, segundo uma fenda de corte orientada para a secção de carga, quando as células registavam  $20.8\text{ kN}$ . Com o aumento da deformação do modelo, o laminado acabou por se destacar da parte direita, sem ocorrer escorregamento no apoio (como tem sido habitual noutros casos), para a carga de  $18.8\text{ kN}$ . A falta de armadura de tracção ( $2\phi3$ ) precipitou a ruína da viga.

A fotografia representada na Figura 5.29 ilustra o aspecto geral da cedência da *viga B.13*, realçando-se, sobretudo, o afastamento regular das fendas principais e a secção de ruína do modelo.

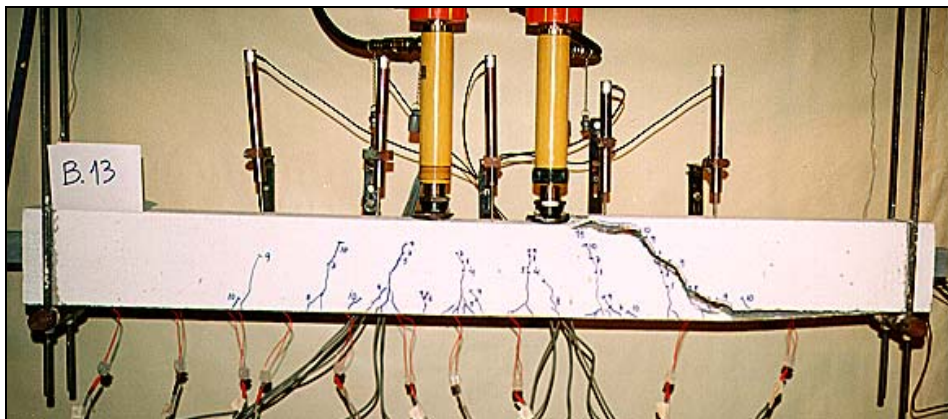


Figura 5.29 – Aspecto geral da cedência da *viga B.13*.

As curvas de distribuição das extensões e das tensões médias de corte, medidas para vários níveis de carga até a ruína da *viga B.13*, estão indicadas nas Figuras 5.28-c e 5.28-d, respectivamente.

Na Tabela C.15, incluída no anexo C, representa-se a resposta deste modelo ao ensaio de flexão estipulado no programa de investigação em curso, com particular destaque de uma fotografia com o pormenor da superfície de ruína.



## 5 – Reforço de um modelo pré-fendilhado

### (i) - Viga B.10

#### a) 1ª fase – pré-fendilhação

Nas condições em que este modelo foi concebido, com percentagens de aço de  $\rho_s = 1.34\%$ ,  $\rho_s = 0.126\%$  e  $\rho_w = 0.31\%$ , a indução de uma pré-fendilhação resulta, basicamente, do peso próprio da viga quando esta é colocada no aparelho de ensaio. Da Figura 5.30-a observa-se que, nestas circunstâncias, apenas se formou uma fenda localizada sobre uma das secções de carga.

#### b) 2ª fase – reforço

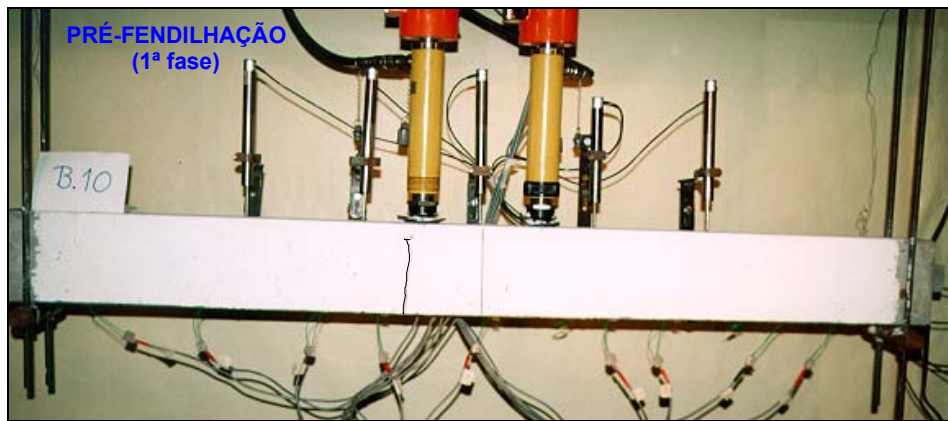
Nesta fase, procedeu-se ao reforço do modelo através da colagem de uma tira do laminado de carbono ( $\rho_L = 0.53\%$ ) na face deste submetida a esforços de tracção.

#### c) 3ª fase – cedência do modelo

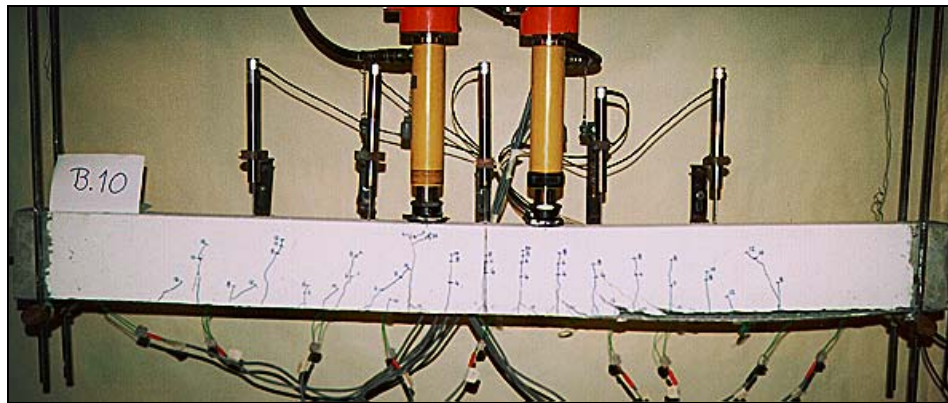
A pré-fendilhação não alterou o tipo de fendilhação previsto para esta fase. No entanto, durante o ensaio a pré-fenda progrediu em altura, apesar da secção respectiva não vir a ser a de cedência do modelo. Por análise da fotografia representada na Figura 5.30-b, deduz-se que o padrão de fendilhação final é semelhante ao encontrado nos outros casos e a rotura ocorreu por destacamento do laminado adjacente à interface betão/adetivo e por cedência ao corte do betão armado.

A observação da superfície de rotura demonstrou que, ao longo do comprimento do laminado destacado da viga, este foi sustentado pelo arrancamento do betão entre fendas de corte no vão entre a carga e o apoio (Figura 5.31) e pelo escorregamento por corte interlaminar do CFRP ancorado sobre o apoio direito da viga.

Na Figura 5.32, comparam-se os diagramas da relação carga total vs deslocamento a meio vão medida para o desempenho da viga B.10 (3ª fase) com o da viga B.3. A variação das extensões ao longo do laminado e das tensões médias de corte, segundo o percurso da interface betão-adetivo para vários níveis de carga (desde 18% a 98% de  $P_{máx}$ ), estão representadas nas Figuras 5.33-a e 5.33-b.



a) 1ª fase – pré-fendilhação.



b) 3ª fase – Cedência após reforço do modelo.

Figura 5.30 – Resposta da viga B.10 ao ensaio de flexão.

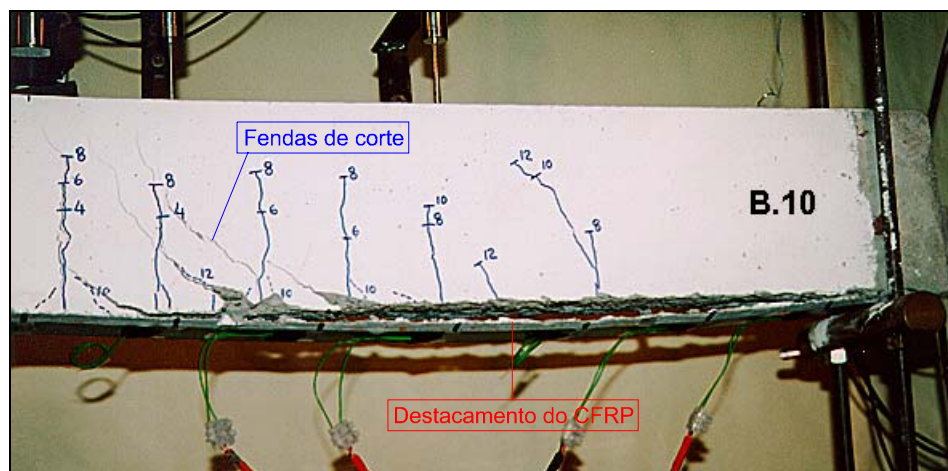


Figura 5.31 – Superfície de rotura da viga B.10.

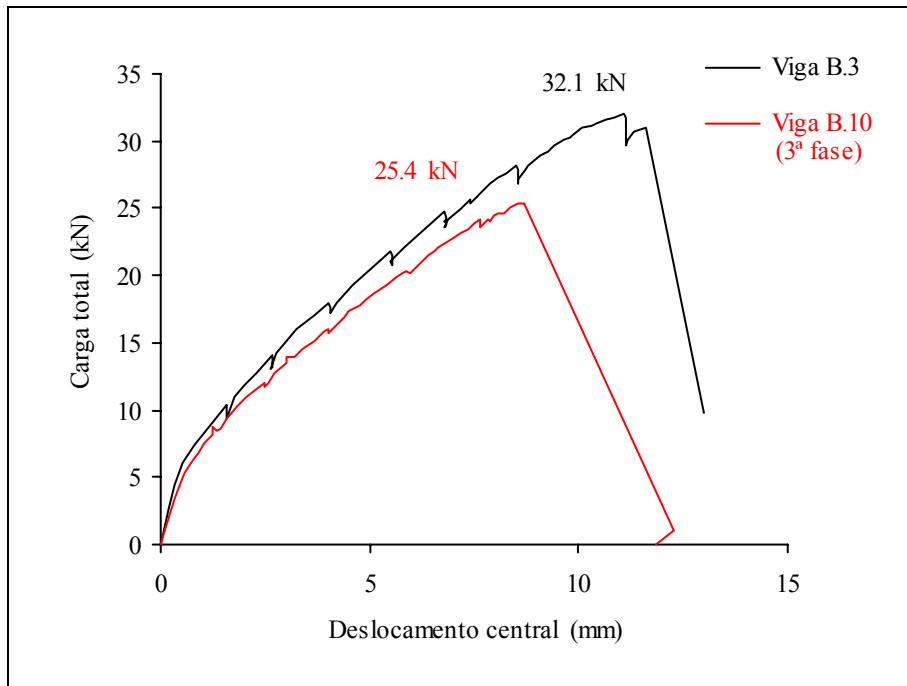
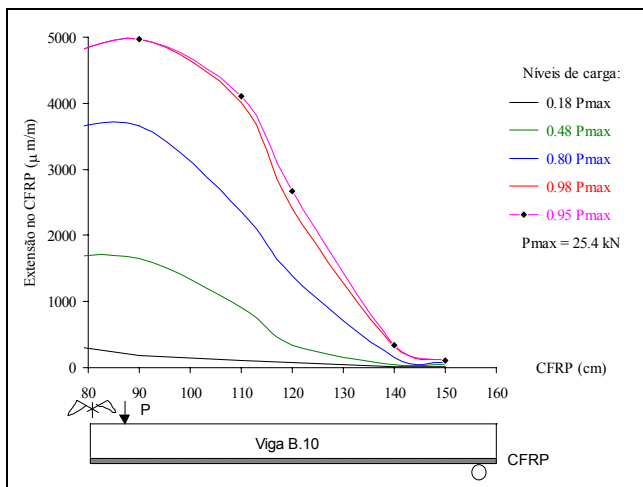
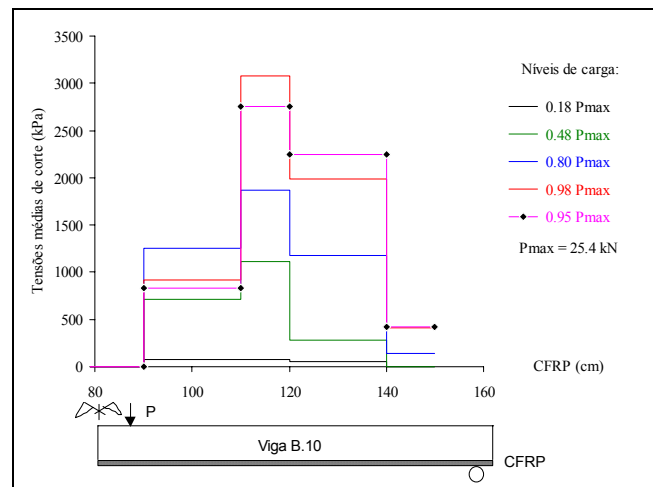


Figura 5.32 – Diagrama carga total vs deslocamento central das vigas B.3 e B.10.



a) Extensão (B.10).




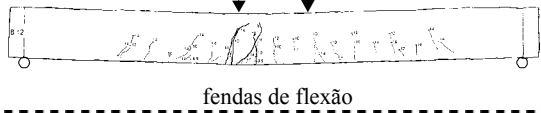
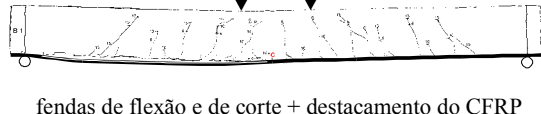
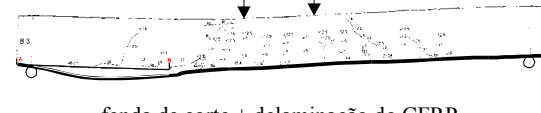
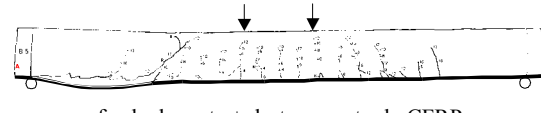
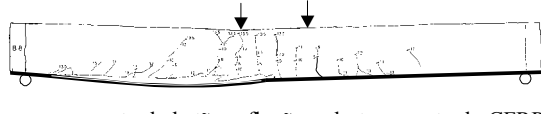
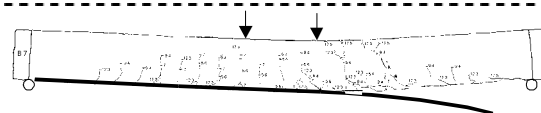
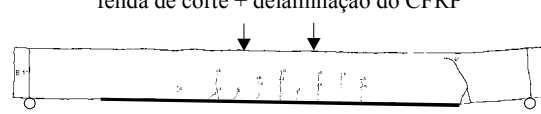

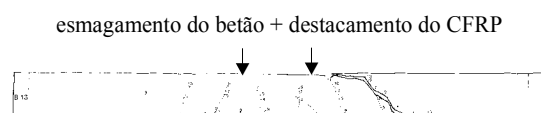
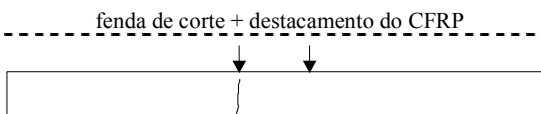
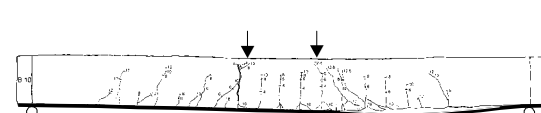
b) Tensões médias de corte (B.10).

Figura 5.33 – Extensões e tensões médias de corte ao longo de metade do comprimento do CFRP.

O comportamento do modelo reforçado, após fendilhação sem selagem das fendas, não parece ser significativamente diferente dos outros casos de reforço analisados. O modo de ruína, esse sim, é influenciado pelo estado de fendilhação (fenda de corte) e pela resistência última às tensões de corte que vão surgindo na interface betão-laminado (consultar Tabela C.12 do anexo C).

Da série de modelos *tipo B* é possível resumir as principais informações na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Resumo dos ensaios de flexão das vigas tipo B.

VIGA	$P_{m\acute{a}x}$ (kN) [i]	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm) [i]	CFRP [ii]		MODO DE RUÍNA [iii]
			$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	$\tau_{m\acute{a}x}$ [KPa]	
B.6	29.8	12.3	-	-	 esmagamento do betão
B.12	29.5	15.3	-	-	 fendas de flexão
B.1	31.2	11.3	-	-	 fendas de flexão e de corte + destacamento do CFRP
B.3	32.0	11.6	1015	5022	 fenda de corte + delaminação do CFRP
B.5	26.0	9.2	761	3490	 fenda de corte + destacamento do CFRP
B.8	27.0	9.8	775	3457	 esmagamento do betão + flexão + destacamento do CFRP
B.7	25.0	8.4	733	1797	 fenda de corte + delaminação do CFRP
B.11	13.4	3.2	295	1540	 cedência na secção de interrupção do CFRP
B.9	50.0	16.6	1154	4449	 esmagamento do betão + destacamento do CFRP
B.13	20.8	6.7	582	1840	 fenda de corte + destacamento do CFRP
B.10 (1ª fase)	1.2	0.3	-	-	
B.10 (3ª fase)	25.4	8.6	796	3074	 fenda de corte + destacamento do CFRP

[i] - Valores máximos da carga total e da flecha central medidos nas vigas com o reforço;  
 [ii] - Valores máximos das tensões de tracção no CFRP e de corte na interface betão-CFRP;  
 [iii] - Consultar o esquema dos modos de ruína nas tabelas incluídas no anexo C.

## 5.2 - FLEXÃO DE VIGAS COM OITO ANOS

Este segundo grupo de modelos de vigas é constituído por uma única série, o *tipo C*. Estes protótipos estavam disponíveis de outros projectos de investigação já concluídos, existem desde 1990, apresentam sinais de alguma degradação e conhece-se pouco acerca da sua constituição (betão e armadura).

### 5.2.1 - Introdução

O efeito das condições adversas do ambiente sobre modelos de betão de baixa classe de resistência, sobretudo a nível das características mecânicas da camada superficial do betão, é analisado na série de vigas *tipo C*, através de um grupo de 5 vigas.

À semelhança das séries anteriores, estas vigas foram submetidas ao ensaio de flexão em quatro pontos cujos resultados se descrevem nesta secção. O programa de ensaios realizou-se de acordo com o estabelecido no anexo A (Tabela A.1), para o programa das tarefas.

Os três modelos iniciais da série *tipo C* (1ª Fase) concretizam a primeira experiência sobre o reforço de vigas de betão, através da técnica de adição de laminados unidireccionais de carbono (CFRP) com resina de epóxico. Numa 2ª Fase (um ano após a primeira), outro grupo de duas vigas foi ensaiado, analisando-se o efeito de envelhecimento do adesivo durante esse período e registando-se os dados extensométricos da deformação do compósito durante o ensaio.

### 5.2.2 - Vigas *tipo C*

A alteração das características mecânicas da camada superficial do betão, devido a condições adversas do ambiente, pode ser fundamental para o sucesso da resistência da ligação do betão com o laminado compósito. Se este efeito incidir sobre um betão de classe baixa, isto é, um betão pobre da classe de resistência C12/16, a opção de um reforço pode ser posta em causa.

Estas vigas foram submetidas ao ensaio de flexão em quatro pontos, cujo aspecto geral pode ser observado na Figura 3.23 do Capítulo 3. Para ajudar a interpretar os resultados dos ensaios, recorda-se que estes modelos apresentam valores da percentagem de aço de  $\rho_s' = \rho_s = 1.0\%$ ,  $\rho_w = 0.37\%$  e de CFRP de  $\rho_L = 0.267\%$ , relacionados pelo quociente  $A_L E_L / A_s E_s = 0.21$ .

*(i) - Vigas C.1, C.2 e C.3 (1ª Fase)*

Os principais resultados da análise experimental obtidos para as três primeiras vigas desta série estão descritos nas Tabelas C.16 a C.18 do anexo C, nomeadamente, o padrão de fendilhação, o modo de ruína e os valores críticos da deformação e das tensões na viga e no compósito de CFRP.

Na Figura 5.34 apresentam-se as curvas carga total vs deslocamento a meio vão (LVDT nº 3), obtidas no ensaio de flexão das vigas C.1, C.2 (comportamento na 1ª fase e na 3ª fase) e C.3.

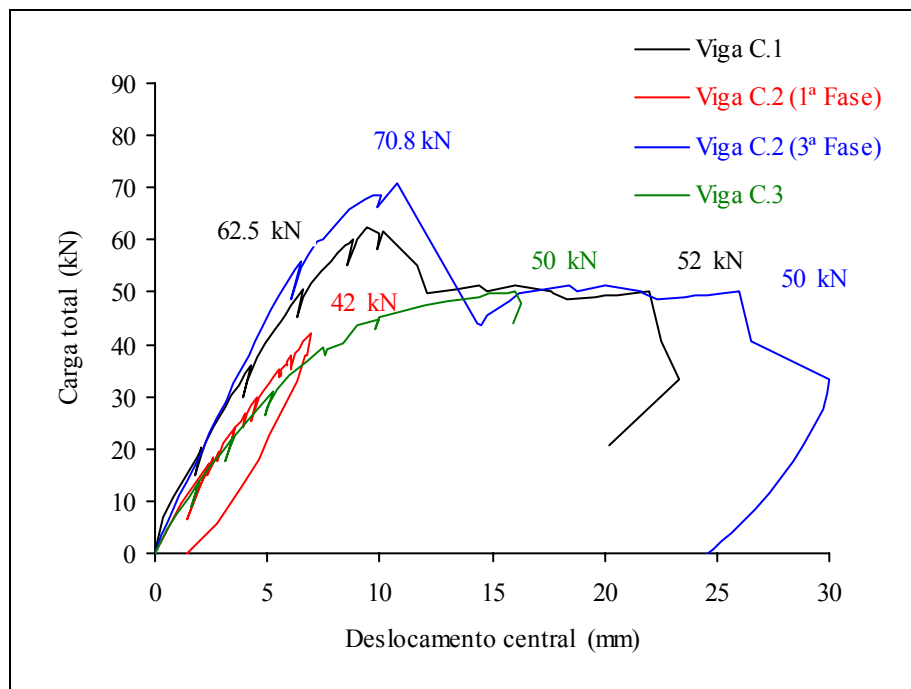


Figura 5.34 – Diagrama de carga total vs deslocamento central das vigas C.1, C.2 (1ª fase e 3ª fase) e C.3 (não reforçada).

Do comportamento das vigas *tipo C* reforçadas por colagem de laminados de CFRP, constata-se os factos a seguir mencionados.

*Viga C.1*

A viga tem um comportamento regular até à força de 62.5 kN iniciando-se, em seguida, o descolamento do reforço por corte longitudinal no betão (primeiro efeito), devido à perda de aderência entre fendas na junta, que conduz à redução da carga no diagrama da Figura 5.34. A ruína surgirá, mais tarde, com o escorregamento por corte (segundo efeito) de uma secção já fendilhada (pormenor da Figura 5.35) e para uma carga de 52 kN, aproximadamente. A superfície de ruína, exposta na Figura 5.36, desenvolve-se ao longo de metade da viga e o seu aspecto permite deduzir a deficiente aderência na interface betão-adesivo.



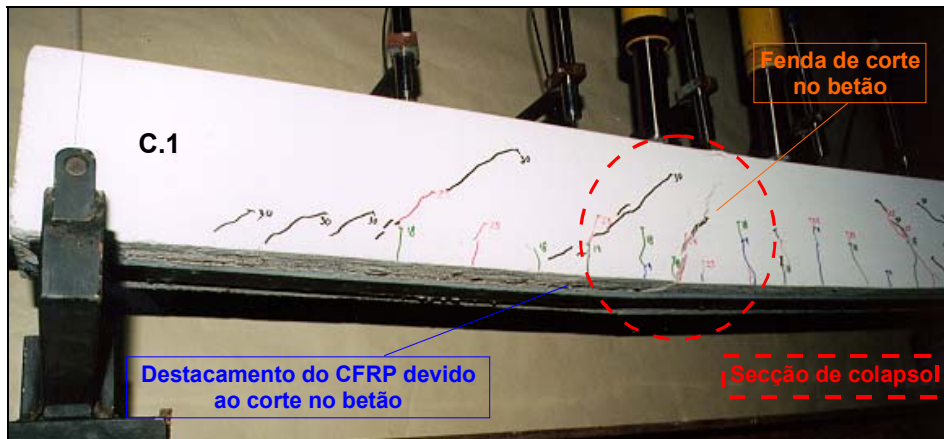


Figura 5.35 – Ruína da *viga C.1*: seção de colapso por corte; destacamento do laminado CFRP.

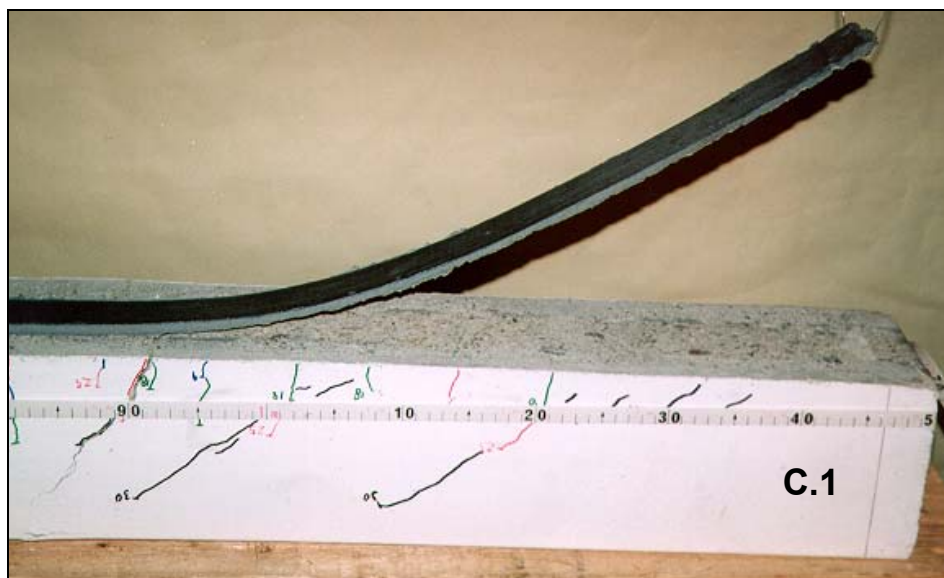


Figura 5.36 – Superfície de cedência do betão na *viga C.1*.

### *Viga C.2*

A pré-fendilhação provocada na viga, durante a 1ª fase (ver Figura 5.37), traduz a situação das estruturas correntes de betão armado que se propõe reforçar com CFRP.

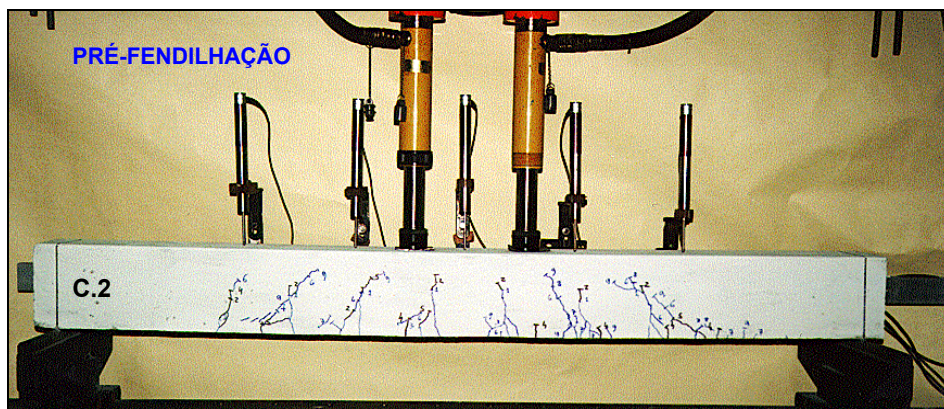


Figura 5.37 – Aspecto geral da pré-fendilhação da *viga C.2* (1ª fase).

Na 3ª fase, o reforço com o laminado de carbono reduziu a sua acção a partir da força de  $70.8\text{ kN}$ , devido ao início do descolamento longitudinal do laminado por corte do betão. A ruína ocorreu por esmagamento da secção de betão a meio do vão (pormenor da Figura 5.38) e por rotura interlaminar do laminado sobre o apoio (superfície exposta na Figura 5.39), quando a célula registava  $50\text{ kN}$ .

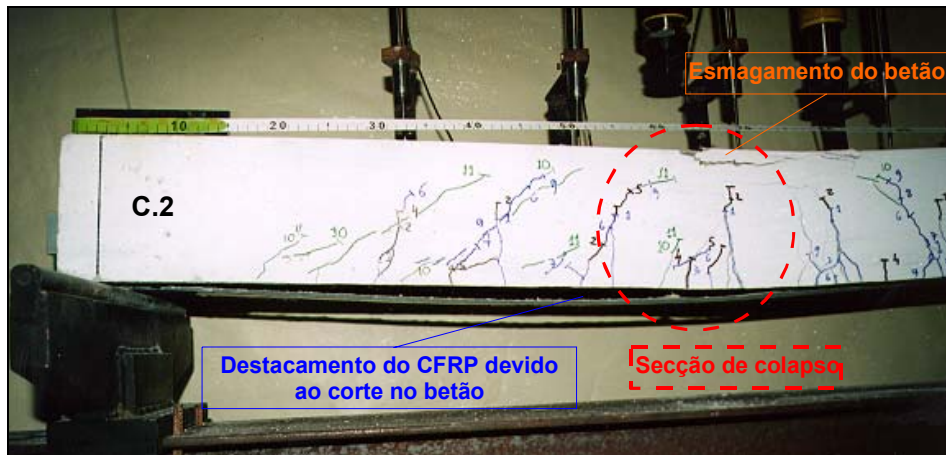


Figura 5.38 – Ruína da viga C.2: esmagamento no betão; descolamento do laminado de CFRP.

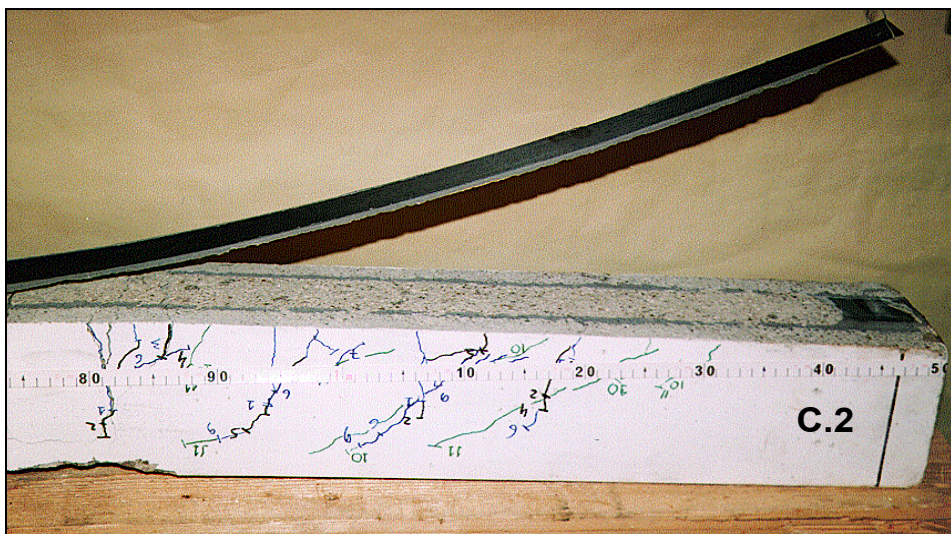


Figura 5.39 – Superfície de ruína da viga C.2 com corte no betão e rotura interlaminar do CFRP.

Do comportamento da viga C.2, verifica-se que o reforço aumenta a capacidade da viga  $41\%$ , sensivelmente, apesar deste valor ter sido menor no caso anterior C.1. No entanto, verifica-se que a máxima eficiência do reforço ocorre para uma deformação de cerca de metade da resultante no colapso da viga. A análise entre os carregamentos destas vigas permite concluir que, a presença do reforço de CFRP no caso C.2 (3ª fase), conduziu a uma fendilhação mais distribuída e a uma menor abertura total de fendas, para o mesmo nível de carga (consultar no anexo C as Tabelas C.16 e C.17).



### *Viga C.3*

A *viga C.3* surge para demonstrar o comportamento típico da viga corrente de betão sem reforço, em confronto com as anteriores *C.1* e *C.2*. Este aspecto está patente na análise da Figura 5.34, já referida anteriormente, apesar de ter ocorrido colapso antecipado da viga, por insuficiência de amarração das armaduras longitudinais na secção do apoio (Figura 5.40).

O modo de ruína, observado nesta viga, não permite concluir sobre a capacidade última das vigas desta série. Todavia, a forma geral da curva de resposta carga total vs deslocamento central (armadura de tracção em cedência) e a dificuldade de repetir o ensaio (número escasso de modelos) justificam que os resultados possam ser admitidos na análise comparativa com as outras vigas da série.

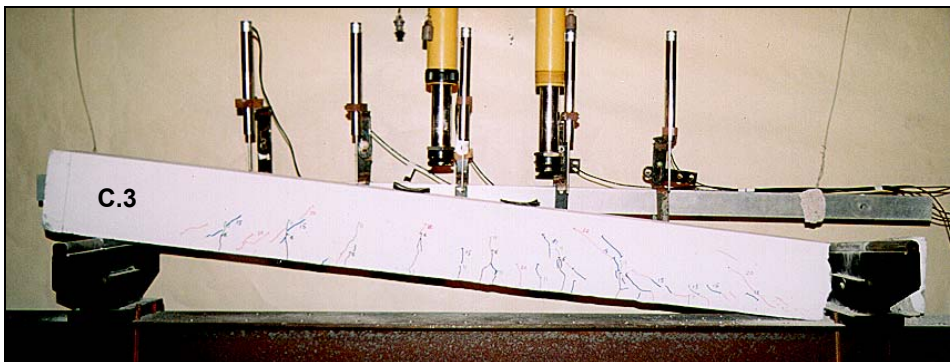


Figura 5.40 – Aspecto geral do modo de ruína da *viga C.3*.

### *(ii) - Vigas C.4 e C.5 (2ª Fase)*

Este segundo grupo de vigas foi ensaiado um ano após o primeiro. Analisou-se o efeito do envelhecimento do adesivo durante este período (*viga C.4*) e obtiveram-se registos do comportamento extensométrico do laminado durante o ensaio (*viga C.5*).

O comportamento experimental dos modelos ensaiados nesta fase resumem-se no anexo C nas Tabelas C.19 e C.20, onde se apresenta o padrão de fendilhação, o modo de ruína e os valores críticos da deformação e das tensões (quando disponíveis) na viga e no compósito de CFRP.

A Figura 5.41 ilustra as curvas força total vs deslocamento a meio vão (LVDT nº 3) obtidas nos ensaios das vigas *C.3*, *C.4* e *C.5*. A curva da viga *C.3* surge nessa figura para se estabelecer uma análise comparativa directa entre o modelo não reforçado e os modelos reforçados.

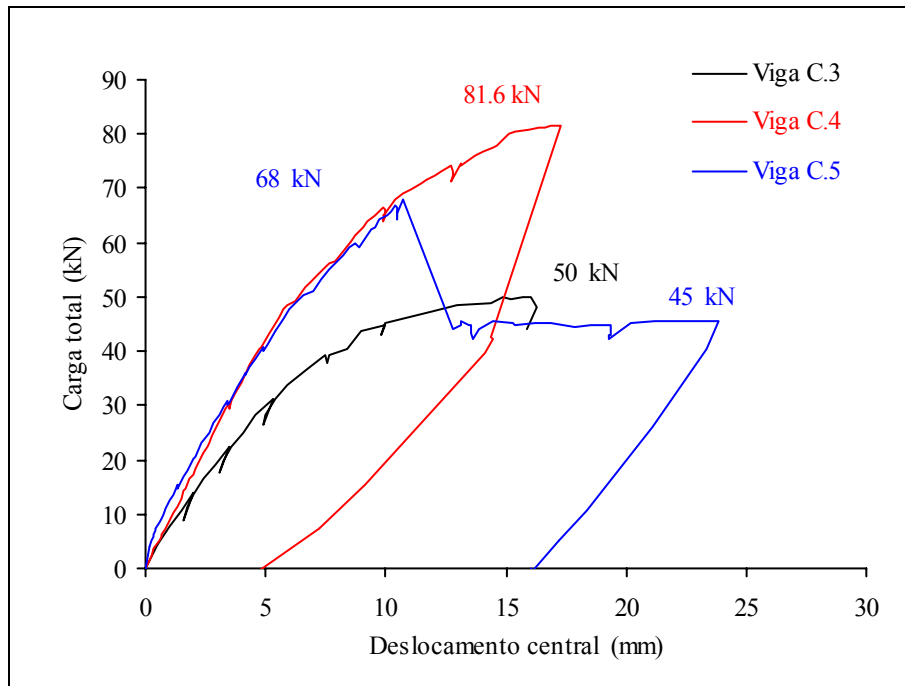


Figura 5.41 - Diagrama de carga total vs deslocamento central das vigas C.3 (não reforçada), C.4 e C.5.

#### Viga C.4

Este modelo apresentou o melhor desempenho do grupo das vigas *tipo C*, enquanto modelo reforçado, visível no valor da capacidade última expressa na curva da Figura 5.41, o que corresponde a um aumento de capacidade da viga de 63%.

Além do tratamento superficial do betão, através de uma limpeza com jacto de areia, este modelo beneficiou de um período extenso de cura (*1 ano*) antes de ser submetido ao ensaio de flexão, sem repercussão negativa a nível da eventual deterioração da interface betão-adesivo-laminado.

A viga tem um comportamento regular até à carga total de *80 kN*, exibindo um padrão de fendilhação bem distribuído ao longo do modelo. De seguida, surge uma fenda de corte no betão junto à zona central e ao nível da armadura de tracção, desencadeando, de imediato, o destacamento do CFRP e do betão e, por fim, a ruína para uma carga total máxima de *81.6 kN*.

A Figura 5.42 apresenta a fotografia do aspecto geral da ruína de C.4 e a Figura 5.43 pormenoriza a forma da superfície de ruína, desde a extremidade "A" até à secção "E", referidas na Tabela C.19 (anexo C).

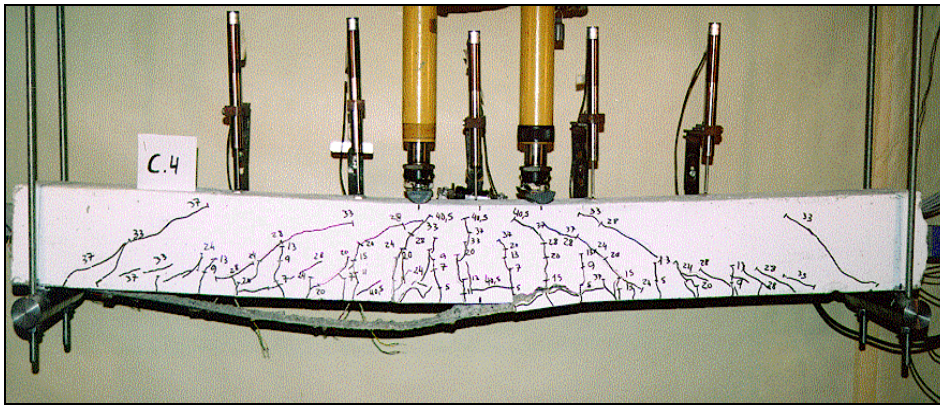


Figura 5.42 - Aspecto geral da ruína da viga C.4.

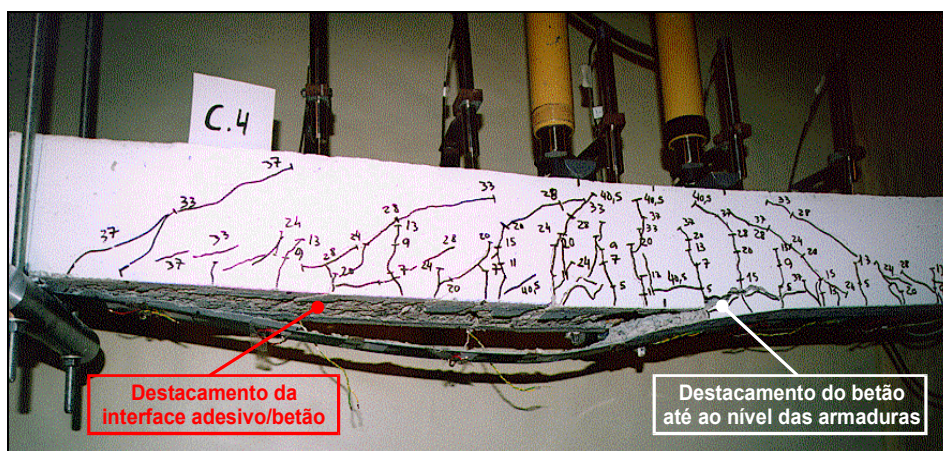


Figura 5.43 - Pormenor da superfície de ruína.

### Viga C.5

O efeito da ausência de "ancoragem" na extremidade do CFRP, sobre a zona dos apoios do modelo (recorde-se a Figura 3.8 do item 3.1.2.1), provocou um valor menor para a capacidade máxima do que o modelo C.4 (observe-se, de novo, a Figura 5.41), traduzindo apenas um aumento de capacidade da viga de 36%.

As primeiras fendas visíveis na superfície da viga manifestaram-se, quando se registava uma força total de 10 kN. O padrão de fendilhação progrediu de forma semelhante aos dos outros modelos ensaiados, observando-se a primeira rotura visível no adesivo, numa secção com desenvolvimento acentuado da fenda de corte no betão (posição indicada por "C" na Tabela C.20 do anexo C).

A cedência do reforço com o laminado surgiu para a força de 68 kN e pelo efeito conjunto do arrancamento do betão (primeiro) e do descolamento do laminado desde a extremidade até ao centro (segundo). Estes dois efeitos foram referidos nos pormenores 3 e 1 da Figura 2.21, incluídos no item 2.3.2 do Capítulo 2, sobre os modos de ruína gerais de um reforço deste tipo.



O aspecto geral da ruína de C.5 está ilustrado na fotografia da Figura 5.44 e no pormenor da Figura 5.45.

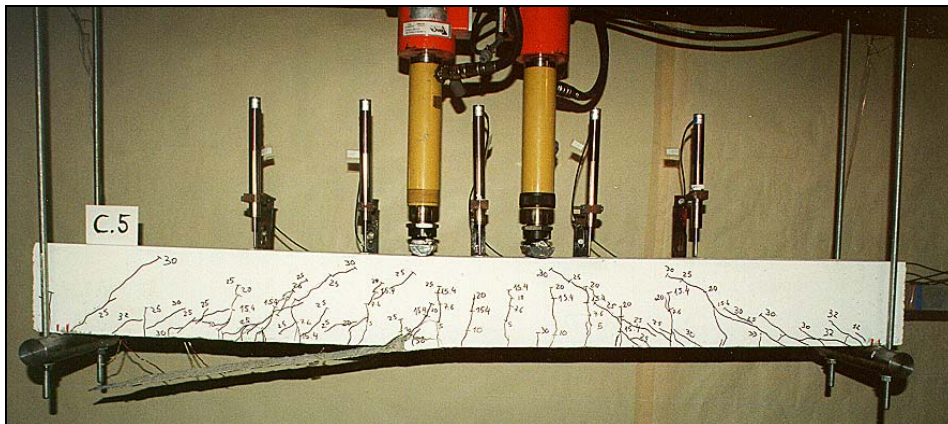


Figura 5.44 - Aspecto geral da ruína da viga C.5.

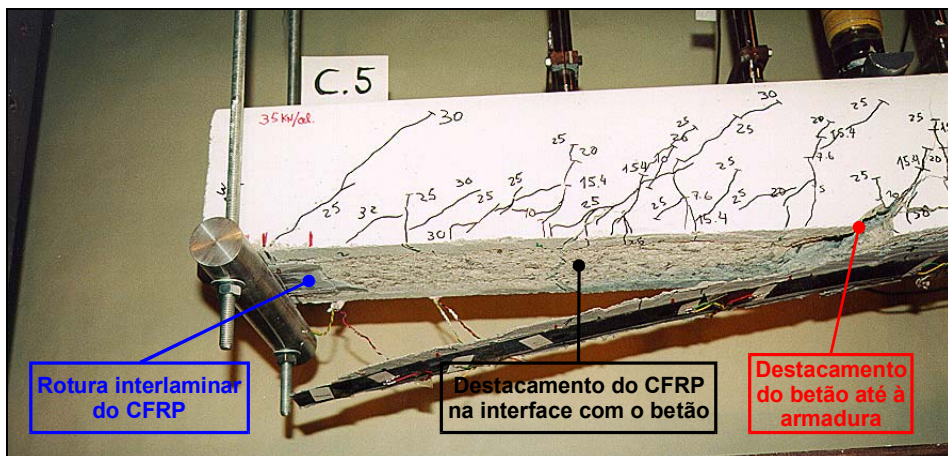
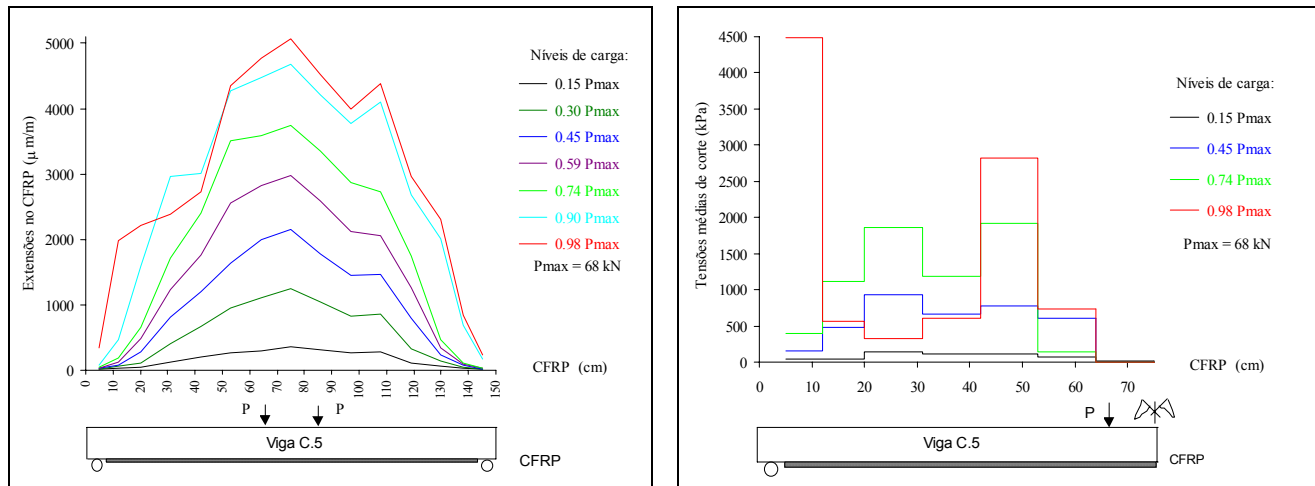


Figura 5.45 - Pormenor da zona de ruína.

Neste modelo, foi feita a aquisição dos valores da extensometria do laminado ao longo do ensaio, representando-se na Figura 5.46-a as curvas de variação respectivas, para vários níveis de carga, sendo um dos quais próximo da cedência da viga (curva a vermelho com  $0.98 P_{máx}$ ).

A distribuição das tensões médias de corte ao longo de metade do comprimento da interface betão-laminado está exposta na Figura 5.46-b, para os principais níveis de carga (desde 15% a 98% de  $P_{máx}$ ).



a) Extensões (C.5).

b) Tensões médias de corte (C.5).

Figura 5.46 - Diagrama de extensões e de tensões médias de corte ao longo de metade do comprimento do CFRP (viga C.5).

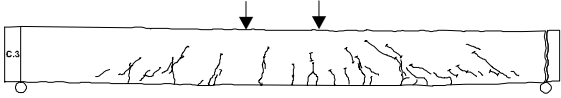
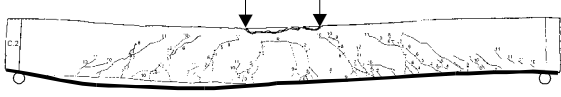
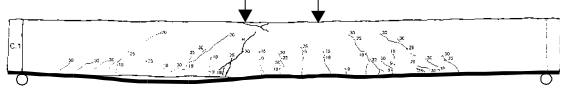
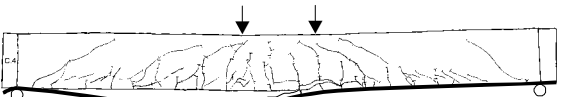
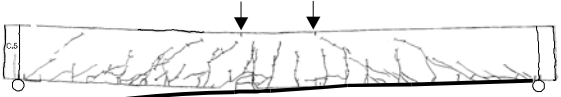
Da análise destas figuras, constata-se que a distribuição de forças transferidas do laminado para o betão tem uma forma irregular e apresenta o valor máximo na extremidade daquele. Isto deve-se à formação sucessiva de fendas de corte no adesivo e de destacamentos parciais na interface betão-adesivo, até surgir o modo de ruína prematuro já descrito.

Da série de vigas *tipo C*, é possível resumir os dados mais importantes dos ensaios de flexão na Tabela 5.4.

Na generalidade, o destacamento do laminado, observado em todos os modelos deste grupo de vigas *tipo*, foi antecipado devido à baixa qualidade do betão comprovada em Capítulos anteriores (item 3.3.1 e 4.2.1). A distribuição das tensões últimas de corte ao longo da interface betão-laminado de CFRP interveio na formação do modo de ruína, principalmente quando confrontado com o valor baixo da resistência de aderência da junta (condicionado pelo betão com  $f_{ctm,p} = 1$  a  $1.5$  MPa ou  $f_{ctm,j} = 1.6$  MPa, Tabela 4.4).

Concluiu-se que o laminado de reforço do modelo C.5 trabalhou aquém das suas capacidades, ou seja, apenas se mobilizou 26% da sua resistência. Após o destacamento do laminado (ruína prematura), todas as vigas apresentam um comportamento, até ao colapso, típico de estruturas de betão armado.

Tabela 5.4 - Resumo dos ensaios de flexão das vigas tipo C.

VIGA	$P_{m\acute{a}x}$ (kN) [i]	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm) [i]	CFRP [ii]		MODO DE RUÍNA [iii]
			$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	$\tau_{m\acute{a}x}$ [KPa]	
C.3	50	8.4	-	-	 cedência do betão no apoio
C.2 (1ª fase)	42.0	6.9	-	-	sem esquema
C.2 (3ª fase)	70.8	10.8	-	-	 esmagamento do betão + descolamento do CFRP
C.1	62.5	9.4	-	-	 fenda de corte + descolamento do CFRP
C.4	81.6	16.9	-	-	 descolamento do CFRP entre fendas de flexão
C.5	68.0	10.7	810	4340	 fenda de corte + descolamento do CFRP

[i] - Valores máximos da carga total e da flecha central medidos nas vigas com o reforço;

[ii] - Valores máximos das tensões de tracção no CFRP e de corte na interface betão-CFRP;

[iii] - Consultar o esquema dos modos de ruína nas tabelas incluídas no anexo C.

### 5.3 - FLEXÃO DE FAIXAS DE LAJE

De acordo com o âmbito do projecto de I & D da FEUP em consórcio com a Junta Autónoma das Estradas (J.A.E.) e na linha de orientação da primeira experiência realizada com o reforço de vigas de betão, nesta secção avalia-se a eficiência do reforço de modelos de três *séries de faixas de laje* com dois sistemas de CFRP unidireccional, o laminado pré-fabricado e a manta flexível e pré-impregnada.

Para este efeito, as faixas de laje de betão armado apresentam a dimensão média de  $8 \times 44 \times 180 \text{ cm}^3$  e identificam-se com as referências *tipo N*, *tipo R* e *tipo S*. Em seguida, expõe-se a análise comparativa do desempenho do modelo de referência (*tipo N*) com os modelos reforçados (*tipo R* e *tipo S*), submetendo-os a ensaios de flexão ilustrados nas Figuras 3.24 a 3.26 do Capítulo 3.

#### 5.3.1 - Introdução

Este ponto reporta-se, exclusivamente, à análise dos ensaios de flexão em quatro pontos realizados em modo estático para as três séries de lajes em estudo, os *tipos N, R* e *S*. Seleccionaram-se ensaios de flexão porque, para além de traduzirem a situação mais corrente das estruturas de betão na construção civil, proporcionam a formação de tensões de corte na interface betão/compósito devido, em parte, à variação do momento flector e, por outro lado, à introdução de esforços nas zonas de ancoragem dos reforços exteriores. Nos ensaios das séries reforçadas, evitou-se que as extremidades do CFRP se localizassem sob os apoios, para que permanecessem livres de qualquer efeito mecânico de ancoragem transversal do material (observe-se por exemplo a Figura 5.47 para o caso de um modelo *tipo R*). Por outro lado, estabelecem-se que essas extremidades permanecessem o mais próximo possível dos apoios, a menos de  $5 \text{ cm}$ , segundo o critério definido pela Homologação Nr. Z-36.12-29 (1997).

Cada série é ensaiada de acordo com o programa das tarefas definido no anexo A (Tabela A.1) e é descrita por item, incluindo toda a informação sobre os resultados experimentais e as respectivas conclusões. Lembra-se que a geometria, o tipo de carregamento e o tipo de instrumentação que intervêm em cada série e a caracterização dos parâmetros mecânicos dos materiais (betão, aço, compósito e adesivo) foram abordados no Capítulo 3.

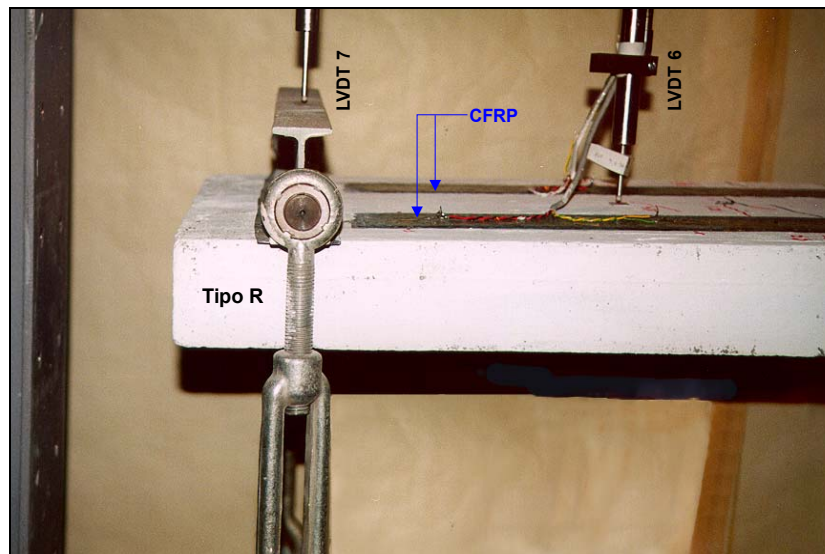


Figura 5.47 - Extremidade livre do compósito (manta ou laminado) junto ao apoio.

Para se efectuar uma análise comparativa mais directa das séries de laje, através dos diagramas de comportamento, considerou-se o efeito da variação de parâmetros, como a geometria e o tipo de betão dos modelos ensaiados. Deste modo, normalizaram-se os esforços (forças e momentos) com as expressões seguintes:

$$\text{i) Carga total normalizada} = \text{Carga total} / (b \times h \times f_{cm}) \quad [\text{Eq - 5.1}]$$

$$\text{ii) Momento normalizado} = (\text{Carga total} \times 0.5 \times 0.55) / (b \times d_s^2 \times f_{cm}) \quad [\text{Eq - 5.2}]$$

onde,

*Carga total* - soma das cargas registadas nas duas células (em *kN*);

*b* - largura média do modelo (em *metros*);

*h* - altura média do modelo (em *metros*);

*d<sub>s</sub>* - altura útil média de uma secção do modelo (em *metros*);

*f<sub>cm</sub>, f<sub>cm</sub>* - obtidos na Tabela 3.12 (item 3.3.1.2) para cada modelo (em *kPa*).



### 5.3.2 - Série tipo N

Os modelos apresentam um padrão de fendilhação homogéneo e próximo entre si, com formação das fendas bastante repartida. Na fase estabilizada, foi possível ler-se afastamentos médios entre fendas de  $s_{rm} = 6.8 \text{ cm}$  para *LB3N* e de  $s_{rm} = 6.2 \text{ cm}$  para *LB4N*. A ductilidade da estrutura está bem patente nos valores das flechas máximas obtidas para um valor próximo da capacidade resistente dos modelos, ou seja, na ordem de  $3.0 \text{ cm}$ .

O estado limite último dos modelos foi obtido. No modelo *LB3N* surge o colapso real da laje, por esgotamento da capacidade resistente da armadura de tracção, ou seja,  $6\phi6 \text{ mm}$ . No caso de *LB4N*, evitou-se a rotura do modelo uma vez que se atingiu a capacidade máxima e foi identificada a secção de cedência da laje.

Estes e outros aspectos podem ser observados nas fotografias apresentadas nas Figuras 5.48 a 5.50, para a laje *LB3N*, e nas Figuras 5.51 a 5.53, no caso do modelo *LB4N*. Informações correspondentes, nomeadamente, à distribuição de fendilhação, ao modo de ruína e a outros resultados dos ensaios efectuados sobre estes modelos, resumem-se nas Tabelas C.21 e C.22 incluídas no anexo C.

Nas Figuras 5.54 e 5.55, ilustram-se as respostas carga total normalizada vs deslocamento central (LVDT nº 4) e o momento normalizado vs curvatura central obtidos para os modelos desta série. As ordenadas dos diagramas foram normalizadas pelo critério descrito no item 5.3.1 (equações [Eq - 5.1] e [Eq - 5.2]).

As curvas apresentam um comportamento homogéneo das lajes ensaiadas, praticamente com a mesma capacidade resistente e semelhante deformação a meio vão. Na Figura 5.55 estão, também, representadas as rectas teóricas médias admitidas para os estados *I* e *II*, correspondendo a valores da rigidez à flexão de:

$$\begin{cases} (EI)_I = 998 \text{ (kN.m}^2\text{)} \\ (EI)_{II} = 139 \text{ (kN.m}^2\text{)} \end{cases}$$

O comportamento dos modelos ajusta-se à curva numérica prevista para as lajes de betão armado, tanto em serviço como em estado limite último, concretizado na forma dos diagramas de momento vs curvatura descritos na Figura 5.56. O critério de cálculo numérico dos modelos e a discussão dos resultados destes diagramas desenvolver-se-ão no Capítulo 6.

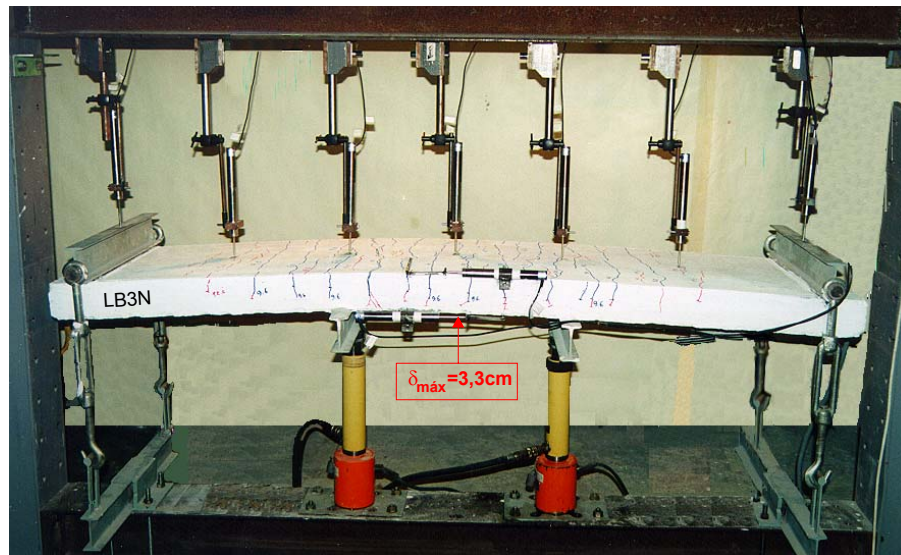


Figura 5.48 – Aspecto geral do ensaio de *LB3N* antes do colapso (carga total = 22.0 kN).

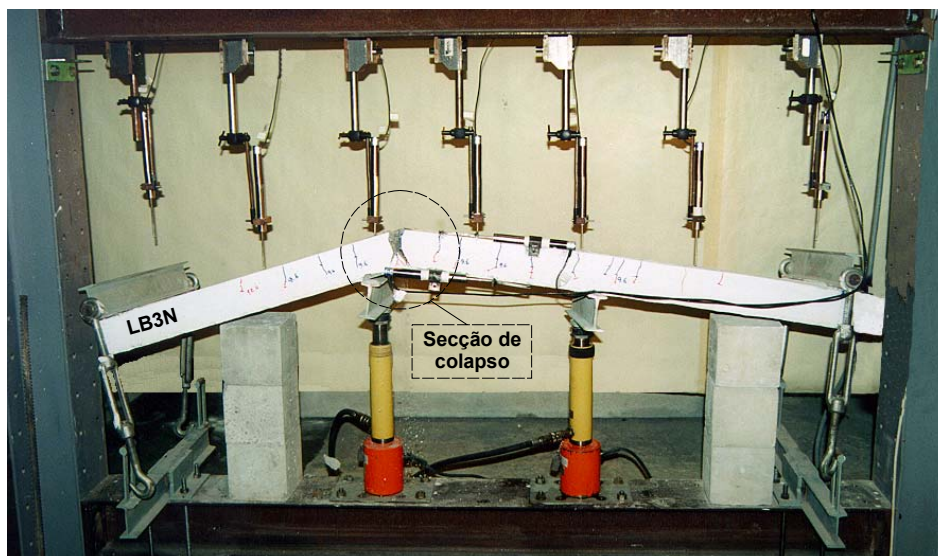


Figura 5.49 – Alçado da laje *LB3N* após o colapso.

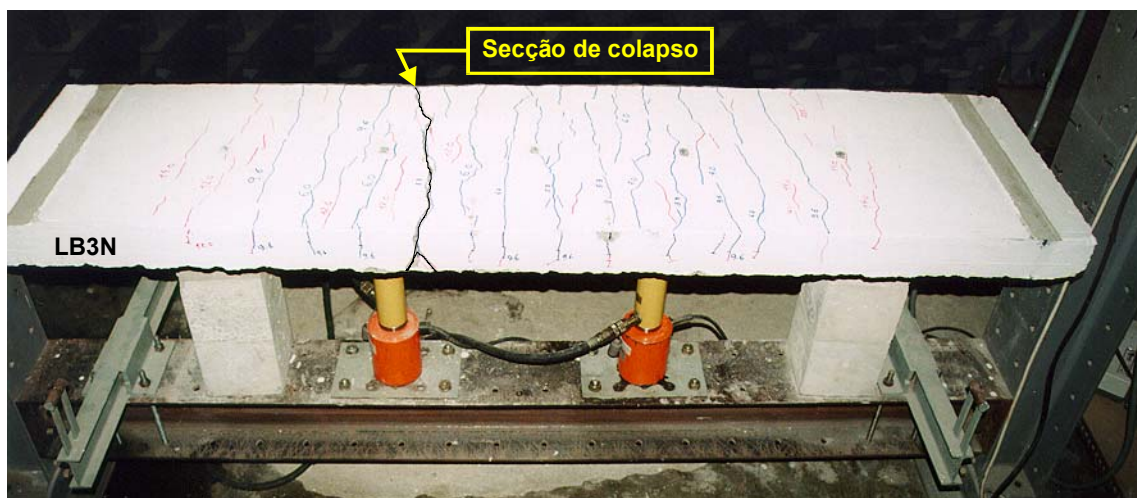


Figura 5.50 – Aspecto geral da fendilhação final na laje *LB3N*.

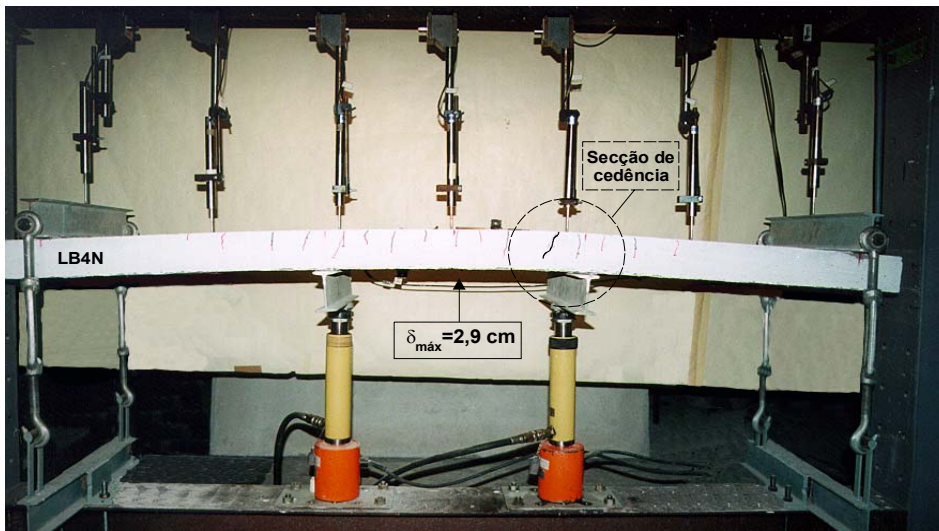


Figura 5.51 – Aspecto geral do ensaio de *LB4N* próximo da carga de colapso (carga total = 23.8 kN).

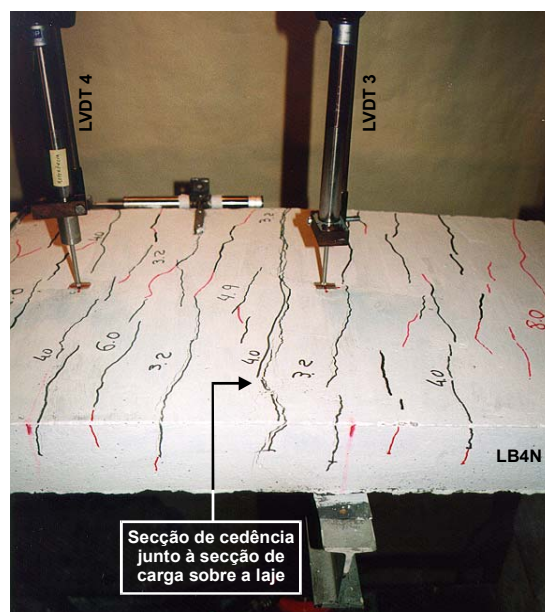


Figura 5.52 – Pormenor da secção de cedência que levará ao colapso de *LB4N* (carga total = 23.8 kN).

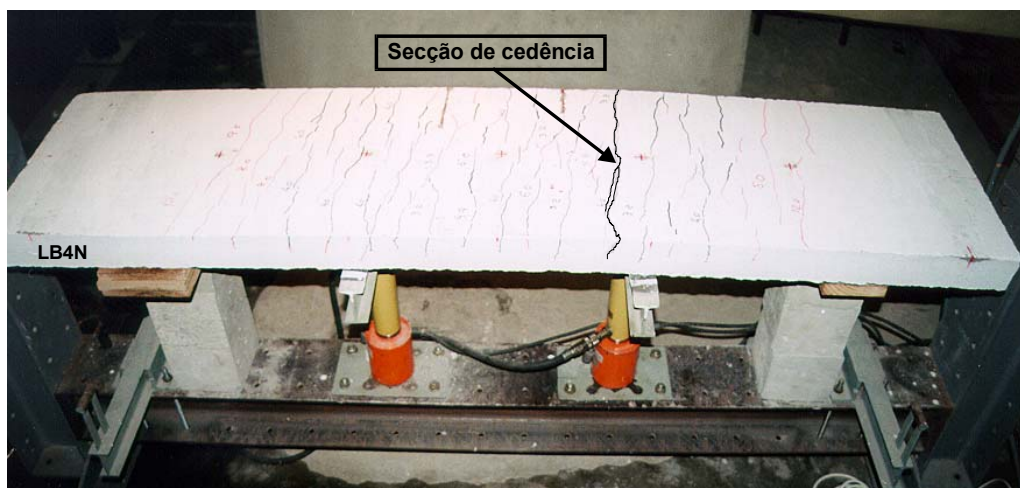


Figura 5.53 - Aspecto geral da fendilhação final do modelo *LB4N*.



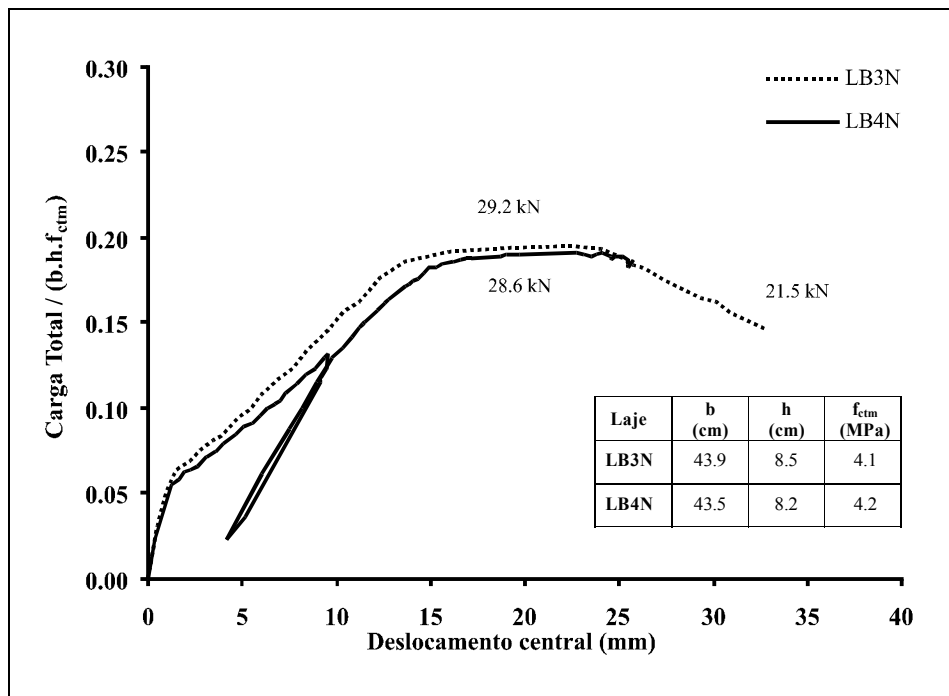


Figura 5.54 - Carga total normalizada vs deslocamento central da série N.

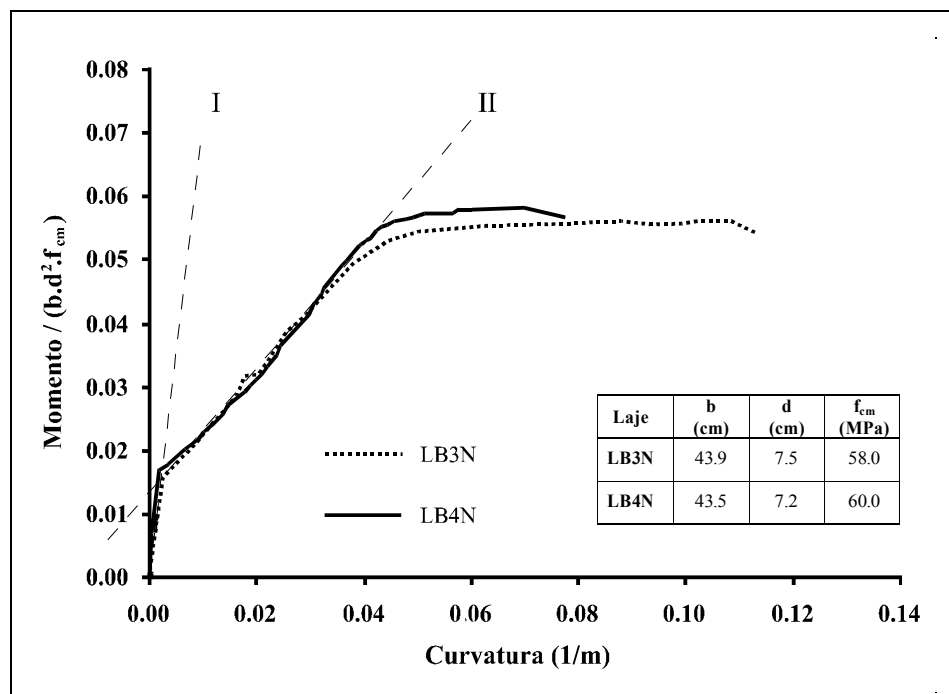


Figura 5.55 - Momento normalizado vs curvatura média no meio vão dos modelos da série N.

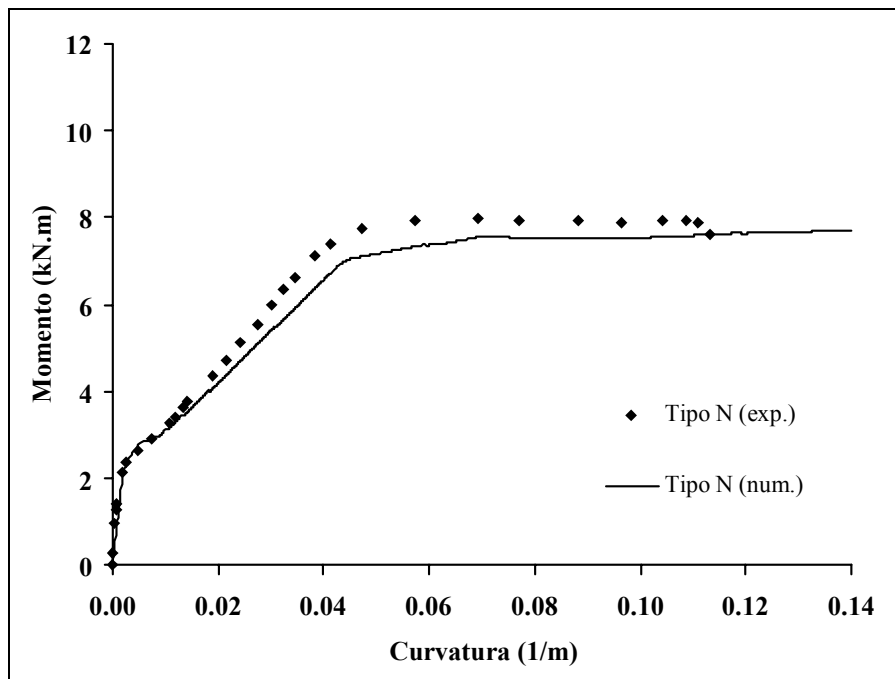


Figura 5.56 - Curvas experimental e numérica de momento vs curvatura média a meio vão (*série N*).

### 5.3.3 - Série tipo R

Os dois modelos que são objecto de análise desta série de lajes apresentam, na zona de flexão pura, uma distribuição inicial de fendas bastante semelhante. O afastamento entre fendas observado é de  $s_{rm} = 6.3 \text{ cm}$  e de  $s_{rm} = 6.4 \text{ cm}$  para as faixas *LC3R* e *LC4R*, respectivamente, como se ilustra na Figura 5.57 (caso de *LC3R*). No percurso do ensaio, o aumento de carga sobre os modelos provoca a subdivisão das fendas principais em outras de extensão menor junto às zonas de reforço, criando um padrão global de fendilhação bastante repartido.

Em termos de deformação, os modelos da *série R* chegam a atingir valores para a flecha central ( $\delta_{m\acute{a}x}$ ) na ordem dos  $3.7 \text{ cm}$  (caso de *LC3R*), quando a carga se aproxima do colapso. Esta deformação pode ser incrementada ligeiramente, no momento de ruína dos modelos.

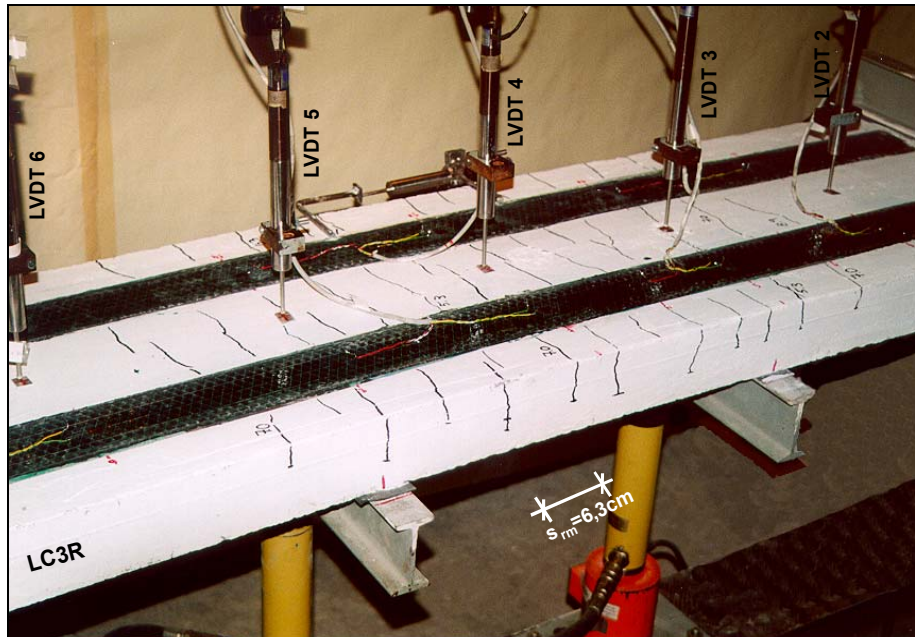


Figura 5.57 – Padrão de fendilhação em serviço (caso de *LC3R*).

O modo de ruína tipo desta série surgiu, quando se esgotou a capacidade das duas faixas da manta de CFRP, seguido do imediato destacamento destas, para um ou outro lado da secção de rotura. Estes efeitos manifestam-se de forma brusca e instantânea, como se verificou no modelo *LC4R*, por meio da ruína simultânea das duas faixas de CFRP, e no modelo *LC3R*, através de algum desfasamento de efeitos entre as duas faixas de CFRP (ruína da primeira e, depois, destacamento da segunda).

Os principais aspectos do comportamento dos modelos da *série R*, descritos neste texto, podem ser encontrados na análise cuidada da sequência de fotografias representadas nas Figuras 5.58 a 5.61, para a laje *LC3R*, e nas Figuras 5.62 a 5.64, para a laje *LC4R*. Nestas imagens, apresentam-se os alçados com as curvaturas dos modelos próximos da carga de cedência, o aspecto geral dos modos de ruína dos modelos e alguns pormenores da secção de rotura do CFRP. Por comparação das Figuras 5.61 e 5.64, deduz-se que a secção de ruína do CFRP surgiu no vão de esforço transverso para o caso de *LC3R* (na faixa 1) e na zona de momento máximo, no modelo *LC4R* (nas faixas 1 e 2). O efeito brusco da rotura de uma das faixas de CFRP na laje *LC3R* pode ter provocado o destacamento sem ruína de *93 cm* da outra faixa. Entretanto, o padrão de fendilhação instalado nas lajes permitiu, sem fendilhação do betão, a formação de comprimentos de ancoragem de  $\ell_t = 17.5 \text{ cm}$  a  $\ell_t = 18.5 \text{ cm}$  no CFRP do modelo *LC3R* e de  $\ell_t = 17.5 \text{ cm}$  a  $\ell_t = 24.5 \text{ cm}$  no equivalente da laje *LC4R*.

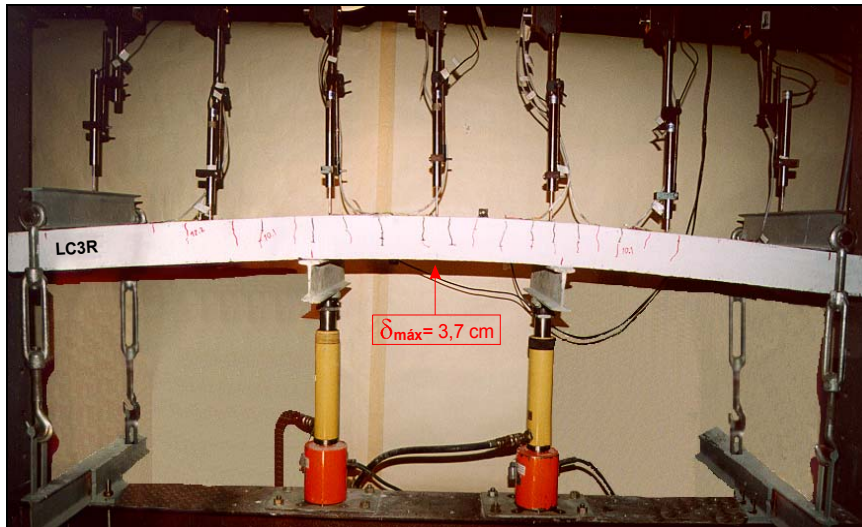


Figura 5.58 – Aspecto geral do ensaio de *LC3R* antes do colapso (carga total = 38.5 kN).

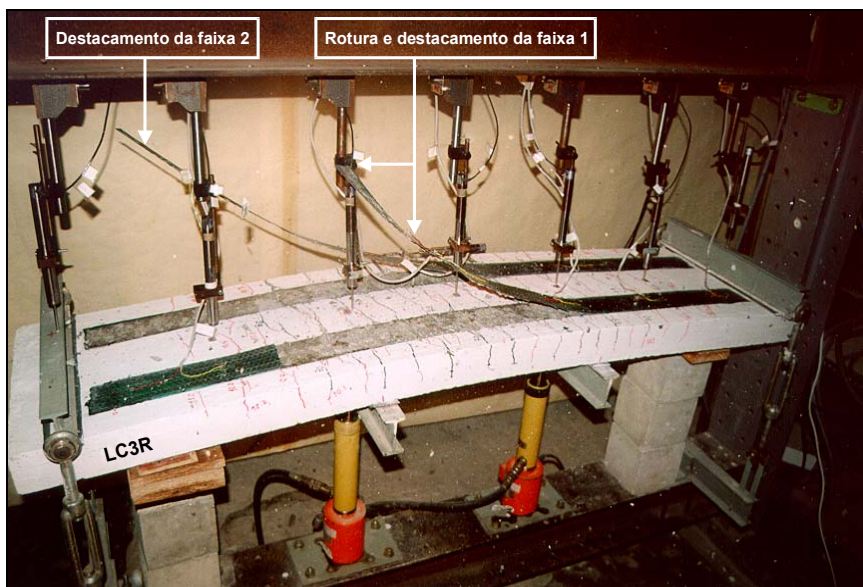


Figura 5.59 – Aspecto geral do instante de ruína/destacamento do CFRP (*LC3R*).

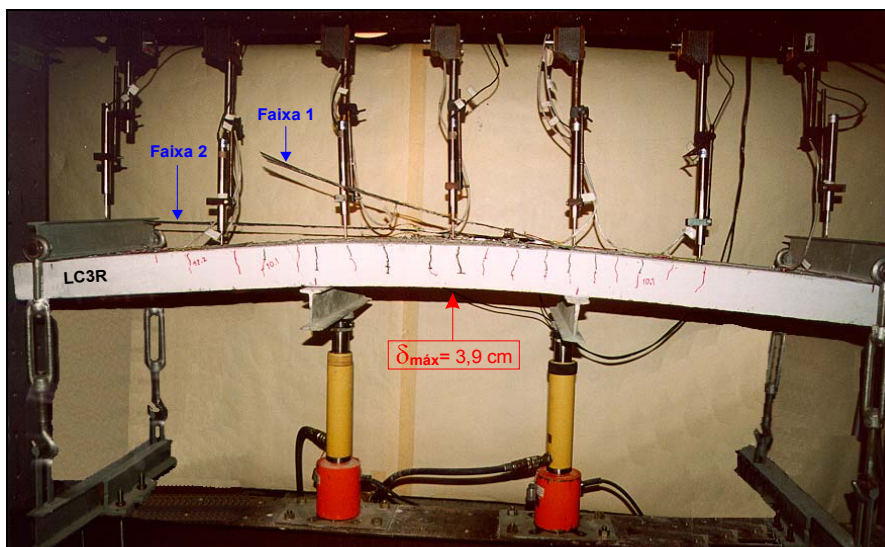


Figura 5.60 – Alçado de *LC3R* após o colapso do CFRP.



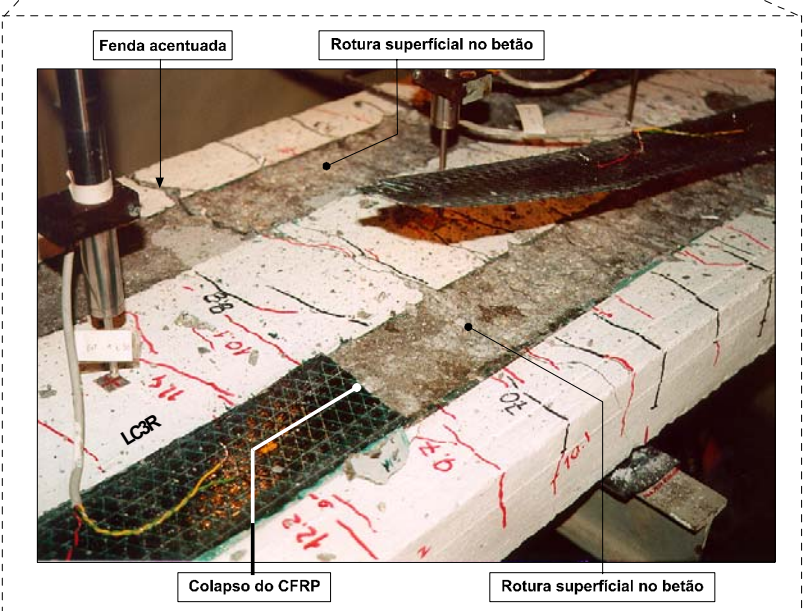
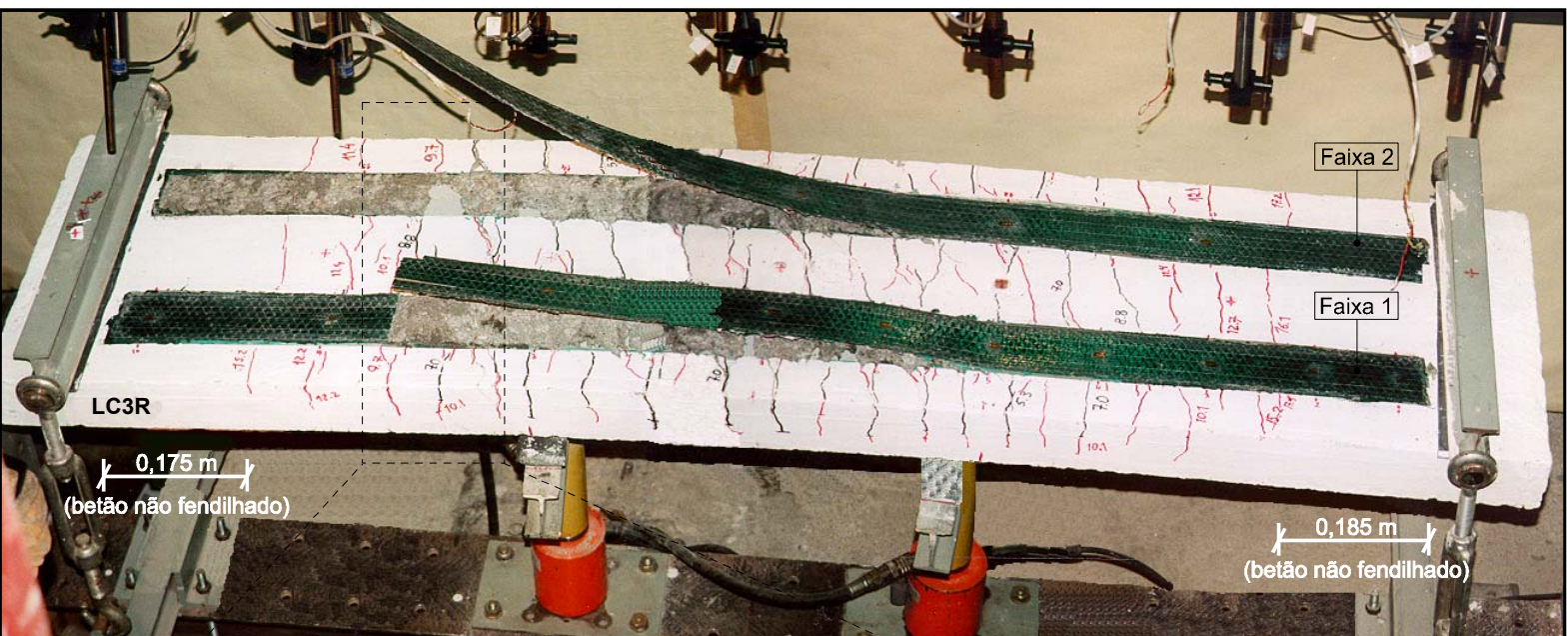


Figura 5.61 – Aspecto geral da laje LC3R após o ensaio (vista e pormenor).



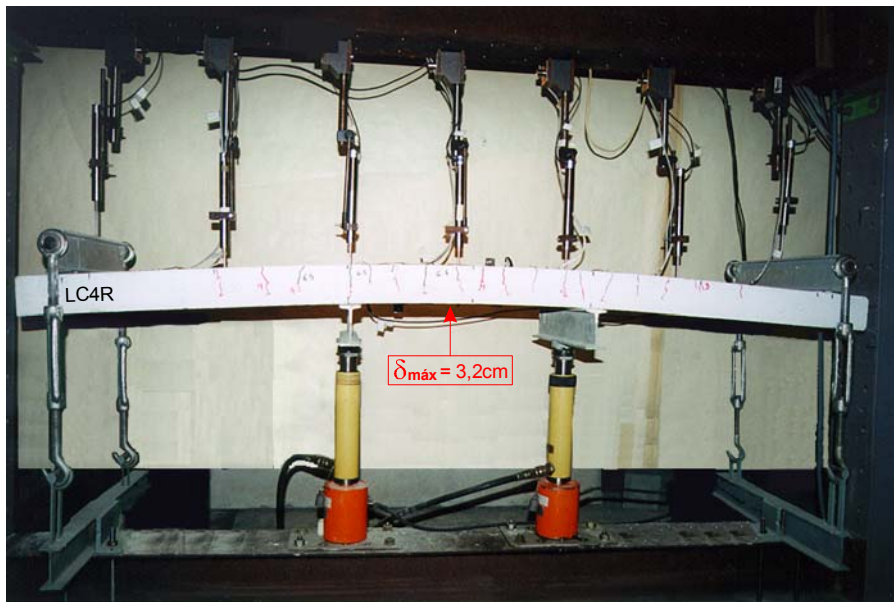


Figura 5.62 – Alçado da laje *LC4R* próximo da carga de ruína do CFRP (carga total = 32.3 kN).

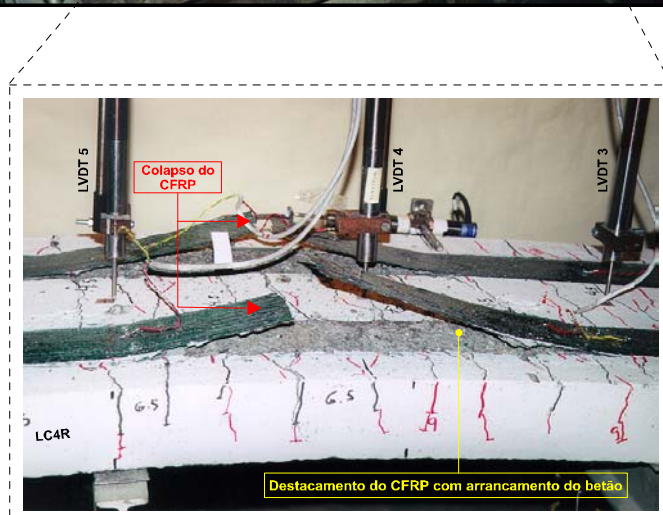
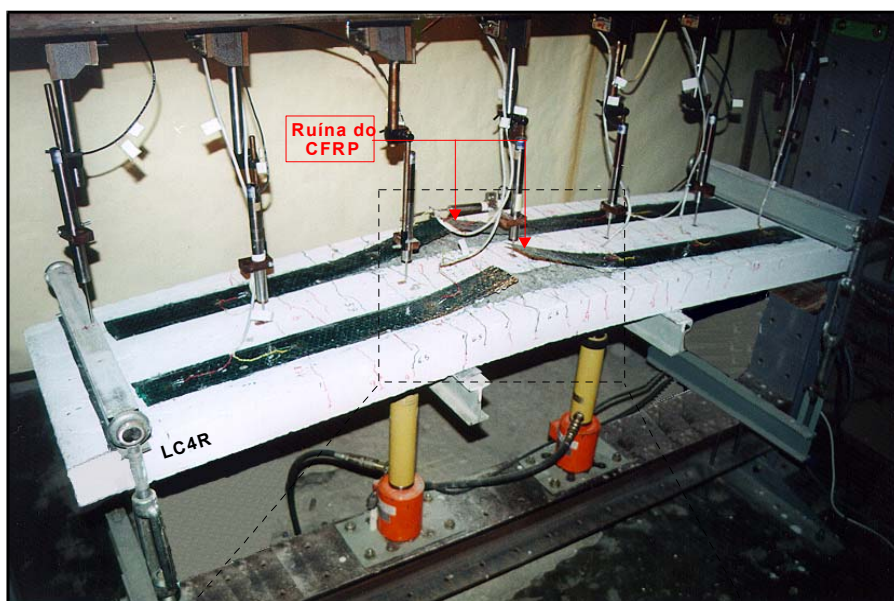


Figura 5.63 – Aspecto geral da laje *LC4R* após a ruína do CFRP.

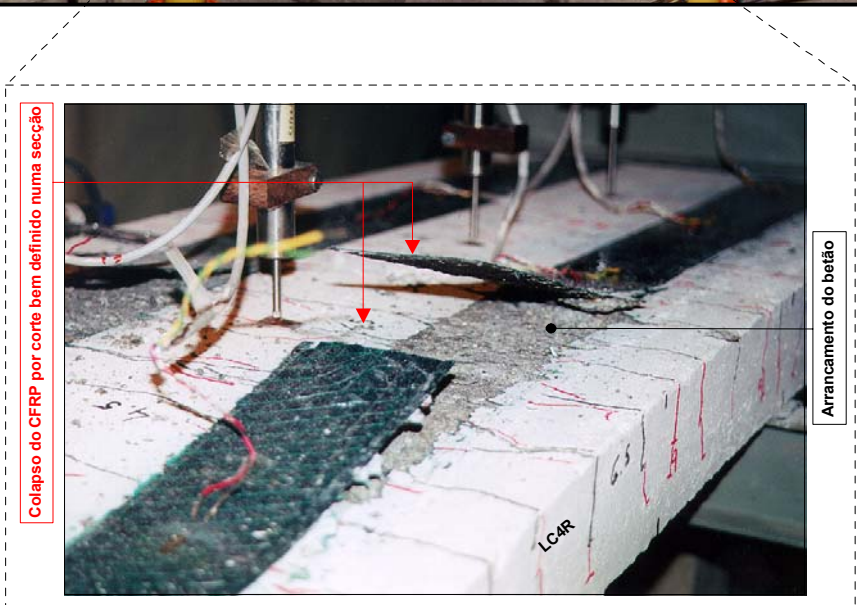
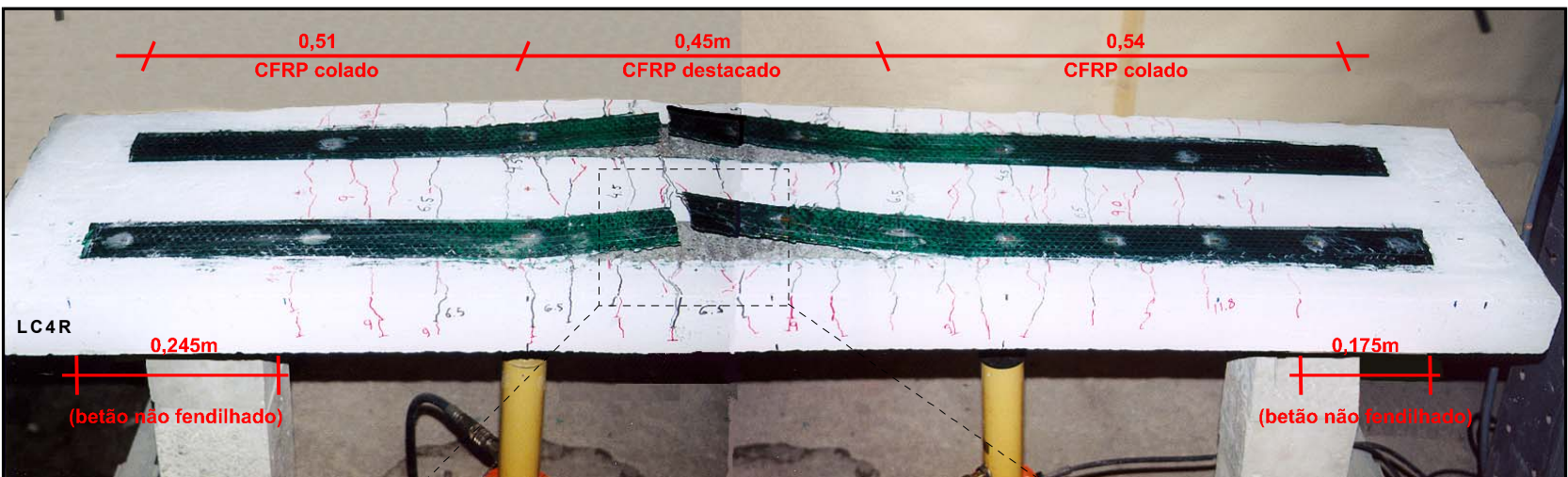


Figura 5.64 – Aspecto geral da laje LC4R após o ensaio (vista e pormenor).

Os principais resultados experimentais obtidos para os dois modelos desta série estão descritos nas Tabelas C.23 e C.24 do anexo C, sobretudo, o padrão de fendilhação, o modo de ruína e os valores críticos da deformação e das tensões nas lajes e no compósito.

As Figuras 5.65 e 5.66 apresentam as curvas carga total *vs* deslocamento central (LVDT nº4) e o momento *vs* curvatura central, obtidas no ensaio de flexão das lajes LC3R e LC4R. As ordenadas dos diagramas, correspondentes aos esforços, foram normalizadas pelo critério descrito no item 5.3.1 (Eq-5.1 e Eq-5.2), de modo a permitir uma análise comparativa mais directa entre os modelos ensaiados. As duas lajes impõem um andamento semelhante aos diagramas, iniciando-se a fendilhação para a carga total média de  $P_{fend} = 10.2 \text{ kN}$  (ordenada 0.07) e atingindo-se a capacidade resistente máxima de  $P_{máx} = 39 \text{ kN}$  (ordenada 0.26), apesar do menor valor obtido no modelo LC4R.

Na Figura 5.66 representam-se, igualmente, as rectas teóricas médias admitidas para os estados I, II e III e cujos valores médios da rigidez à flexão são os seguintes:

$$\begin{cases} (EI)_I = 760 \text{ (kN.m}^2\text{)} \\ (EI)_{II} = 89 \text{ (kN.m}^2\text{)} \\ (EI)_{III} = 42 \text{ (kN.m}^2\text{)} \end{cases}$$

A Figura 5.67 expõe o comportamento da *série R* através da representação, em termos médios, das curvas momento *vs* curvaturas obtidas experimentalmente e previstas de forma numérica (modelo de cálculo definido no Capítulo 6). As curvas ajustam-se perfeitamente, entre si, em serviço e em estado limite último e a sua análise discutir-se-á no próximo Capítulo.

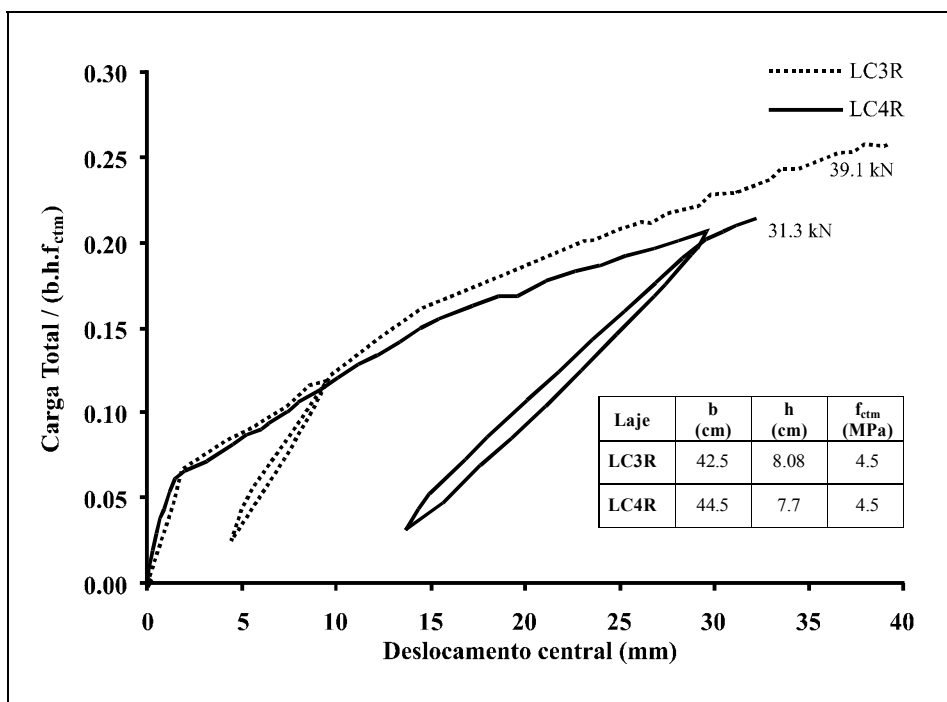


Figura 5.65 – Carga total normalizada *vs* deslocamento central da *série R*.

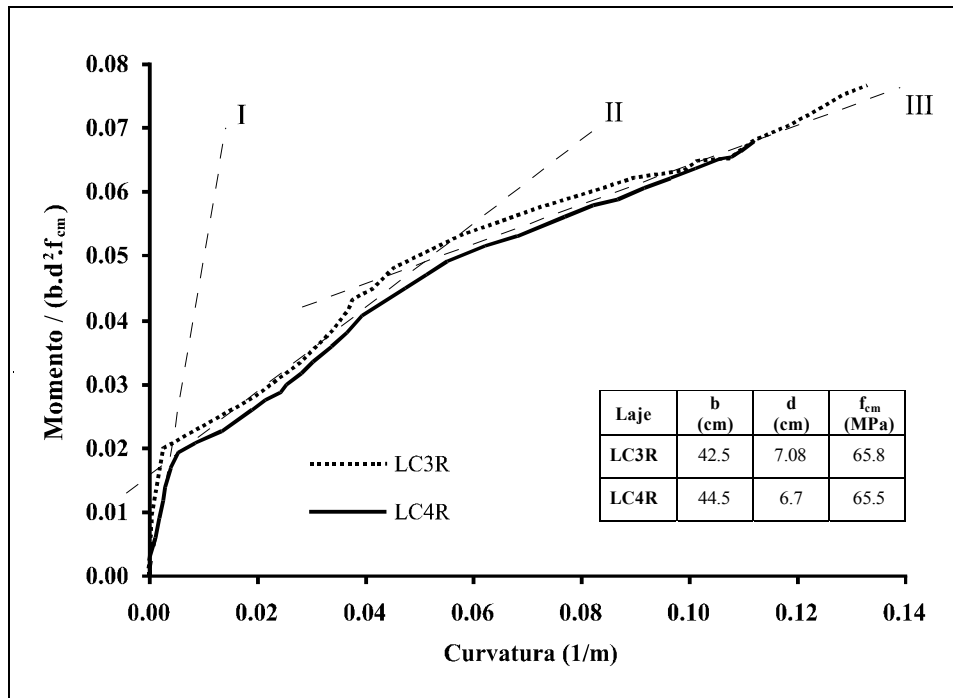


Figura 5.66 – Momento normalizado vs curvatura média no meio vão da série R.

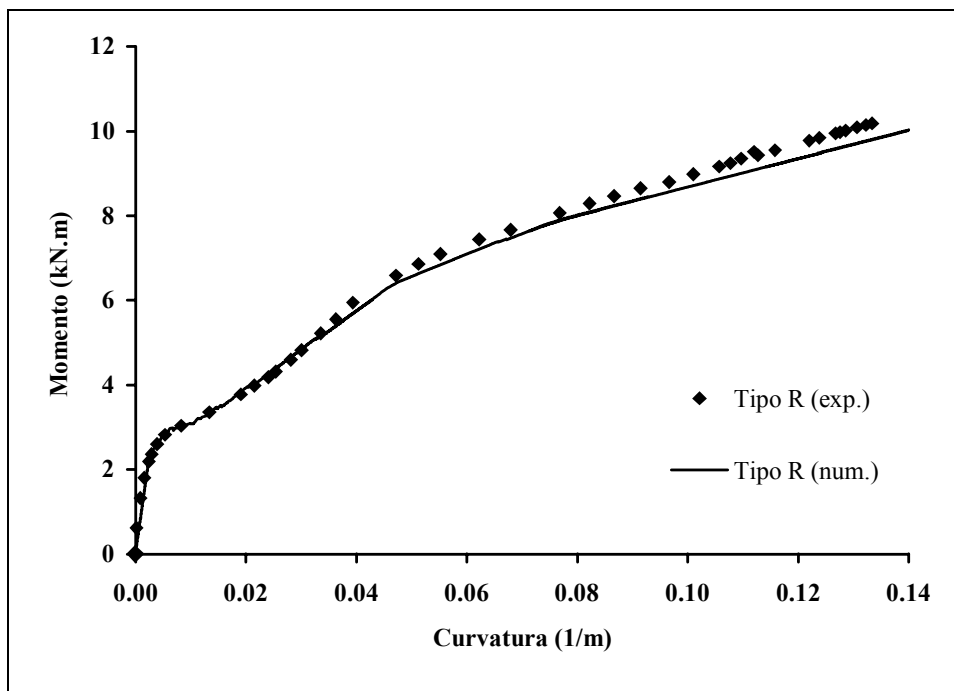


Figura 5.67 – Curvas médias experimental e numérica para o momento vs curvatura da série R.

O desempenho do compósito de CFRP apresenta-se nas Figuras 5.68-a e 5.68-c pela distribuição das curvas das extensões na manta (só a faixa 1) ao longo de metade do seu comprimento, para vários níveis de carga e para os modelos *LC3R* e *LC4R*. A distribuição das tensões médias de corte (aderência), ao longo do mesmo comprimento da interface betão-CFRP (só faixa 1), está exposta nas Figuras 5.68-b e 5.68-d, para os mesmos níveis de carga e modelos em análise. A Tabela 5.5 resume as principais informações a reter sobre o compósito e a interface. Apresenta os

valores das tensões normais e rendimentos máximos registados no primeiro, bem como os valores médios máximos obtidos para as tensões de corte no segundo e confrontados com os valores médios da tensão de aderência do betão, determinados na secção 4.2 (Tabela 4.6). Sem prejuízo dos dados observados na faixa 2 (CFRP) da laje *LC4R*, é possível salientar os aspectos seguintes:

- i) o sistema *Replark* trabalhou acima de 70% da sua capacidade, atingindo o seu valor máximo (100%) no instante da rotura de três das faixas já referidas anteriormente, medindo-se deformações na manta de cerca de  $\varepsilon_{máx} \cong 3.2 \varepsilon_{sy}$  e de  $\varepsilon_{máx} \cong 1.28 \varepsilon_{Lud}$ ;
- ii) o valor máximo de 1.8 MPa (em termos médios) obtido para a tensão de corte na interface é inferior à capacidade de aderência do betão, que é da ordem de 3.6 MPa, evitando assim o destacamento prematuro do reforço;
- iii) apesar de, em termos gerais, a força máxima no compósito ser superior ao valor característico previsto pelo cociente  $[Eq-2.2]/0.75$  (Rostásy, 1998) para a zona de ancoragem de uma extremidade livre, só num caso se observou o destacamento da manta (laje *LC3R*).

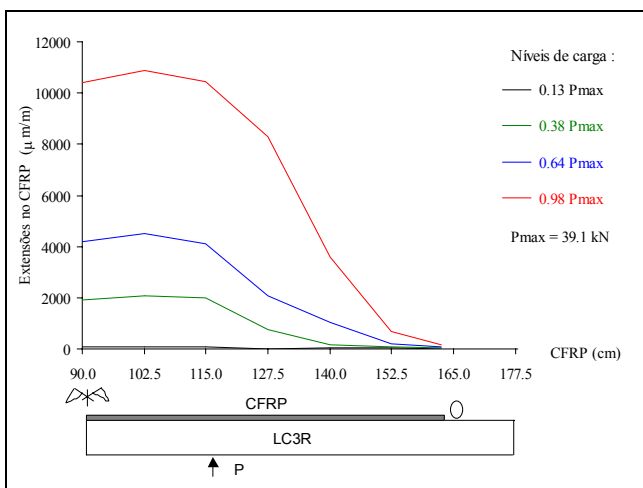
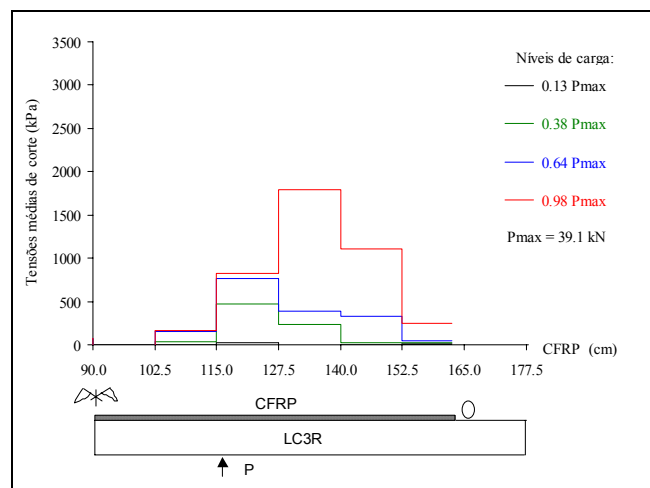
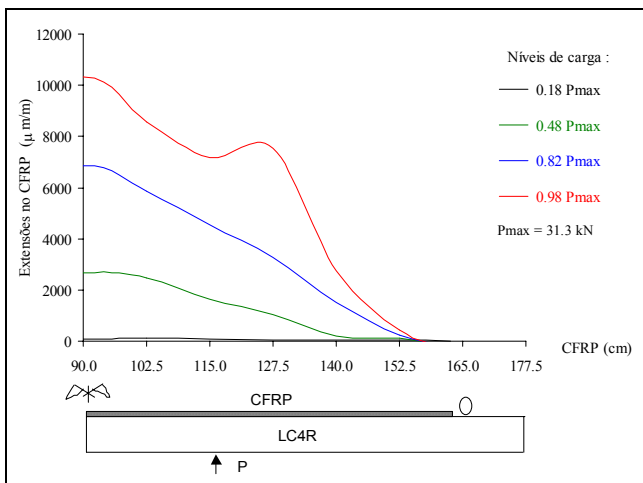
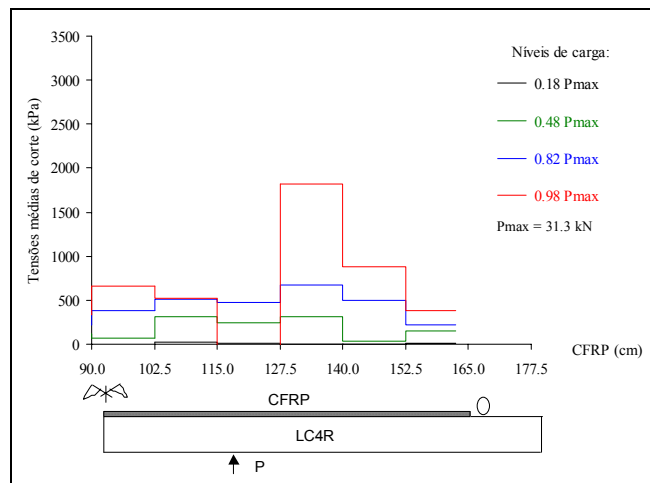
a) Extensão (*LC3R*).b) Tensões médias de corte (*LC3R*).c) Extensão (*LC4R*).d) Tensões médias de corte (*LC4R*).

Figura 5.68 – Extensão e tensão médias de corte ao longo de metade do comprimento do CFRP (faixa 1).

Tabela 5.5 – Dados sobre o compósito CFRP e a interface com o betão (*série R*).

Laje		$\varepsilon_{máx}$ (‰)	$\varepsilon_{máx,m}$ (‰)	$\sigma_{máx}$ [i] (MPa)	$\sigma_{máx}/\sigma_u$ (%) [ii]	$F_{máx}$ [i] (kN)	$F_{máx,m}$ (kN)	$T_{m, máx}$ [iii] (kPa)	$\tau_{máx}$ [i] (kPa)	$\tau_{bm}$ [iv] (kPa)
LC3R	faixa 1	10.883	10.2	2503	73.6	38.9	36.6	32.56 (52.8)	1803	3500 - 3700 (4200)
	faixa 2	10.922		2512	73.9	39.0			1031 (*)	
LC4R	faixa 1	10.300		2369	69.7	36.8			1819	
	faixa 2	8.800		2024	59.5	31.5			834 (*)	

[i] - Calculado de acordo com a equações [Eq-3.34] a [Eq-3.36] estabelecidas no item 3.4;

[ii] - Tensão  $\sigma_u = f_{Lu}$  estipulada no item 3.3.3.2;

[iii] - Valor característico determinado pelo cociente  $[Eq-2.2]/0.75$  e  $(valor) = f_{Lu} \times \text{Área}_{CFRP} = \text{capacidade do CFRP/faixa}$ ;

[iv] - Valores de aderência  $\tau_{bm}$  obtidos nos ensaios de "pull-off" e  $(valor) = f_{ctm,j}$  (consultar Tabela 4.6);

(\*) - Nesta faixa os extensómetros estão afastados, entre si, do dobro dos da faixa 1.

### 5.3.4 - Série tipo S

A série reforçada com tiras de laminado *CarboDur*, igualmente constituída por dois modelos *LC1S* e *LC2S*, principiou a fendilhação com a carga total média de  $P_{fend} = 10.7 \text{ kN}$ . A distribuição inicial das fendas principais na zona de flexão pura ficou, praticamente, concluída próximo da carga total de  $16 \text{ kN}$ , observando-se um afastamento médio entre fendas de  $s_{rm} = 6.4 \text{ cm}$  no primeiro (Figura 5.69) e  $s_{rm} = 6.3 \text{ cm}$  no segundo modelo. Com o prosseguimento do ensaio de flexão, várias fendas se formam, algumas nos vãos de corte e outras devido à subdivisão das fendas principais existentes junto às áreas de colagem do CFRP. Como se pode observar na Figura 5.70 (laje *LC1S* para a força total de  $34 \text{ kN}$ ), nesta altura a superfície dos modelos apresenta um padrão de fendilhação complexo, comparando com o do estado anterior demonstrado na Figura 5.69.

Ao surgirem pequenos ruídos crepitantes, a simples visão dos reforços da *série S*, nesta fase, permite detectar a fendilhação do adesivo no desenvolvimento das fendas principais do modelo, localizadas junto às secções de aplicação das cargas com os macacos hidráulicos. A abertura progressiva das fendas, com o aumento de carga, induz destacamentos parciais intercalados do laminado, entre fendas consecutivas localizadas na zona de esforços máximos de flexão. Estes destacamentos antecipados podem resultar do corte do betão entre fendas (observar Figura 5.71), da ruína interlaminar ou do descolamento da interface adesivo - CFRP.

Estas observações vêm reforçar algumas das conclusões, sobre o comportamento de estruturas de betão reforçadas com laminados de CFRP, descritas no trabalho experimental anterior sobre vigas de betão.





Figura 5.69 – Distribuição inicial da fendilhação na laje *LC1S* (carga total  $\cong 16$  kN).

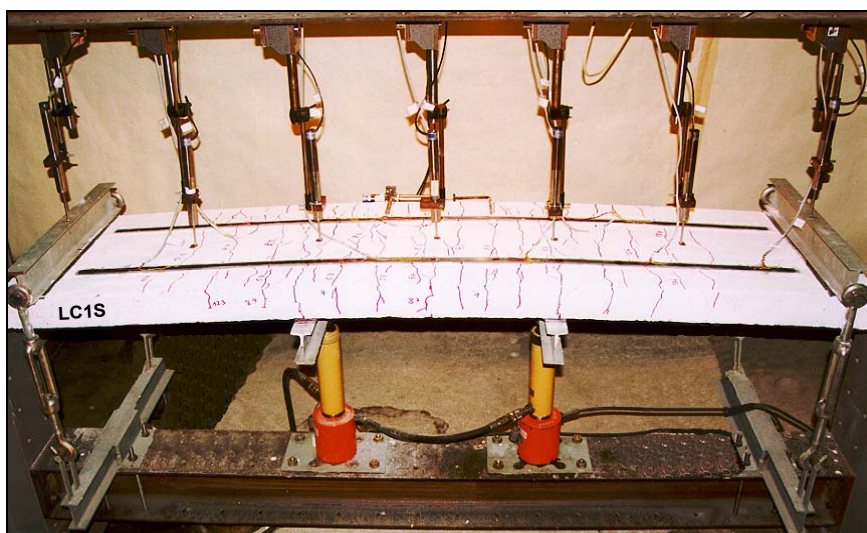


Figura 5.70 – Aspecto geral do padrão de fendilhação estabilizado no modelo *LC1S* (carga total  $\cong 34$  kN).

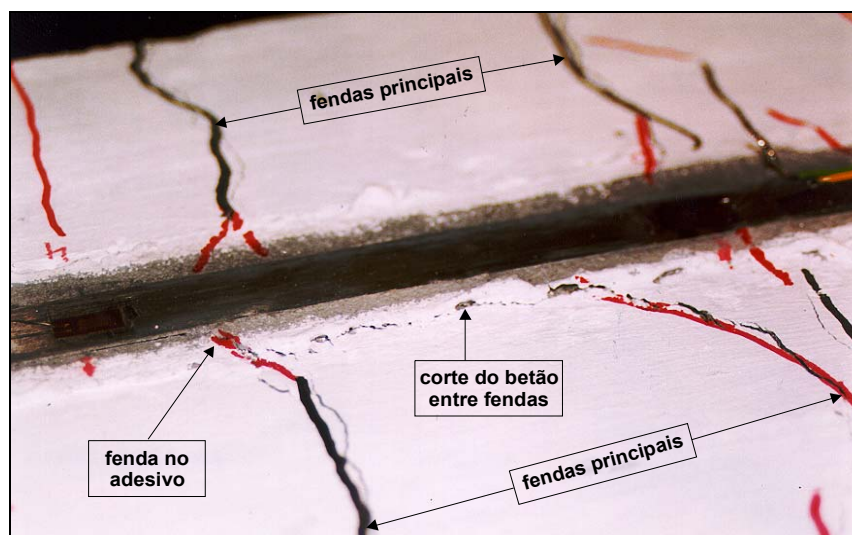


Figura 5.71 – Pormenor da fendilhação do adesivo e do corte do betão entre fendas (carga total  $\cong 36$  kN).

Sendo assim, os ensaios dos dois modelos desta série terminam, após a ocorrência do modo de ruína tipo, isto é, uma vez observado o destacamento extenso das duas tiras de CFRP do betão, sem rotura do compósito. Este modo é prematuro, na medida em que existe um sub-aproveitamento do laminado, surgindo de forma brusca e instantânea, apesar de precedido por sons específicos de rotura do adesivo e de ruína interlaminar do CFRP. O destacamento iniciou-se na zona central da laje, por roturas múltiplas entre fendas já referidas e culmina com o aspecto visual aparatoso do arrancamento final da extremidade do laminado juntamente com o troço central liberto do betão.

As fotografias dos principais aspectos do comportamento dos modelos *LC1S* e *LC2S* ilustram-se, respectivamente, na sequência das Figuras 5.72 a 5.74 e 5.75 a 5.77. Os modelos são apresentados pelos alçados, com as deformações próximas da cedência do compósito e pelos registos do instante e do aspecto final do destacamento prematuro das tiras (faixas 1 e 2) do CFRP.

Numa observação mais detalhada das superfícies de ruína do compósito, constatou-se a formação de ruínas múltiplas do tipo (consultar item 2.3.2 também):

*I* – ruína interlaminar do CFRP;

*II* – descolamento na interface adesivo - CFRP;

*III* – corte e/ou destacamento superficial do betão;

*IV* – arrancamento do betão.

Estes dados estão indicados nos esquemas em planta da face traccionada da laje e nas fotografias de pormenor das Figuras 5.78 e 5.79, referentes aos modelos em estudo.

Convém sublinhar que no final do ensaio, o laminado destacou-se do betão ao longo de 75% do comprimento de reforço e o principal efeito foi a ruína por corte no betão. A causa é, naturalmente, consequência do efeito da concentração de tensões de corte na interface betão-adesivo, proporcionando valores superiores à capacidade resistente à tracção deste último.



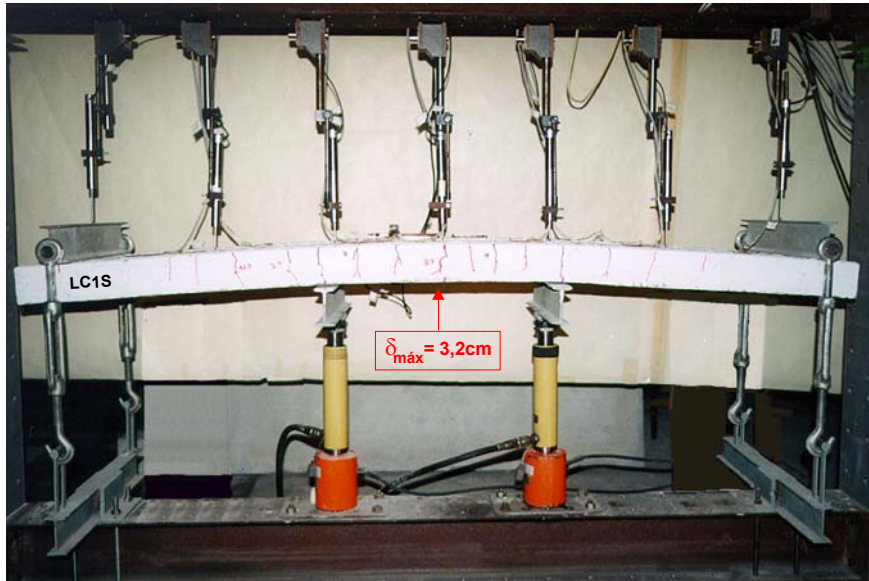


Figura 5.72 – Alçada da laje *LC1S* próxima da capacidade máxima (carga total = 34.13 kN).

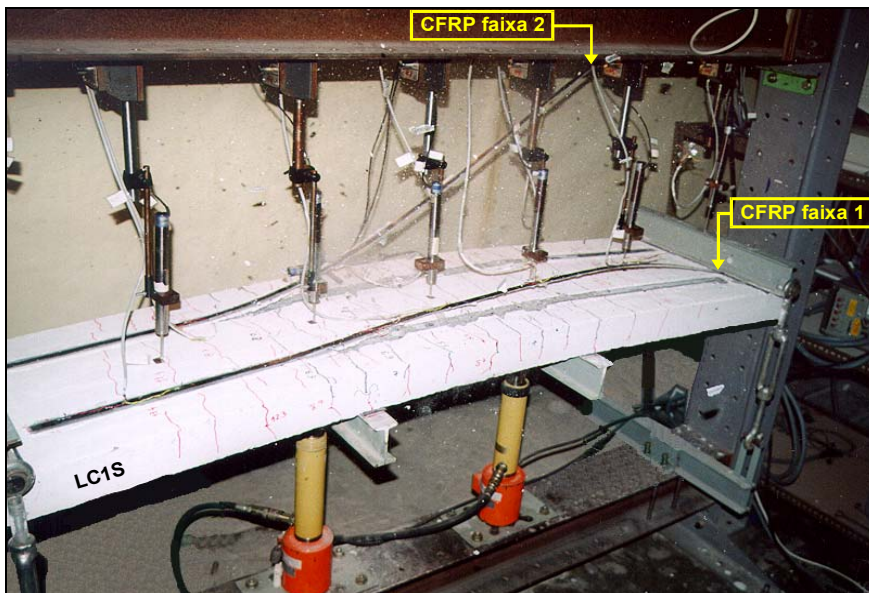


Figura 5.73 – Aspecto geral do momento de destacamento dos laminados em *LC1S* (carga total = 32.9 kN).

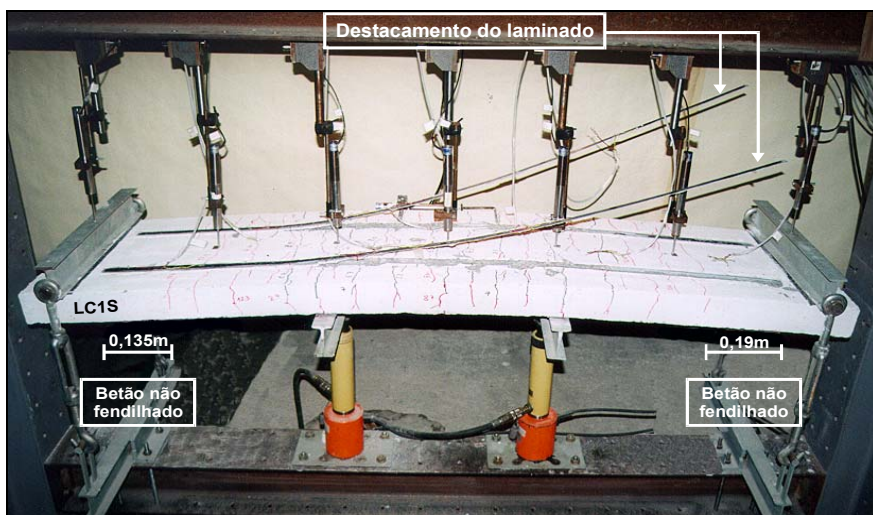


Figura 5.74 – Aspecto geral de *LC1S* já sem o efeito do reforço.



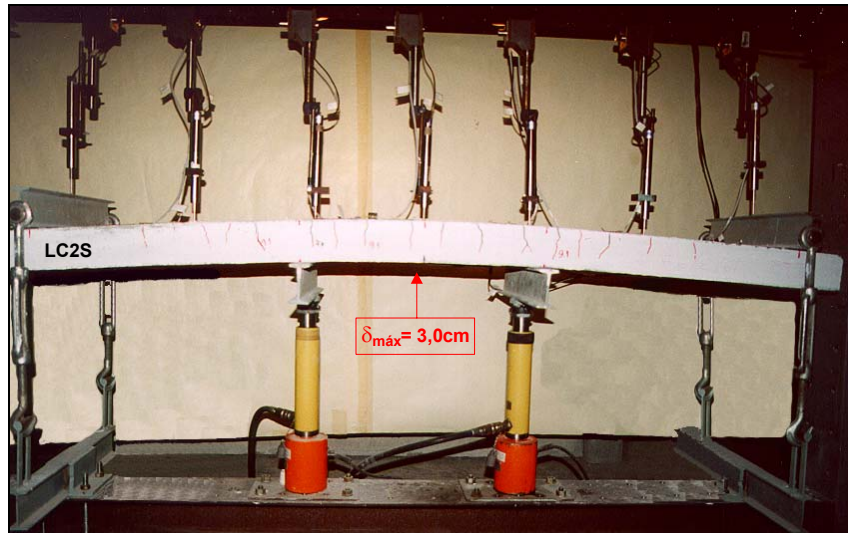


Figura 5.75 – Alçado da laje *LC2S* próximo da sua capacidade máxima (carga total = 36.0 kN).

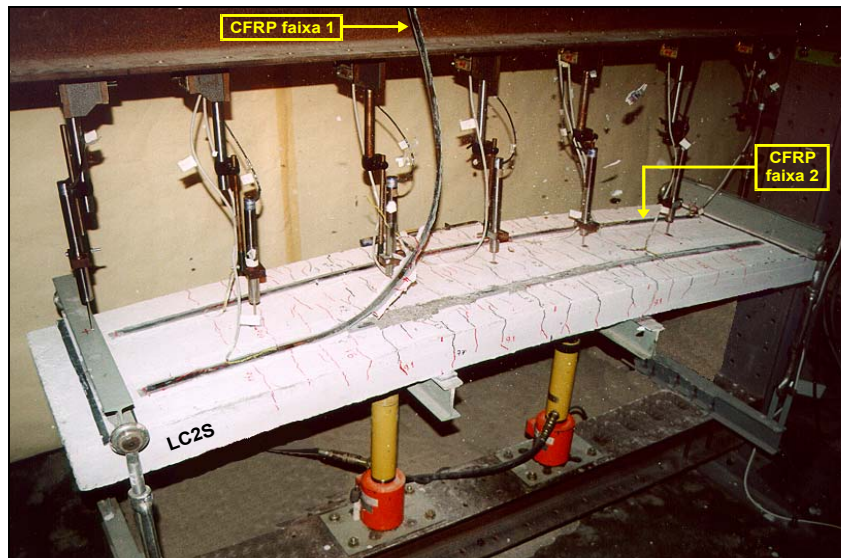


Figura 5.76 – Aspecto geral de *LC2S* no momento de ruína do CFRP (carga total = 37.7 kN).

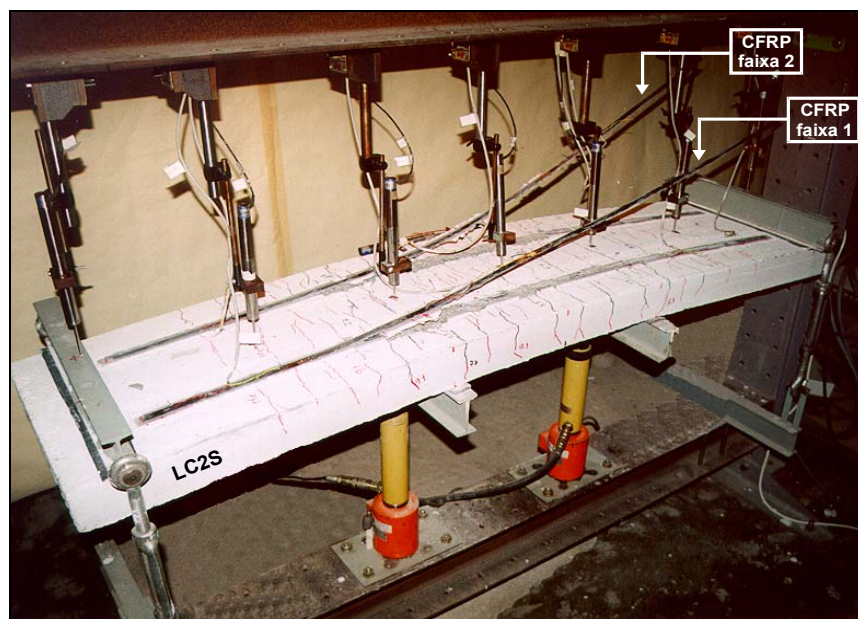


Figura 5.77 – Aspecto final de *LC2S* com os laminados destacados da laje.

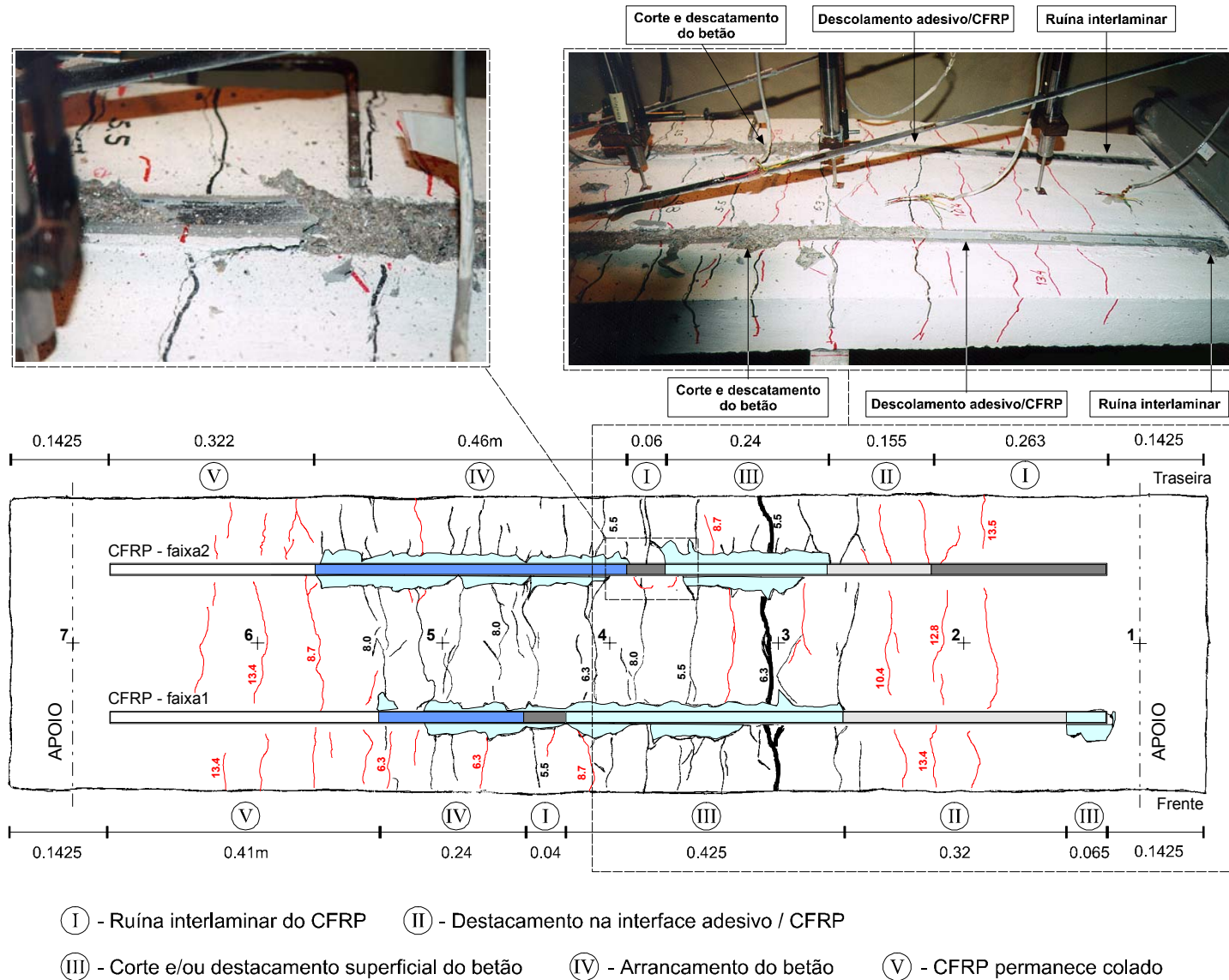


Figura 5.78 – Ruína do laminado de CFRP na laje LCIS (planta e pormenores).

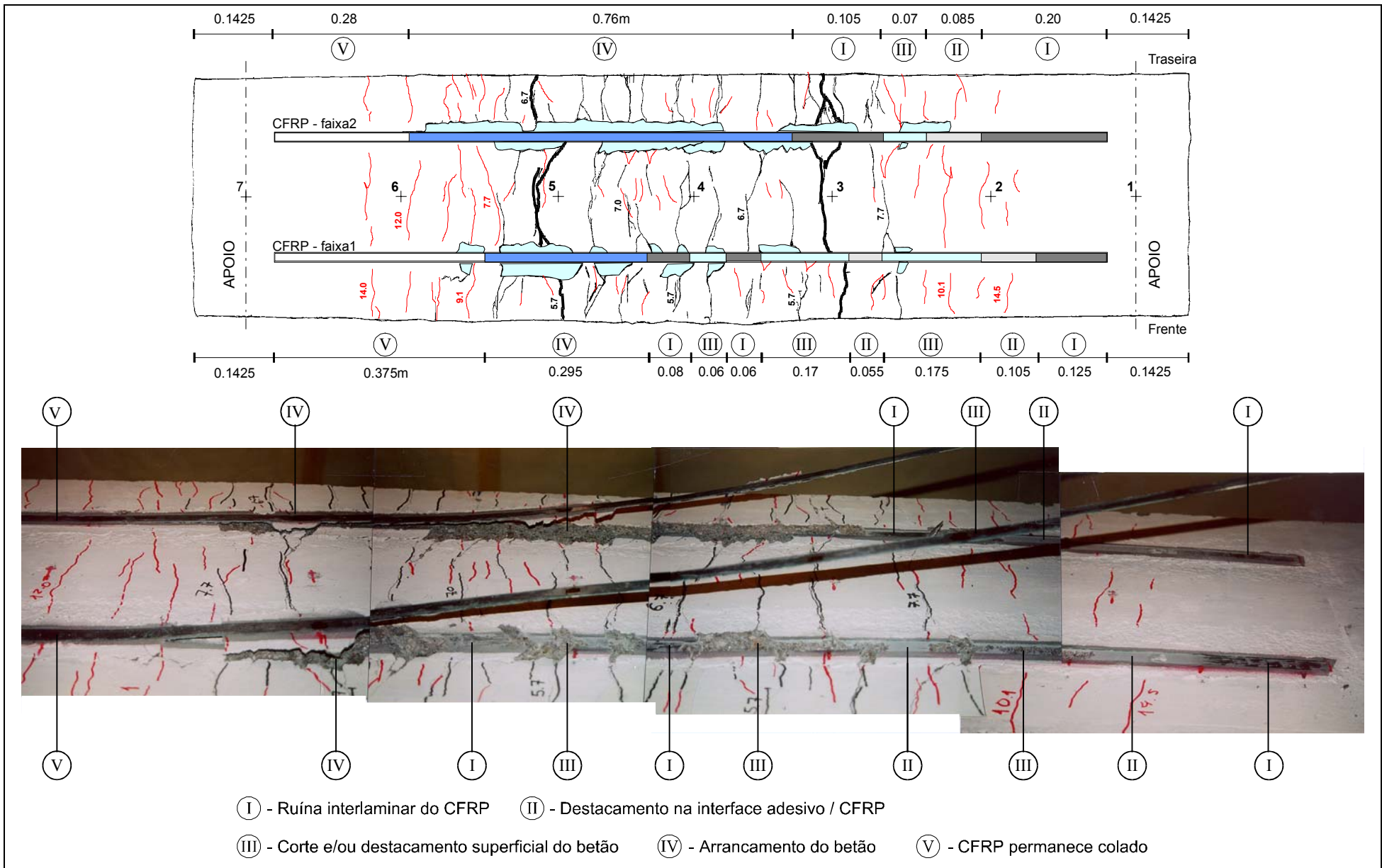


Figura 5.79 – Ruína do laminado de CFRP na laje LC2S (planta e pormenor).



O resumo dos principais resultados experimentais das lajes *LC1S* e *LC2S* apresenta-se, respectivamente, nas Tabelas C.25 e C.26 do anexo C, através da representação esquemática em planta e em alçado, do padrão de fendilhação e do modo de ruína, para além da indicação dos valores críticos da deformação e das tensões na laje e no CFRP.

O padrão de fendilhação instalado nas lajes permitiu a formação, nas extremidades de CFRP, de comprimentos de ancoragem de  $\ell_t = 13.5 \text{ cm}$  a  $\ell_t = 19.0 \text{ cm}$  num caso (*LC1S*) e de  $\ell_t = 17.5 \text{ cm}$  a  $\ell_t = 19.0 \text{ cm}$  no outro caso (*LC2S*), sem fendilhação do betão.

Nas Figuras 5.80 e 5.81 apresentam-se as curvas da carga total normalizada vs deslocamento central (LVDT nº4) e do momento normalizado vs curvatura central, registadas nos ensaios dos modelos *LC1S* e *LC2S*.

Na primeira figura, as curvas estão quase sobrepostas, destacando-se três fases distintas no andamento dos diagramas. Primeiramente, surge o regime não fendilhado, segue-se o período de formação e estabilização até à plastificação das armaduras e por último a contribuição principal do compósito e da armadura até à ruína prematura do CFRP. Os modelos cederam para as cargas totais máximas de  $P_{máx} = 34.1 \text{ kN}$  (ordenada de 0.22), no primeiro, e de  $P_{máx} = 37.7 \text{ kN}$  (ordenada de 0.23) obtidos no segundo.

Na outra figura, observa-se, por um lado, um certo desfasamento entre as curvas após o início de fendilhação e, por outro lado, um paralelismo entre elas depois da fendilhação estabilizar. Deste modo, conclui-se que os comportamentos dos dois modelos são semelhantes e que a diferença deve-se à distribuição da fendilhação registada no intervalo de referência para o cálculo da curvatura.

Na Figura 5.81 representam-se, ainda, as rectas teóricas médias admitidas para os estados *I*, *II* e *III* e cujos valores médios da rigidez à flexão são os seguintes:

$$\begin{cases} (EI)_I = 774 \text{ (kN.m}^2\text{)} \\ (EI)_{II} = 107 \text{ (kN.m}^2\text{)} \\ (EI)_{III} = 61 \text{ (kN.m}^2\text{)} \end{cases}$$

O comportamento da *série S* pode ser resumido em duas curvas do tipo momento  $\nu$ s curvatura, definidas em termos médios, sendo uma obtida de forma experimental e a outra prevista numericamente, como se demonstra na Figura 5.82. O critério de cálculo numérico das lajes e a discussão dos resultados destes diagramas descrever-se-ão no Capítulo 6.

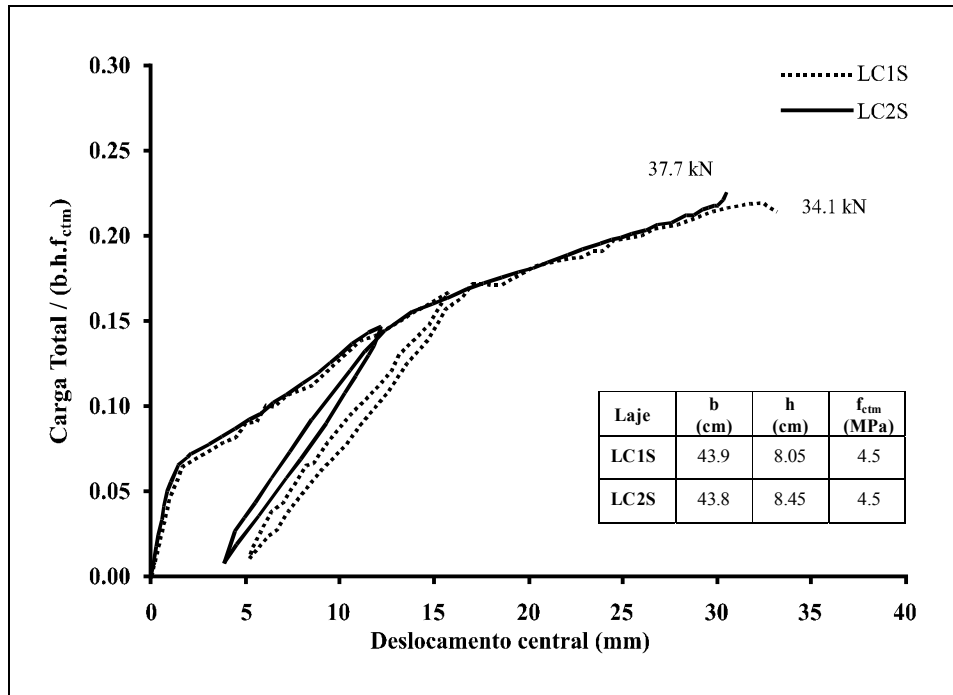


Figura 5.80 – Carga total normalizada  $\nu$ s deslocamento central para a *série S*.

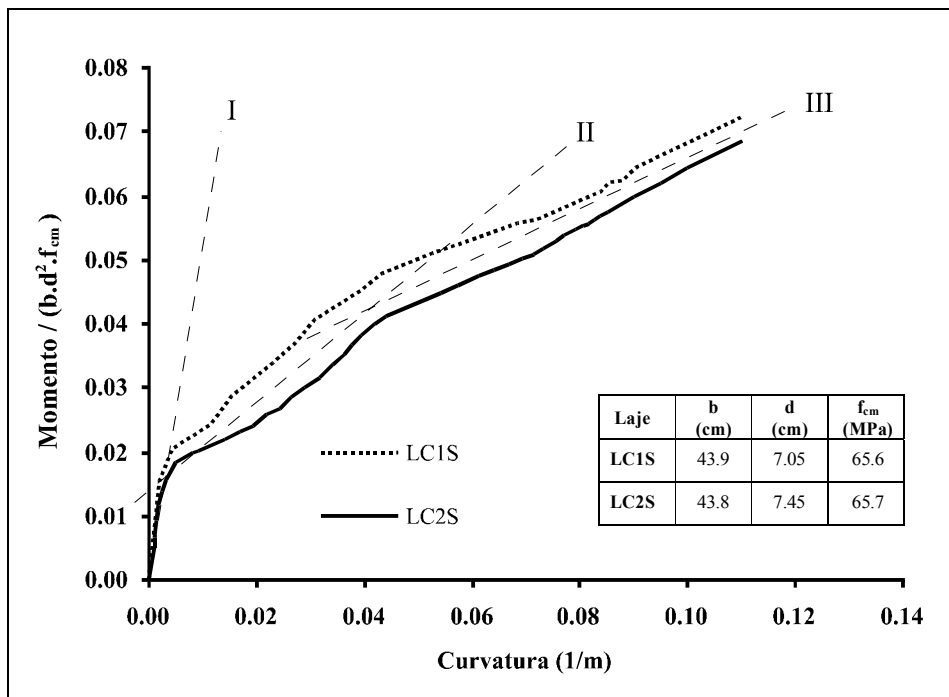


Figura 5.81 – Momento normalizado  $\nu$ s curvatura média no meio vão para a *série S*.

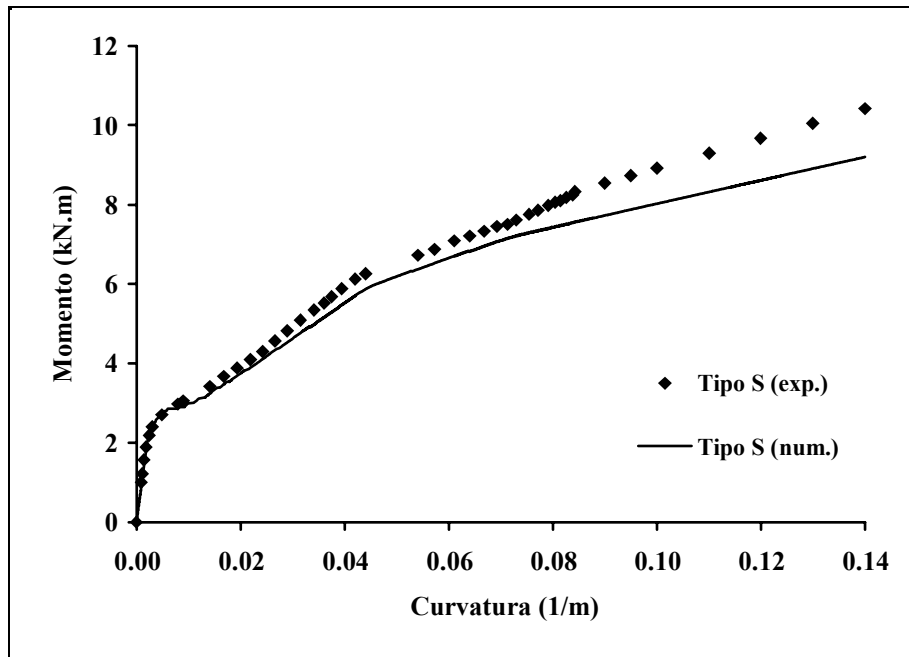


Figura 5.82 – Curvas médias experimental e numérica para o momento *vs* curvatura da *série S*.

Com a aquisição dos valores da extensometria do laminado ao longo do ensaio, é possível retirar algumas ilações acerca do comportamento do compósito e da interface compósito-betão. Nas Figuras 5.83-a e 5.83-c mostram-se os diagramas de distribuição das extensões do CFRP (faixa 1) ao longo de metade do seu comprimento, para vários níveis de carga e para os modelos *LC1S* e *LC2S*, respectivamente. A distribuição das tensões médias de corte na interface está exposta nas Figuras 5.83-b e 5.83-d para o mesmo comprimento de interface, níveis de carga e modelos em análise. Na Tabela 5.6, indicam-se os principais dados a reter sobre estes dois elementos, nomeadamente, os valores das tensões normais e dos rendimentos máximos registados no laminado, os valores máximos das tensões médias de corte na interface CFRP-betão e os valores médios da tensão de aderência do betão das lajes em análise (determinados na secção 4.2, Tabela 4.6). Extraem-se as seguintes conclusões:

- i)* a não utilização da capacidade do laminado *CarboDur*, traduzido no rendimento médio da ordem de 55% e na deformação máxima de cerca de  $\epsilon_{máx} \cong 3.4 \epsilon_{sy}$  e de  $\epsilon_{máx} = 1.35 \epsilon_{Lud}$ ;
- ii)* o valor elevado de 3.5 MPa a 4.9 MPa obtido nas tensões médias de corte da interface, que provoca o esgotamento da capacidade de tracção do betão (cerca de 3.8 MPa);
- iii)* a previsão do valor característico da força máxima de ancoragem na ruína dada pelo cociente  $[Eq-2.2]/0.75$  (Rostásy, 1998) é, significativamente, inferior aos valores máximos medidos próximo do instante de destacamento de uma das faixas do laminado.

Sem qualquer efeito de ancoragem suplementar sobre as extremidades do laminado, a penúltima conclusão conduzirá obrigatoriamente à ruína prematura do CFRP (ver item 2.3.3.1).

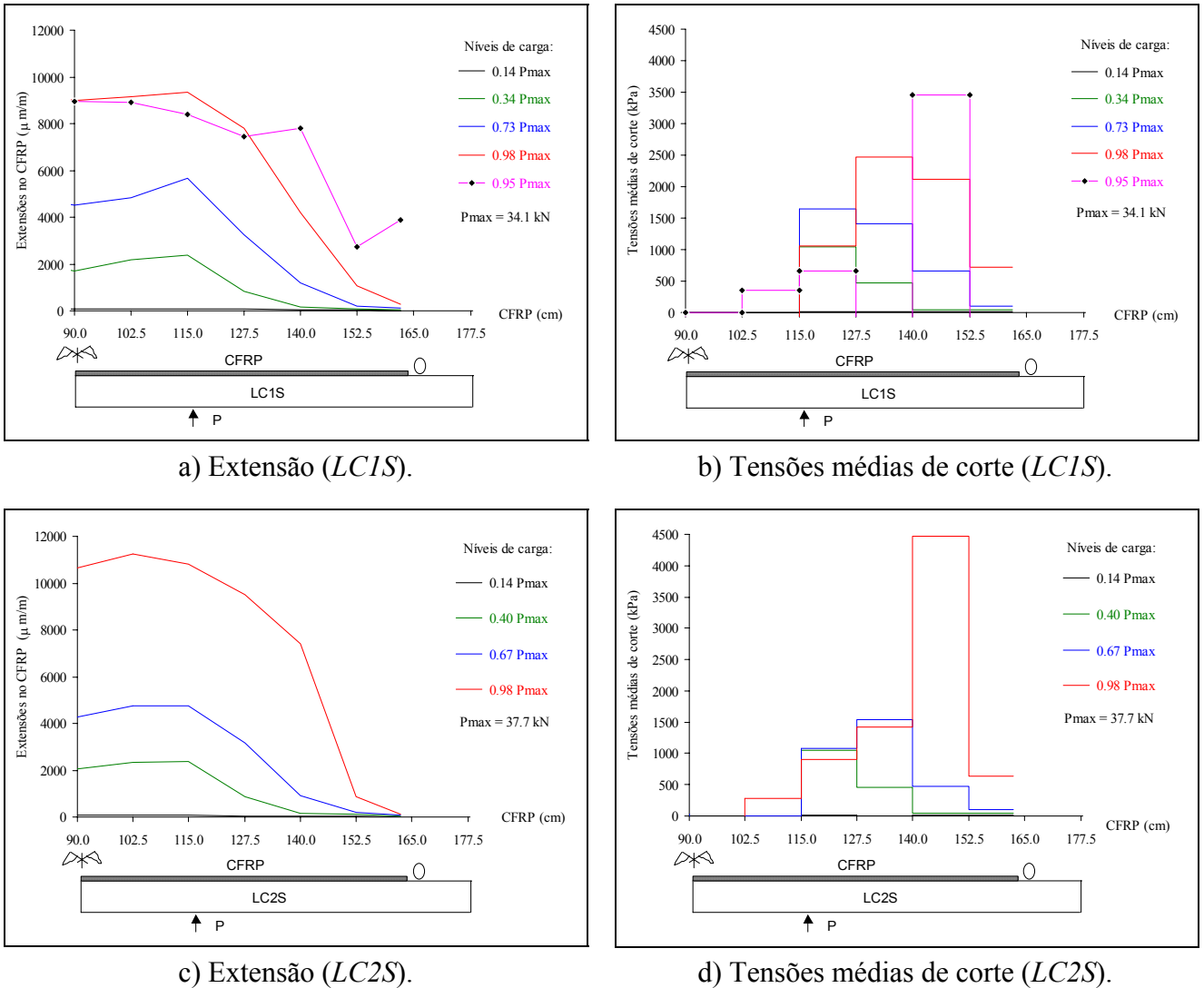


Figura 5.83 – Extensões e tensões médias de corte ao longo de metade do comprimento do CFRP (faixa 1).

Tabela 5.6 – Dados sobre o compósito CFRP e a interface com o betão (série S).

Laje		$\epsilon_{máx}$ (‰)	$\epsilon_{máx,m}$ (‰)	$\sigma_{máx}$ [i] (MPa)	$\sigma_{máx}/\sigma_u$ (%) [ii]	$F_{máx}$ [i] (kN)	$F_{máx,m}$ (kN)	$T_{m, máx}$ [iii] (kPa)	$\tau_{máx}$ [i] (kPa)	$\tau_{bm}$ [iv] (kPa)
LC1S	faixa 1	9.890	10.8	1582	51.0	30.4	33.2	16.84 (59.5)	3460	3800 - 3900 (4200)
	faixa 2	10.319		1651	53.3	31.7			2500 (*)	
LC2S	faixa 1	11.242		1799	58.0	34.5			4971	
	faixa 2	11.825		1892	61.0	36.3			2773 (*)	

[i] - Calculado de acordo com a equações [Eq-3.34] a [Eq-3.36] estabelecidas no item 3.4;

[ii] - Tensão  $\sigma_u = f_{Lu}$  estipulada no item 3.3.3.1;

[iii]- Valor característico determinado pelo cociente [Eq-2.2]/0.75 e (valor) =  $f_{Lu} \times \text{Área}_{CFRP}$  = capacidade do CFRP/faixa;

[iv]- Valores de aderência  $\tau_{bm}$  obtidos nos ensaios de "pull-off" e (valor) =  $f_{cm,j}$  (consultar Tabela 4.6);

(\*) - Nesta faixa os extensómetros estão afastados, entre si, do dobro dos da faixa 1.





# Capítulo 6

## Discussão dos Resultados Experimentais

### 6.1 - INTRODUÇÃO

Após a exposição dos resultados adquiridos nos ensaios de flexão, com modelos reduzidos de betão armado (Capítulo 5), procede-se à sua discussão, mediante a análise comparativa entre as séries testadas e a interpretação numérica de alguns exemplos, embora em número reduzido.

Este Capítulo inicia-se com o exame dos resultados referentes à primeira fase do programa experimental, isto é, examina-se e conclui-se acerca do comportamento geral das três séries de vigas reforçadas com laminados pré-fabricados de CFRP (*tipo A, tipo B e tipo C*). Em seguida, procede-se a nova discussão de resultados, desta vez relativamente a um grupo de três séries de faixas de laje, duas delas reforçadas com laminados (*série S*) e mantas (*série R*) de CFRP e uma terceira de betão armado (*série N*).

No final de cada etapa de investigação dos resultados, salientam-se as principais conclusões sobre o comportamento geral de vigas e de lajes reforçadas por colagem destes sistemas de CFRP (o laminado pré-fabricado e a manta flexível e pré-impregnada).

### 6.2 - VIGAS REFORÇADAS COM LAMINADOS DE CFRP

Com a presente análise, pretende concluir-se sobre o comportamento geral dos modelos de viga reforçados com os laminados pré-fabricados de CFRP, cujos resultados foram apresentados nas secções 5.1 e 5.2 do Capítulo 5. Os aspectos aqui mencionados devem ser interpretados, admitindo os condicionamentos manifestados nesta primeira fase dos trabalhos, devido ao facto de se tratarem de "testes piloto" realizados pela primeira vez em Portugal, às limitações de número de protótipos, de equipamento e de material descritas no Capítulo 3 e, sobretudo à disponibilidade escassa de literatura específica sobre o sistema de FRP, visto o documento de homologação do sistema *CarboDur* (Nr. Z-36.12-29, 1997) pelo "Deutches Institut für Bautechnik" (DIBt) não ter sido ainda publicado.

Após a etapa de discussão dos resultados experimentais, é aplicado um modelo numérico desenvolvido, recentemente, por Costeira Silva (1999) para a análise de vigas de betão armado

reforçadas com adição de armaduras de aço ou de CFRP, solicitadas à flexão. Na formulação do modelo de interpretação do comportamento, estão subjacentes os seguintes pressupostos de base:

- 1 - Ajuste do programa de análise não-linear (PCPLAN) desenvolvido na dissertação de Póvoas (1991), com formulação do modelo do material para análise de estruturas de betão (simples, armado ou pré-esforçado);
- 2 - Desenvolvimento de um modelo elasto-plástico com endurecimento, baseado na teoria do escoamento plástico, para a modelação da armadura adicional de reforço (aço ou compósito de FRP);
- 3 - Modelação da ligação betão-armadura de reforço (tipo betão-aço ou betão-compósito) através da formulação de um elemento de junta, sendo o material da interface caracterizado por um modelo desenvolvido, também, com base na teoria do escoamento plástico.

Infelizmente, por limitação de tempo, o programa de cálculo aplica-se apenas a dois tipos de exemplos (duas vigas *tipo A* e duas vigas *tipo B*), com o objectivo de se traçar as curvas de desempenho esperadas nos ensaios (carga total vs deslocamento central, distribuição de extensões do CFRP e de tensões de corte ao longo da interface betão-compósito) e de as confrontar com as descritas experimentalmente.

### 6.2.1 - Vigas *tipo A*

Esta série de vigas pretende avaliar o modo como é realizada a transferência de forças na interface betão-adesivo-laminado de CFRP e, de certa forma, saber como se distribuem as tensões de corte ao longo do comprimento de colagem, durante as várias etapas de carregamento dos modelos.

#### 1 - Comportamento em geral

A partir dos resultados expostos no item 5.1.2 do Capítulo 5, é possível extrair algumas conclusões que se descrevem em seguida.

O número reduzido de vigas e a deficiente instrumentação dos primeiros modelos não permitiram caracterizar, convenientemente, o comportamento desta série de vigas de betão reforçadas com laminados de carbono e ensaiadas à flexão.

O comprimento de 5 cm, que não foi colado na zona central da viga parece insuficiente, uma vez que provocou maior concentração de tensões e levou ao arrancamento antecipado do betão nesta zona. Nos modelos *A.3* e *A.4*, aumentou-se esse comprimento para 9 cm, o que permitiu um bom

desempenho do laminado no reforço. Por exemplo, o modelo de Van Gemert (1980) estabeleceu o comprimento não colado igual à distância entre os eixos das cargas do ensaio de flexão que, neste caso, era de  $15\text{ cm}$ .

A deformação do laminado ao longo do seu comprimento permitiu deduzir acerca da variação tipo da distribuição de tensões de corte na interface betão-CFRP até ao instante de colapso, isto é, a primeira apresentou-se concentrada na zona central da viga e rapidamente tendeu para zero, fora desta. A existência de delaminação entre fendas ao longo da junta colada, quando se aproxima o colapso do laminado, conduz à translação das curvas de deformação do CFRP para as extremidades do compósito, até se esgotar a área efectiva de ancoragem (perda de aderência). As tensões de tracção medidas no laminado, nesse instante, indicam que se mobilizou apenas 23% a 26% da capacidade resistente do compósito (consultar a Tabela 6.1).

Por seu lado, as tensões de corte na interface betão-CFRP são máximas, primeiro, no início do esticamento do laminado e, mais próximo de cedência da viga, estes valores máximos transferem-se para uma distância de  $20\text{ cm}$  (viga *A.4*) a  $30\text{ cm}$  (viga *A.3*) da zona central das vigas.

Na viga *A.4*, o efeito de extremidade livre conduz ao fenómeno de "peeling", expresso pela associação de tensões de tracção e tensões de corte na sua vizinhança. Na Tabela 6.1, apresentam-se, além das deformações e dos esforços máximos registados no compósito, os valores máximos das tensões de corte (em termos médios) nos modelos instrumentados com extensómetros eléctricos. Verifica-se que estes valores excedem a resistência média à tracção do betão ( $f_{ctm,j}$ ), o que responsabiliza o modo de ruína geral desta série *tipo A*, através da fractura por corte do betão adjacente à linha da interface.

Tabela 6.1 - Comportamento do CFRP e da interface betão-CFRP (vigas *tipo A*).

Viga	$\epsilon_{m\acute{a}x}$ (‰)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa) [i]	$\sigma_{m\acute{a}x} / \sigma_u$ (‰) [ii]	$F_{m\acute{a}x}$ (kN) [i]	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa) [i]	$\tau_{bm}$ (MPa) [iii]
<i>A.3</i>	5.047	808	26	48.45	4.47	1.6 (2.9)
<i>A.4</i>	4.439	710	23	42.62	3.05	

[i] - Calculados de acordo com as equações [Eq-3.34] a [Eq-3.36];

[ii] - Tensão  $\sigma_u = f_{tu}$  estipulada no item 3.3.3.1;

[iii] - Valor da aderência ( $\tau_{bm} = f_{ctm,p}$ ) e (*valor*) =  $f_{ctm,j}$  estabelecido na Tabela 4.3.

É fundamental realizar um maior número de ensaios com provetes melhorados relativamente à transmissão do binário na secção central da viga, ou seja, deve estabelecer-se um mecanismo metálico que garanta o funcionamento como rótula à compressão, sem instalar momentos residuais (modelo referido na Tabela 2.7 do Capítulo 2). Nestes modelos, os momentos residuais proporcionados pela rigidez da armadura de  $2\phi 16$ , apresentaram um valor da ordem de 5% do momento aplicado na secção do meio vão.

## 2 - Interpretação numérica das vigas A.3 e A.4

Os comportamentos dos modelos A.3 e A.4, que constam da série *tipo A*, foram analisados numericamente pelo programa de cálculo desenvolvido por Costeira Silva (1999), determinando-se as curvas carga total vs deslocamento central da viga e os diagramas de distribuição de extensões no laminado e de distribuição de tensões de corte ao longo da interface, para ambas as vigas.

Admitindo as características dos materiais expostos no Capítulo 3 e os parâmetros intervenientes na lei material da interface definidos na tese de mestrado de Costeira Silva (1999), obtém-se a resposta numérica vs experimental ilustrada na Figura 6.1, sobre a relação carga total vs deslocamento central para estas mesmas vigas. Verifica-se que, nestas condições (hipótese 1), as curvas que traduzem o comportamento numérico de A.3 e A.4 são coincidentes, mas distantes dos resultados experimentais.

A tentativa de ajustar as respostas numérica e experimental (hipótese 2) resultou no aspecto das curvas a tracejado A.3-Num (hip-2) e A.4-Num (hip-2), devido a alterações de alguns parâmetros que justificaram um comportamento menos dúctil da interface betão-laminado e, sobretudo, no aumento do módulo de elasticidade longitudinal do compósito de 160 GPa para 170 GPa e do valor máximo da tensão de referência de corte, na interface, de 3.5 MPa para 5.5 MPa (valores defendidos por outros autores, Capítulo 2).

As distribuições de extensões no compósito e de tensões médias de corte ao longo de metade da interface betão-CFRP, para vários níveis de carga, são apresentadas nas Figuras 6.2-a a 6.2-d (Costeira Silva, 1999). Em cada uma das figuras, comparam-se os resultados obtidos no ensaio experimental e numericamente (após ajuste de parâmetros - hipótese 2), para as vigas A.3 e A.4 e segundo a localização dos extensómetros colados nestas.

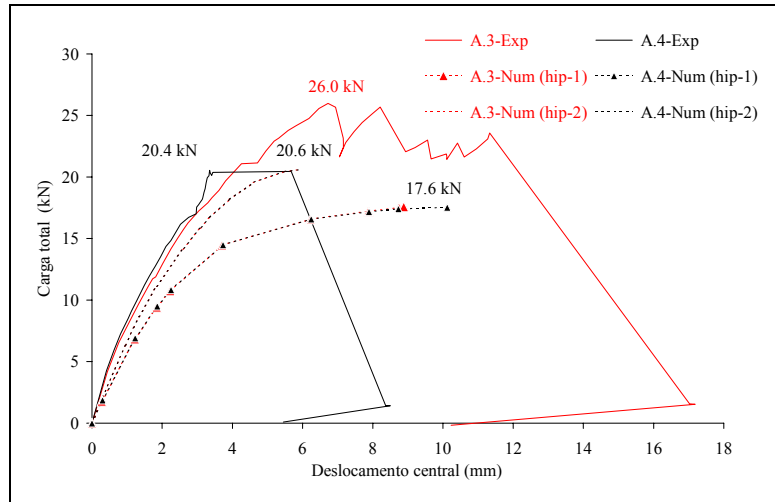
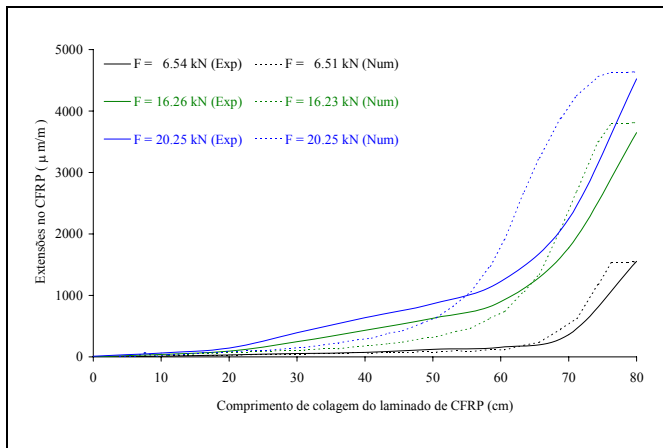
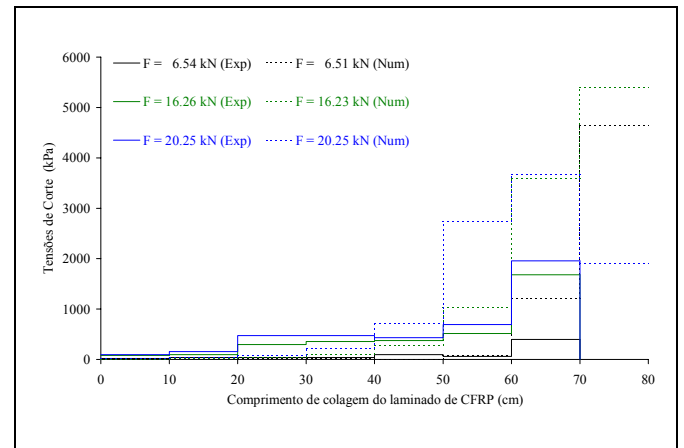


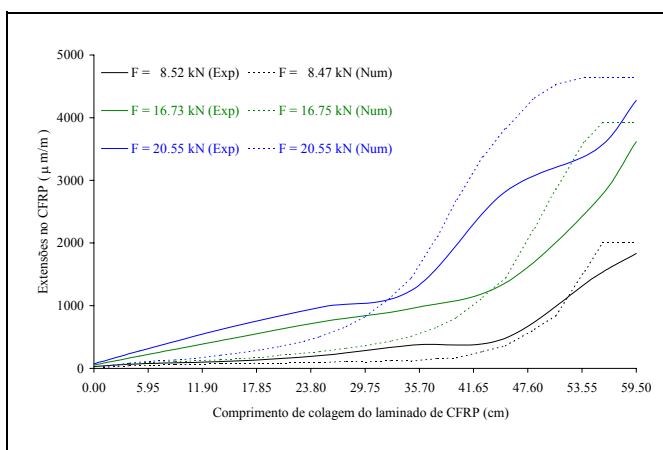
Figura 6.1 - Curvas carga total vs deslocamento central para as vigas A.3 e A.4 (numérico vs experimental).



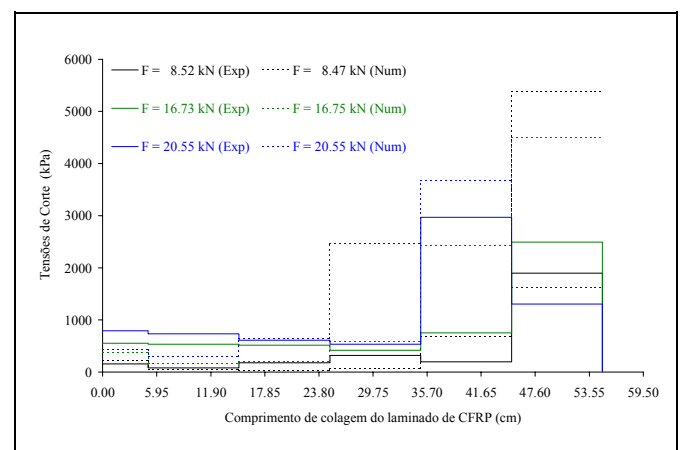
a) Extensões (A.3).



b) Tensões de corte (A.3).



c) Extensões (A.4).



d) Tensões de corte (A.4).

Figura 6.2 - Distribuição de extensões e tensões médias de corte ao longo de metade do laminado.

Da análise das Figuras 6.2-a e 6.2-c, observa-se que os resultados numéricos conduzem a deformações do laminado mais concentradas na zona central da viga, enquanto que a resposta

experimental apresenta uma deformação distribuída por uma extensão maior. De um modo geral, é visível que o valor numérico máximo da extensão no laminado é superior ao experimental. Apesar dos bons resultados obtidos na hipótese 2, a discrepância de valores ao nível das deformações no CFRP permite avançar com a hipótese de que o valor definido para o módulo de elasticidade longitudinal ( $E_L$ ) pode estar incorrecto e que o número escasso de testes não é suficiente para se poder concluir sobre estes aspectos.

No que concerne às Figuras 6.2-b e 6.2-d (sobre as vigas *A.3* e *A.4*), constata-se que as tensões médias de corte resultam numericamente da transferência de esforços do laminado ao betão numa extensão pequena (cerca de um quarto do vão e localizada a partir do centro da viga) e são, também, superiores aos valores médios medidos por via experimental.

### **6.2.2 - Vigas tipo B**

Nesta secção, discriminam-se as principais impressões sobre o comportamento experimental de um grupo de vigas de betão armado, reforçadas com laminados tipo *Carbodur S 512* (de CFRP), cujos resultados foram descritos no item 5.1.3 do Capítulo 5 e discutidos em algumas publicações de Juvandes et al. (1997-b; 1998-g; 1999). Procura estudar-se aspectos como o efeito da variação de comprimento do reforço, o modo de preparação da superfície e, de alguma forma, o tipo de adesivo e a ancoragem das extremidades do laminado, no comportamento global da estrutura.

#### **1 - Comportamento em geral**

Todos os modelos apresentam, no início, um comportamento linear elástico acompanhado de fendilhação circunscrita à zona central de momento constante. Segue-se um estado alargado não linear, com desenvolvimento de várias fendas simultâneas de flexão e de corte. O colapso surge, sob a forma de vários modos de ruína, que estão representados na Tabela 5.3 do Capítulo 5 e contemplados nos casos sintetizados no item 2.3.2, referentes às conclusões de outros investigadores.

Em geral, os modos de ruína são frágeis e devidos, principalmente, ao destacamento antecipado do laminado, sem o colapso do compósito de carbono. Por observação das superfícies de ruína ao longo do comprimento do CFRP destacado, verifica-se que, além de compreenderem zonas de delaminação do betão, intercaladas por ruínas adesivas na interface betão-adesivo, existe quase sempre corte interlaminar do CFRP na sua extremidade (livre ou sobre o apoio).

Aparentemente, o uso de um sistema de ancoragem das extremidades do reforço (laminado comprimido sob os aparelhos de apoio) conduz ao aumento da carga total última da estrutura, como se pode observar comparando os comportamentos das vigas *B.7* com *B.3* ou *B.8*, que exibem

laminados com comprimentos de colagem semelhantes e diferentes condições para as suas extremidades (ver item 3.1.2.1).

Por sua vez, o estabelecimento de reforços com diferentes comprimentos de ligação, com consequente dispensa do laminado em secções da viga sujeitas a esforços de tracção razoáveis, impõe modos de ruína e cargas resistentes distintos, tais como os observados nas vigas *B.7* e *B.11*.

A preparação da superfície do betão e o tipo de adesivo, seleccionado pelo sistema de reforço, têm influência entre o laminado e o betão (aspectos referidos no item 2.3.3.1). Antes de se aplicar o adesivo *Sikadur 30* na viga *B.3*, espalhou-se a resina epoxídica *Sikadur 31*, funcionando como primário. Após o ensaio, o resultado da distribuição de extensões ao longo do laminado é mais regular que nos outros modelos e verifica-se o destacamento do CFRP, devido à ruína por corte interlaminar em toda a sua extensão.

O desempenho dos modelos reforçados após a pré-fendilhação do betão, como no caso da viga *B.10* sem selagem das fendas, não foi diferente dos outros modelos desta série *tipo B*. Contudo, o valor máximo da carga total suportada por este modelo parece ter sido influenciado pela capacidade resistente ao corte na interface betão-CFRP (fragmentada pela pré-fendilhação), observando-se um valor inferior ao das vigas *B.1* e *B.3* mas, ainda, ao nível da grandeza dos registados nos modelos *B.5* e *B.7*.

A alteração das percentagens de armadura longitudinal de tracção ( $\rho_s = 0.126\%$  para  $\rho_s = 1.34\%$ ) e transversal de corte ( $\rho_w = 0.31\%$  para  $\rho_w = 0.19\%$ ) processados nos modelos *B.9* e *B.13* respectivamente, conduziu, na primeira viga, a um aumento da capacidade resistente e da rigidez em comparação com o modelo de referência *B.6* (ou *B.12*) e, na segunda viga, ao comportamento oposto deste em face do observado na viga *B.3*.

Na Tabela 6.2, indicam-se os principais dados a reter sobre as vigas *tipo B*, nomeadamente, os valores das tensões normais e dos rendimentos máximos registados no laminado, os valores máximos das tensões de corte na interface CFRP-betão e os valores médios da tensão de aderência do betão nos modelos em estudo. Conclui-se que os laminados de CFRP trabalharam, no máximo, cerca de  $1/3$  da sua capacidade resistente (*B.9* expressa o melhor desempenho), indicando o sub-aproveitamento do material. O esgotamento da capacidade de aderência do betão, adjacente à interface de ligação, é provocado pelo valor elevado de  $3\text{ MPa}$  a  $5\text{ MPa}$  obtido nas tensões médias de corte, em relação ao valor médio da resistência à tracção simples do betão ( $f_{ctm,j}$ ).



Tabela 6.2 - Comportamento do CFRP e da interface betão-CFRP (vigas *tipo B*).

Viga	$\varepsilon_{máx}$ (‰)	$\sigma_{máx}$ (MPa) [i]	$\sigma_{máx} / \sigma_u$ (‰) [ii]	$F_{máx}$ (kN) [i]	$\tau_{máx}$ (MPa) [i]	$\tau_{bm}$ (MPa) [iii]
B.3	6.346	1015	32.8	60.9	5.02	2.5 (3.1)
B.5	4.754	761	24.5	45.6	3.49	1.2 (2.9)
B.8	4.844	775	25.0	46.5	3.46	2.3 (2.8)
B.7	4.580	733	23.6	44.0	1.80	2.3 (2.8)
B.11	1.841	295	9.5	17.7	1.54	1.8 (2.5)
B.9	7.214	1154	37.2	69.3	4.45	1.7 (2.7)
B.13	3.640	582	18.8	35.0	1.84	- (2.9)
B.10 (3ª fase)	4.972	796	25.7	47.7	3.08	1.7 (2.5)

[i] - Calculados de acordo com as equações [Eq-3.34] a [Eq-3.36];

[ii] - Tensão  $\sigma_u = f_{Lu}$  estipulada no item 3.3.3.1;

[iii] - Valor da aderência  $\tau_{bm} = f_{ctm,p}$  e (valor) =  $f_{ctm,j}$  estabelecidos na Tabela 4.3.

## 2 - Interpretação numérica das vigas B.6 e B.9

O objectivo fundamental consiste em estabelecer uma análise comparativa das respostas numérica e experimental sobre o comportamento de uma viga de betão armado corrente (considerada como referência, viga B.6) e o de uma viga com as mesmas características, mas reforçada por colagem de um laminado unidireccional de CFRP (viga B.9). A primeira resposta foi estabelecida a partir do programa de cálculo desenvolvido por Costeira Silva (1999), cujos principais resultados se resumem neste item e a segunda foi descrita com base nos resultados dos ensaios de flexão, expostos no Capítulo 5.

Admitindo as características dos materiais referidos no Capítulo 3 e os parâmetros intervenientes na lei material da interface estabelecidos na tese de mestrado do autor do programa de cálculo, obtêm-se as curvas numérica e experimental da carga total vs deslocamento central, ilustradas na Figura 6.3, para as vigas B.6 e B.9.

Em termos gerais, as curvas ajustam-se, entre si, em serviço e em estado limite último, sobretudo no caso *B.6*. A viga *B.9* apresenta um aumento da capacidade resistente e da ductilidade, em relação à viga de referência. A adição do laminado de CFRP provoca um aumento relativo de rigidez do sistema estrutural, em parte traduzido na relação entre a rigidez axial do compósito e da armadura longitudinal de tracção de  $A_L E_L / A_s E_s = 0.32$  (Tabela 3.3). Contudo, em termos de deformação final, o modelo numérico conduziu a uma resposta muito rígida. Segundo Costeira Silva (1999), é provável que as propriedades definidas para a lei material da interface, em estado fendilhado do betão, apresentem valores desajustados da realidade e de difícil calibração. Este facto é devido a uma base de dados experimental reduzida, sendo a opinião geral da comunidade científica divergente, como se descreveu no Capítulo 2.

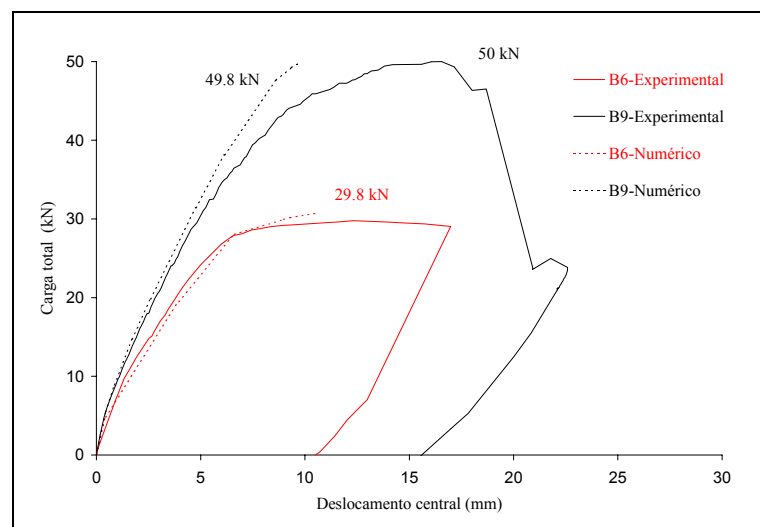


Figura 6.3 - Curvas carga total vs deslocamento central para as vigas *B.6* e *B.9*.

Na Tabela 6.3, apresentam-se algumas propriedades características do comportamento em serviço e do comportamento resistente, obtidas nos testes e por via numérica, para as vigas *B.6* e *B.9*. As conclusões enumeradas no parágrafo anterior são reforçadas, agora, quando se relacionam os valores obtidos para as duas vigas, nomeadamente, a nível dos cocientes entre as flechas em serviço ( $a_m / a_{m, B.6}$ ), entre as cargas totais máximas ( $P_{máx} / P_{máx, B.6}$ ) e entre a flecha última e o vão ( $\delta_{máx} / \ell$ ).

Contudo, o módulo de rotura foi o mesmo na modelação numérica das duas vigas e igual ao observado experimentalmente, isto é, a ruína dos modelos *B.6* e *B.9* surge por esmagamento do betão na camada superior da zona central e para as cargas totais máximas de  $30.7 \text{ kN}$  e  $49.8 \text{ kN}$ .

Tabela 6.3 - Comportamento experimental e numérico das vigas B.6 e B.9.

Propriedades	Experimental		Numérico [v]	
	B.6	B.9	B.6	B.9
$a_m$ (mm) [i]	2.70	1.95	2.50	1.80
$a_m / a_{m, B.6}$	0.72		0.72	
$P_{máx}$ (kN) [ii]	29.8	50.0	30.7	49.8
$P_{máx} / P_{máx, B.6}$	1.68		1.62	
$\delta_{máx}$ (mm) [iii]	12.3	18.0	10.6	9.7 (*)
$\delta_{máx} / \ell$ [iv]	1 / 122	1 / 83	1 / 142	1 / 155 (*)

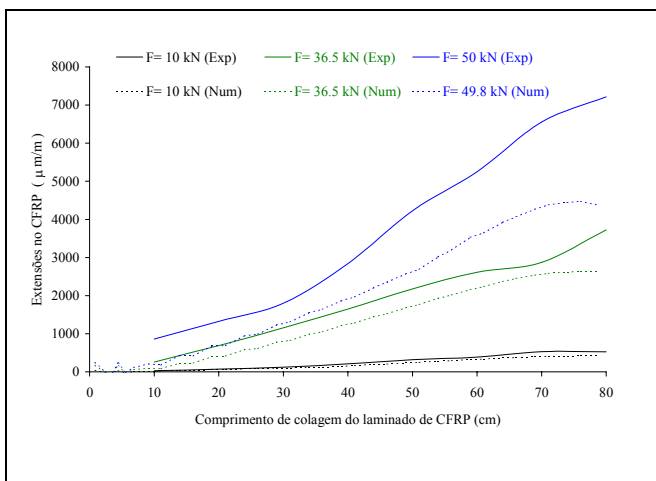
[i] - Flechas obtidas para a carga total de  $P_{máx, B.6} / 2 \cong 15 kN$ ; [ii] - Carga total da viga;

[iii] - Flecha correspondente ao início de colapso da viga; [iv] -  $\ell = 1.5m$ ;

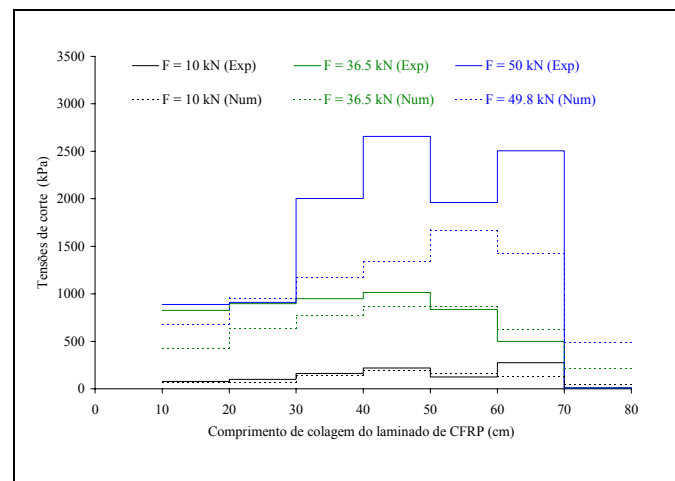
[v] - Valores retirados do trabalho de Costeira Silva (1999).

(\*) - Os valores indicam uma solução numérica rígida.

Nas Figuras 6.4-a e 6.4-b, comparam-se as distribuições de extensões no laminado e de tensões médias de corte na junta, entre o ensaio experimental e o numérico, para vários níveis de carga. Da análise destes gráficos verifica-se, mais uma vez, que a resposta numérica é mais rígida que o registo experimental e que, no primeiro, o laminado recebe menos esforço de tracção. Especificamente, na segunda figura, observa-se que as tensões de corte apresentam valores nulos a meio vão (condição de simetria), crescem até um máximo e, com a aproximação do apoio, voltam a decrescer com alguma oscilação. Todavia, é possível afirmar que, até à carga total de  $36.5 kN$ , o modelo numérico simula o comportamento da interface da viga B.9, de modo satisfatório. Para valores superiores, passam a existir destacamentos parciais do laminado, não contemplados na formulação numérica desta fase, que justificam, em certa medida, as discrepâncias visíveis na zona de tensões máximas.



a) Extensões (B.9).



b) Tensões de corte (B.9).

Figura 6.4 - Distribuições de extensões e tensões médias de corte ao longo de metade do laminado.

### 6.2.3 - Vigas tipo C

As circunstâncias em que foram aceites as vigas tipo C para este estudo, executadas há oito anos e com um certo grau visível de deterioração, justificam alguma atenção, traduzida nas conclusões extraídas dos ensaios descritos no Capítulo 5 e resumidos em alguns trabalhos de Juvandes et al. (1996-c; 1998-c; 1998-g).

#### 1 - Comportamento em geral

Da análise das Figuras 5.34 e 5.41, sobre as curvas carga total vs deslocamento a meio vão para as vigas desta série, são notórios o aumento de capacidade resistente, da rigidez e da ductilidade dos modelos reforçados com CFRP em relação à viga C.3 de betão armado.

Por sua vez, a viga C.2 pré-fendilhada apresentou, também um comportamento semelhante aos modelos não-fendilhados (previamente) e em conformidade com conclusões expostas a propósito da viga B.10 (item 6.2.2). Do comportamento geral das vigas tipo C, conclui-se que o reforço aumentou a capacidade da viga C.4 de 63%, sensivelmente, em relação ao modelo de referência C.3. Após o destacamento do laminado, todas as vigas apresentam um desempenho idêntico aos dos protótipos de betão armado, até surgir o colapso da estrutura.

Todos os modelos desta série demonstram um modo de ruína prematura, resultante do destacamento antecipado do laminado *CarboDur*, devido à baixa qualidade do betão. Este modo é muito influenciado pela distribuição das tensões de corte na interface betão-CFRP que, em situação última, conduz à fractura do betão adjacente à ligação, como consequência do esgotamento da sua resistência de aderência ( $\tau_{bm}$ ). Este facto está representado na Tabela 6.4, para o único modelo com registo extensométrico, através da apresentação da deformação e do esforço máximo no compósito e, também, do valor máximo da tensão de corte (em termos médios) na interface da viga C.5. O compósito atinge, na sua melhor hipótese, cerca de 1/4 da sua capacidade resistente e a tensão média de corte ( $\tau_{máx}$ ) apresenta um valor de 2.7 vezes superior ao da resistência média à tracção do betão ( $f_{ctm,j}$ ).

Tabela 6.4 - Comportamento do CFRP e da interface betão-CFRP (vigas tipo C).

Viga	$\epsilon_{máx}$ (‰)	$\sigma_{máx}$ (MPa) [i]	$\sigma_{máx} / \sigma_u$ (%) [ii]	$F_{máx}$ (kN) [i]	$\tau_{máx}$ (MPa) [i]	$\tau_{bm}$ (MPa) [iii]
C.5	5.063	810	26.1	48.6	4.34	1.5 (1.6)

[i] - Calculados de acordo com as equações [Eq-3.34] a [Eq-3.36]; [ii] - Tensão  $\sigma_u = f_{Lu}$  estipulada no item 3.3.3.1;

[iii]- Valor da aderência ( $\tau_{bm} = f_{ctm,p}$ ) e (valor) =  $f_{ctm,j}$  estabelecidos na Tabela 4.4.

#### 6.2.4 - Conclusões

Sobre a primeira fase experimental apoiada em modelos reduzidos de vigas de betão armado, reforçadas com laminados pré-fabricados de carbono, diversas conclusões podem ser extraídas, pelo que as mais relevantes são enumeradas nos parágrafos seguintes.

Em geral, a técnica do reforço resulta num melhoramento significativo da capacidade última de carga e num menor incremento da rigidez à flexão. O reforço de vigas pré-fendilhadas, nestas condições e sem o cuidado de selagem das fendas, proporcionou um comportamento semelhante às não fendilhadas, apesar da maior ductilidade obtida nas primeiras;

Os modos de ruína observados neste trabalho são do tipo frágil. Nunca se obteve a ruína do laminado de *CarboDur S 512*, porque este apresenta uma resistência demasiada elevada em comparação com, por um lado, a área reduzida de colagem que proporciona tensões de corte elevadas e, por outro lado, o que é esperado nos modelos de betão armado disponibilizados para a análise experimental ( $\rho_L \geq 0.26\%$  em relação ao valor de  $\rho_s = 0.126\%$  a  $1.34\%$ );

O êxito de um reforço numa estrutura depende, entre outros factores, do processo de aplicação e do estado de cura final do adesivo espalhado na ligação do laminado ao betão. Outro aspecto a salientar consiste na importância da aderência entre o laminado e o betão, ao longo de um comprimento estritamente necessário para a ligação. As ruínas condicionadas pelo destacamento antecipado do laminado (imperfeições, fendilhação acentuada do betão ou insuficiente comprimento de colagem) conduzem a um uso menos adequado do reforço;

A disposição de ancoragens nas extremidades (colocação do laminado sob os apoios realizado nos ensaios) produz um aumento da capacidade resistente última da estrutura, evitando o aparecimento prematuro do efeito de “peeling” no laminado. Embora este aspecto não tenha sido explorado no trabalho, relembra-se que alguns autores (referidos no item 2.3.3.1 e no documento recente de Heinz Meier (1998)) indicam que a adição de mecanismos de fixação dos laminados traccionados, de preferência ao longo de todo o comprimento da junta, criam forças de compressão transversais à ligação com efeitos benéficos, sobre os mecanismos de ruína prematura. Por exemplo, os documentos de homologação do iBMB sugerem as formas expostas na Figura 2.26 (Capítulo 2) e actualmente melhoradas com o laminado de CFRP em forma de "L" apresentado na Figura 6.5 ((a) e (b)) e estudado no EMPA (Meier, 1998).

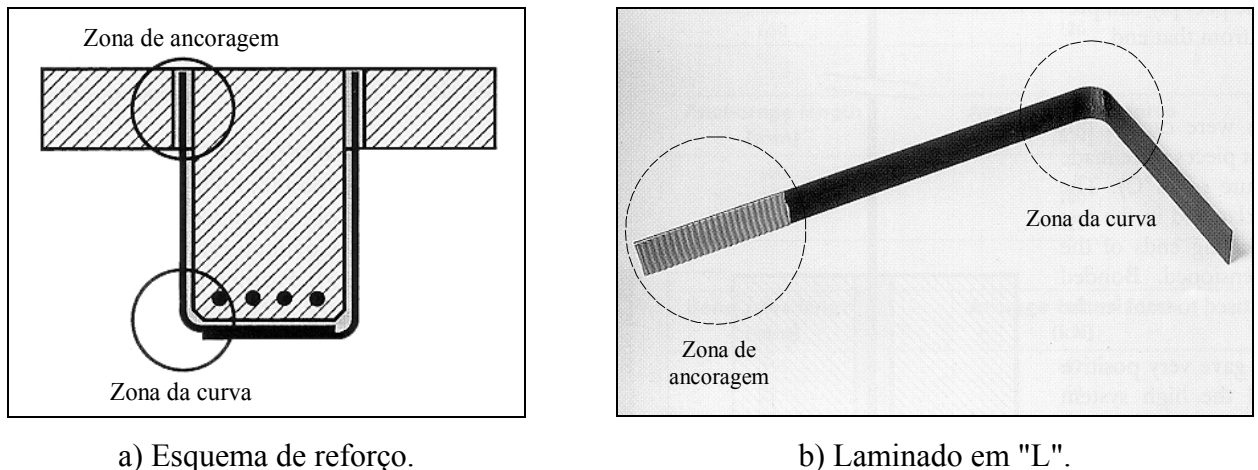


Figura 6.5 - Adição de estribos planos de CFRP (Meier, 1998).

O sistema de preparação da superfície do betão pode influenciar a resistência última de uma ligação. Constatou-se que esta superfície deve ser limpa com um sistema abrasivo mecânico (martelo de agulhas) ou com projecção de jacto de areia e complementada com a aplicação de um primário de modo a prevenir, no limite, a expansão do efeito de “peeling” do laminado ao longo da interface, caso ele se manifeste;

O grau de deterioração do betão (carbonatação, penetração de cloretos, etc.) de um modelo pode alterar as propriedades mecânicas da interface, na adesão entre os materiais e, sobretudo, na resistência ao corte do betão. Betões de baixa classe de resistência reduzem, também, a aderência de uma ligação colada;

O modelo desenvolvido por Costeira Silva conduz, de uma maneira geral, a comportamentos semelhantes aos verificados por via experimental. No entanto, a resposta numérica, genericamente mais rígida nos testes realizados, pode ser corrigida, por um lado, através da calibração dos valores mais adequados para a lei da interface e, por outro lado, mediante a integração de critérios de cedência parciais, que traduzam melhor o escorregamento na interface betão-CFRP.

Como observação final, refira-se que algumas das conclusões expostas podem depender de uma demonstração experimental mais detalhada, a nível científico. Contudo, o número reduzido de provetes ensaiados para cada caso específico em estudo (um ou dois exemplos), admite-se ser suficiente para esta fase dos trabalhos e, sobretudo, para confirmar a opinião de alguns investigadores sobre este assunto.

### 6.3 - LAJES REFORÇADAS COM MANTAS E COM LAMINADOS DE CFRP

Nesta secção, resume-se o comportamento médio do modelo constitutivo de cada uma das séries que integra o grupo das faixas de laje em análise (*série N, R e S*), a partir dos resultados apresentados no Capítulo 5.

Antes da análise comparativa entre as séries, estabelece-se a previsão do comportamento médio dos modelos tipo de cada uma, recorrendo a um programa de cálculo de secção compósitos de betão armado, apoiado num modelo de camadas. Em seguida, procura discutir-se os resultados experimentais em face do comportamento determinado por via analítica, para as três séries em estudo.

#### 6.3.1 - Comportamento previsto

Após a etapa de pré-dimensionamento descrito no Capítulo 3 (item 3.1.1.2) e sem conhecimento exacto das características mecânicas dos materiais constituintes das faixas de laje, recorreu-se a um programa de cálculo de secções compósitas de betão armado, apoiado num modelo de camadas (Figura 6.6), para traçar as curvas de desempenho esperadas nos ensaios de flexão das três séries em análise (Henriques, 1998).

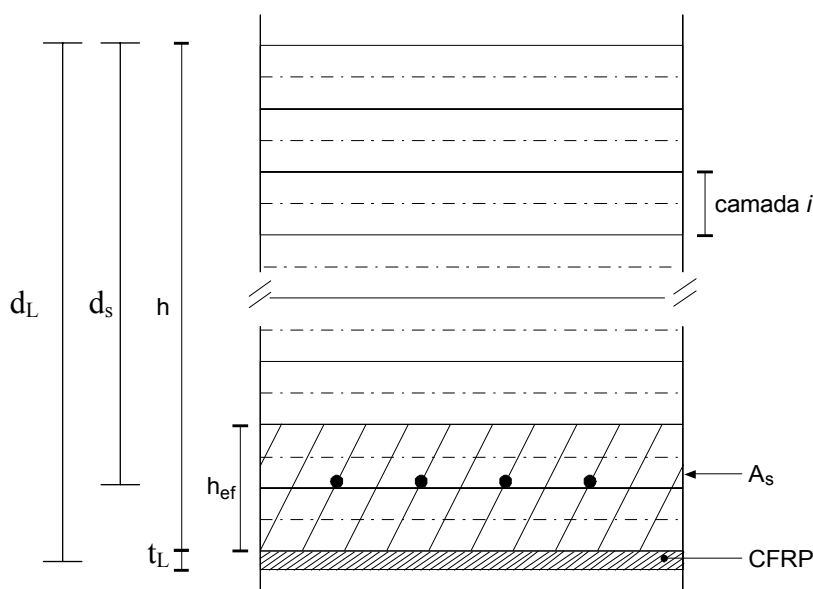


Figura 6.6 - Discretização de uma secção tipo em camadas.

O betão é considerado como um material contínuo, homogéneo e inicialmente isotrópico, admitindo-se os modelos de comportamento expressos no "Model Code 1990" (CEB-FIP, 1993) para a compressão e para a tracção (diagrama de "tension stiffening" ilustrado na Figura 6.7). Os dados completaram-se com o conhecimento das propriedades do betão aos 28 dias descritas para a classe de

resistência C50/60, estabelecendo-se os valores seguintes para as características à tracção,  $\alpha = 0.6$  e  $\epsilon_{ctu} = 3 \text{ ‰}$ , com o significado indicado na Figura 6.7.

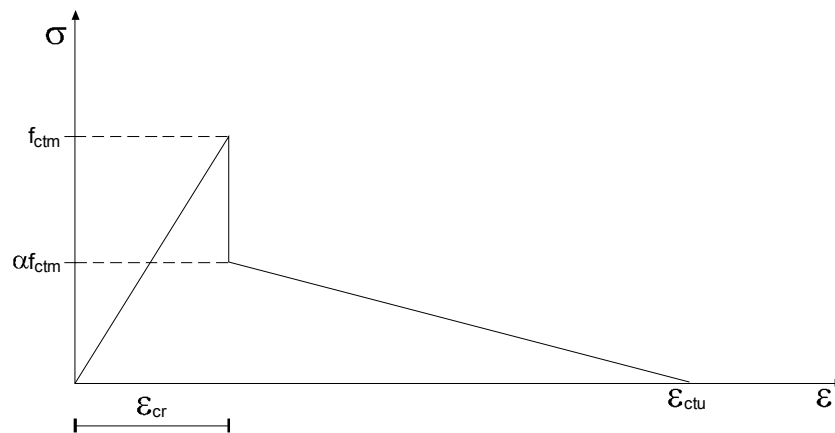
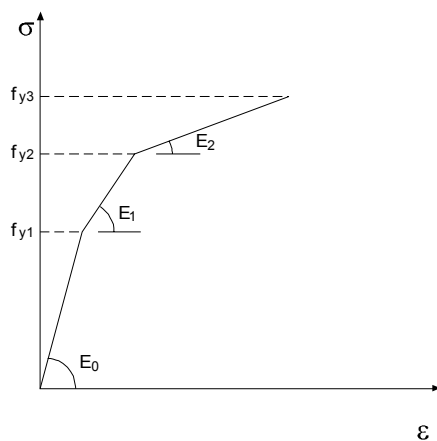
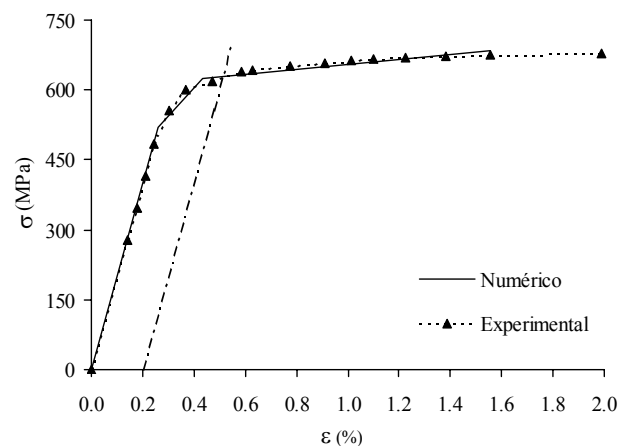


Figura 6.7 - Diagrama de retenção de tensões de tracção para o betão fendilhado.

O aço apresenta um comportamento elástico-plástico, idealizado com base num diagrama trilinear (Figuras 6.8-a e 6.8-b). Ao material compósito, por sua vez, ajustou-se um diagrama linear compatível com as características descritas no item 3.3.3. As percentagens de armaduras de aço e de CFRP utilizadas no cálculo estão discriminadas na Tabela 3.4 do Capítulo 3.



a) Diagrama tipo.



b) Diagrama do ensaio e o numérico.

Figura 6.8 - Diagrama trilinear adaptado ao diagrama de ensaio do aço de  $\phi 6 \text{ mm}$ .

O programa traça o comportamento à flexão de secções compósitas de betão, admitindo uma aderência perfeita entre os materiais. Espera-se um diagrama de momento vs curvatura com a forma ilustrada na Figura 6.9, evidenciando os três estados (I, II, III) principais de comportamento (betão não fendilhado, betão fendilhado e cedência da armadura) e pressupondo que o colapso da estrutura ocorre por ruína do compósito, após cedência da armadura de aço ou por esgotamento da extensão no diagrama do aço.



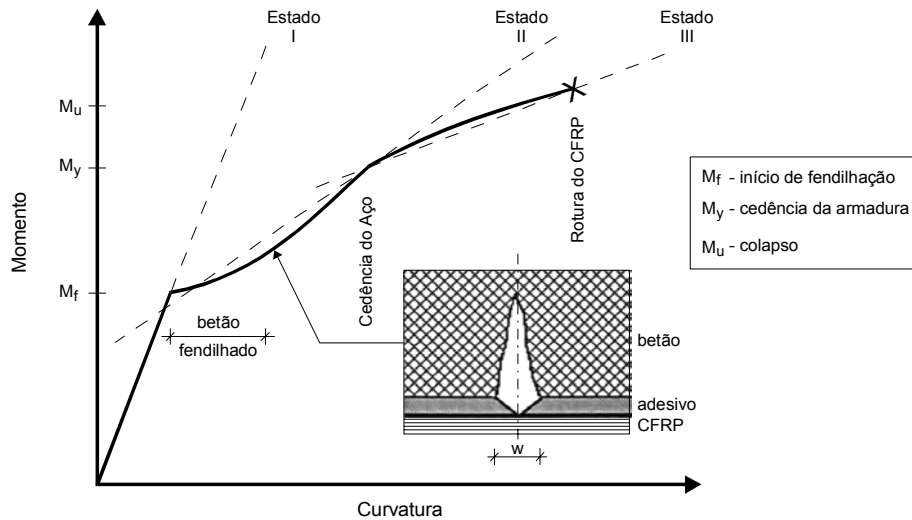


Figura 6.9 - Diagrama de momento vs curvatura de uma estrutura de betão reforçada exteriormente com material composto.

Na Figura 6.10, apresentam-se os diagramas momento vs curvatura previstos para as três situações em estudo, ou seja, os modelos das séries *tipos N, R e S*. Nesta figura, representa-se, também, o diagrama respectivo do modelo da *série com armadura mínima* (protótipo do estado actual da laje superior do tabuleiro da "Ponte de N. S. da Guia") . Pelo desenvolvimento das curvas, verifica-se que há um aumento de resistência, no estado limite último, e uma perda de rigidez, na fase de serviço, dos modelos reforçados (*R e S*) relativamente à laje de referência de betão armado (*N*). Esta foi a solução de equilíbrio adoptada no início deste estudo, para o comportamento previsto numericamente dos modelos de faixas de laje a ensaiar.

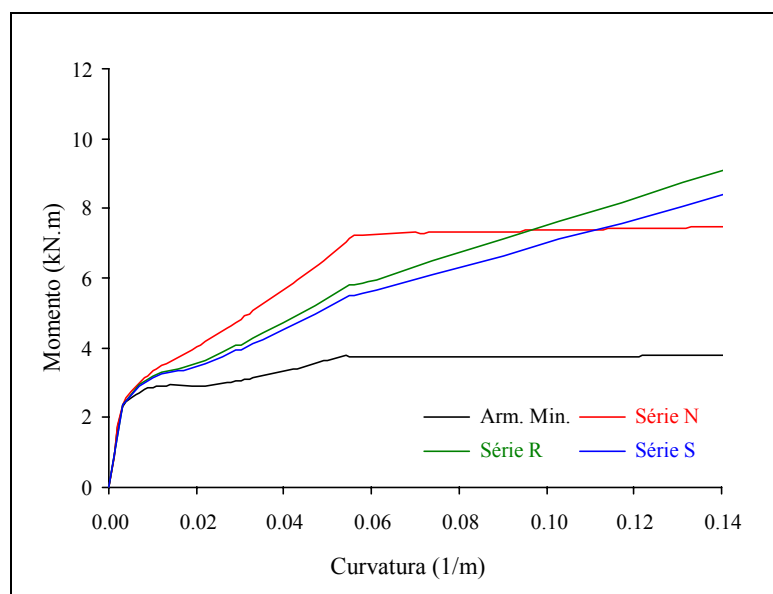


Figura 6.10 - Diagramas de momento vs curvatura dos modelos de laje (resposta numérica).

### 6.3.2 – Análise comparativa das séries

O objectivo desta secção consiste em resumir o comportamento médio do modelo constitutivo de cada uma das *séries*  $N$ ,  $R$  e  $S$ , a partir dos resultados descritos na secção 5.3 do Capítulo 5. Paralelamente, estabelece-se uma análise comparativa entre os modelos reforçados com compósitos de CFRP (a manta  $R$  e o laminado  $S$ ), o modelo de betão armado com resistência similar (laje  $N$ ) e alguns resultados do modelo com armadura mínima (LA1M e LA2M), condicionada a todas as premissas de base deste relatório.

Com o auxílio do programa de cálculo simples descrito no item anterior, procura interpretar-se por via analítica, o comportamento individual das lajes e o desempenho médio das séries, em face da resposta à curva momento vs curvatura central (numérico vs experimental).

#### 1 - Diagramas de comportamento

Em termos gerais, o comportamento médio dos três tipos em estudo pode ser representado sob a forma dos diagramas da relação carga total vs deslocamento central e da relação momento vs curvatura central, nas Figuras 6.11 e 6.12.

Estas figuras obtêm-se a partir das curvas normalizadas experimentais (em termos médios), carga total normalizada vs deslocamento central e momento normalizado vs curvatura central apresentadas no Capítulo 5, estabelecendo-se que os modelos apresentam as dimensões médias de  $8 \times 44 \times 178.5 \text{ cm}^3$  e o betão as características tipo (betão semelhante à da betonagem C):

$$f_{cm,j} = 65 \text{ MPa};$$

$$f_{ctm,j} = 4.5 \text{ MPa}.$$

Para cada uma das três séries, os valores da *carga total* e do *momento* determinam-se pelas equações [Eq-6.1] e [Eq-6.2], respectivamente:

$$\text{i) } \begin{array}{l} \text{Carga total} = \text{Carga total normalizada} \times b \times h \times f_{cm,j} \\ \text{(valor médio)} \end{array} \quad [\text{kN}] \quad [\text{Eq-6.1}]$$

$$\text{ii) } \begin{array}{l} \text{Momento} = \text{Momento normalizado} \times b \times d_s^2 \times f_{cm,j} \\ \text{(valor médio)} \end{array} \quad [\text{kN.m}] \quad [\text{Eq-6.2}]$$

O comportamento dos modelos que constam das *séries*  $N$ ,  $R$ , e  $S$  foi analisado numericamente pelo programa de cálculo exposto no item 6.3.1, determinando-se as curvas de momento vs curvatura central de cada um. Para se efectuar uma análise comparativa mais directa das lajes, os diagramas foram normalizados e, posteriormente, determinadas as médias por série, à semelhança do

procedimento realizado com os resultados experimentais. Para se obterem os diagramas finais (em termos médios) do momento *vs* curvatura central de cada série, exibidos no Capítulo 5 e na Figura 6.12, recorreu-se à equação [Eq-6.2] e aos pressupostos de referência (geometria do modelo e características do betão) admitidos no tratamento dos resultados experimentais.

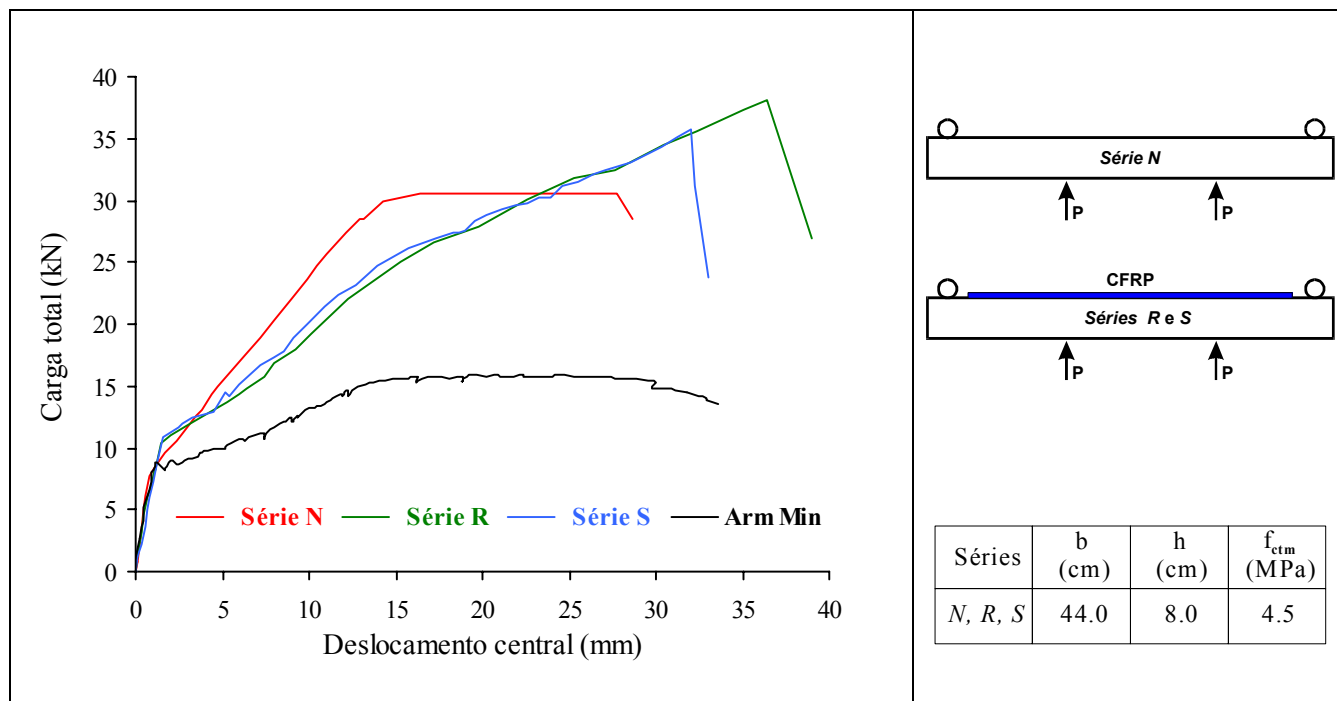


Figura 6.11 – Diagramas carga total *vs* deslocamento central do comportamento médio experimental das séries *N*, *R*, *S* e da armadura mínima (*Arm. Min.*).

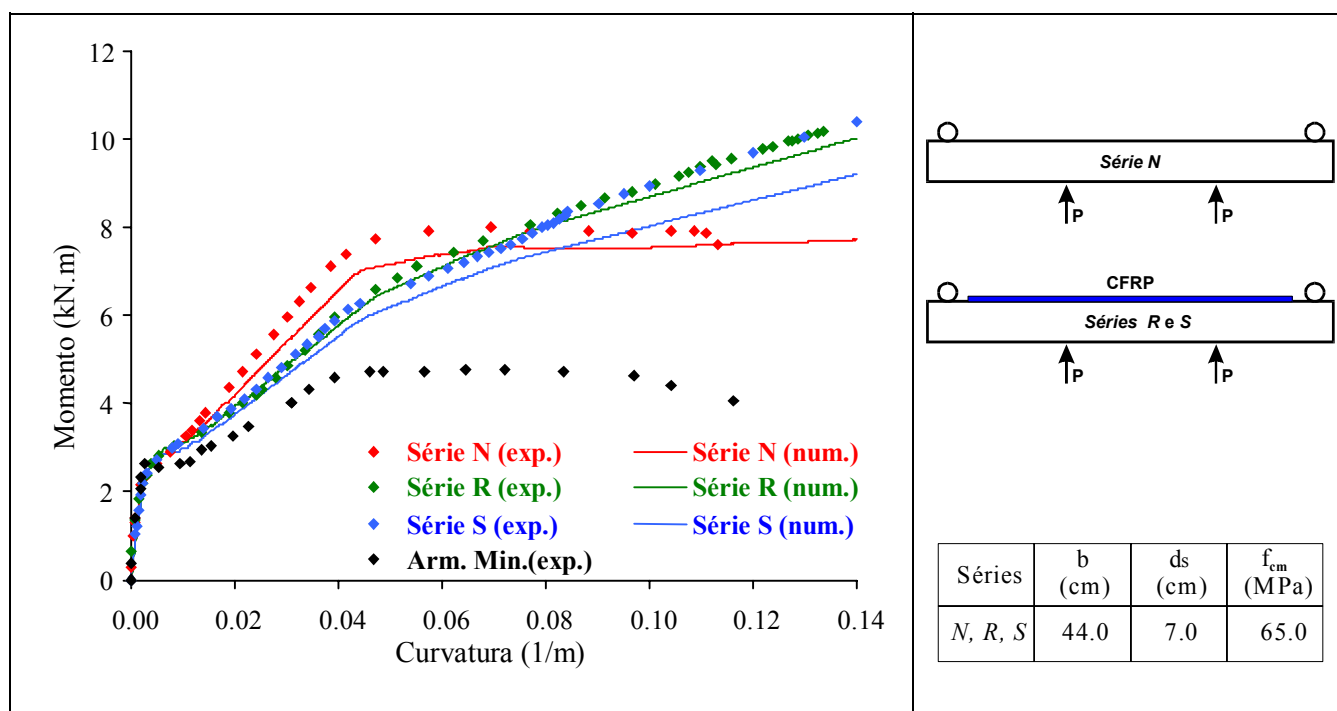


Figura 6.12 – Diagramas momento *vs* curvatura central do comportamento médio experimental e numérico das séries *N*, *R*, *S* e da armadura mínima (*Arm. Min.*).

Em relação à Figura 6.11, apesar da ruína prematura que condicionou a *série S*, para os modelos reforçados (*R* e *S*) comparativamente ao modelo de betão armado (*N*) obteve-se o seguinte:

- i) - um aumento da carga do início de fendilhação;
- ii) - uma diminuição da rigidez em serviço;
- iii)- uma maior resistência;
- iv)- uma maior flecha central última.

Em face do comportamento do modelo de betão com *armadura mínima*, nesta figura destaca-se o aumento significativo (mais do dobro) da rigidez e da resistência experimentadas pelas séries reforçadas *N*, *R* e *S*.

Por outro lado, na outra figura mostra-se que as curvas numéricas previstas para os modelos ajustam-se ao comportamento médio experimental das lajes testadas, tanto em serviço como em estado limite último.

## 2 - Fendilhação

Como se pode observar na Figura 6.13, que inclui a fotografia de cada um dos modelos representativos das séries, o padrão de fendilhação final inscrito na face traccionada das lajes apresenta-se bastante repartido e semelhante, medindo-se um valor médio de afastamento entre fendas de  $s_{rm} = 6.3 \text{ cm}$  a  $6.7 \text{ cm}$ . Em contrapartida, existe alguma diferença na distribuição da fendilhação, se se comparar estas séries com o ensaio de um protótipo de *armadura mínima* (referência *LAIM* e cuja análise se incluirá num trabalho futuro) ilustrado na Figura 6.14. Observa-se que esta série apresenta um valor médio de  $s_{rm} \cong 11.7 \text{ cm}$ , isto é, distingue-se um afastamento entre fendas que é cerca de 1.8 vezes maior do que o valor anterior.

Da análise comparativa das plantas das seis faixas de lajes após a ruína, incluídas nas Tabelas C.21 a C.26 (anexo C), conclui-se que a zona de betão fendilhada desenvolve-se até próximo de  $22.5 \text{ cm}$  (na *série S*) a  $24.5 \text{ cm}$  (na *série R*) das secções de apoio.

O padrão de fendilhação instalado até ao instante anterior à ruína permitiu, sem fendilhação do betão, a formação de comprimentos médios de ancoragem da junta betão-adesivo-CFRP compreendidos entre  $\ell_{t,série S} = 17.3 \text{ cm}$  e  $\ell_{t,série R} = 19.5 \text{ cm}$ , como se justifica na Tabela 6.5 e se ilustra nas plantas das lajes, incluídas nas Tabelas C.23 a C.26 do anexo C.

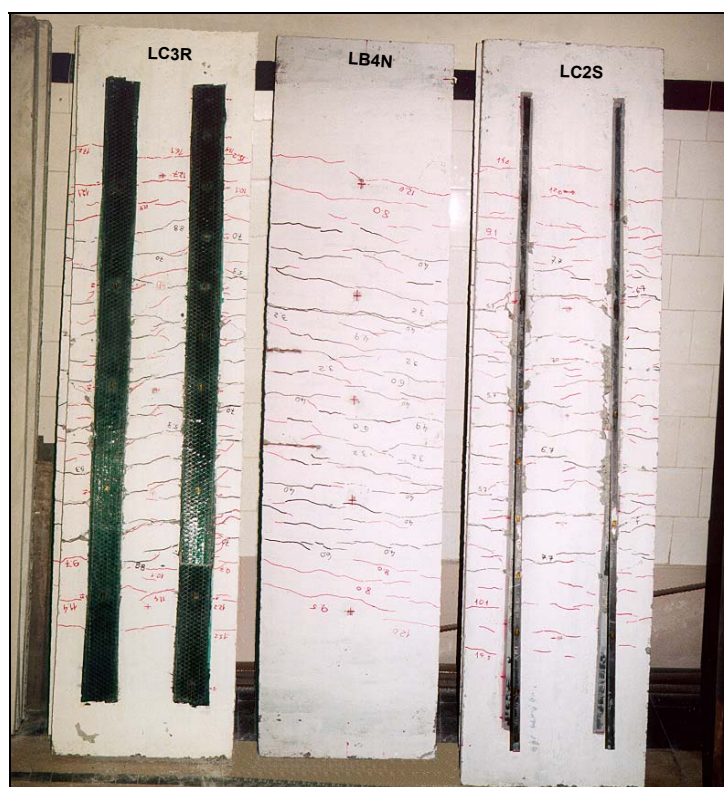


Figura 6.13 – Padrão de fendilhação final obtido nas três séries (*N*, *R* e *S*) com capacidades resistentes semelhantes.

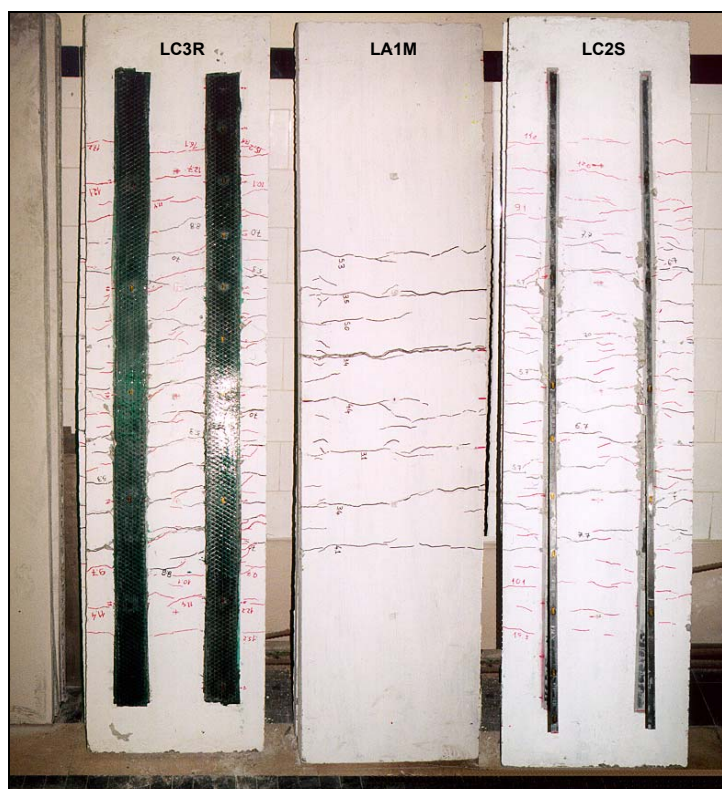


Figura 6.14 – Padrão de fendilhação final instalado nos modelos reforçados com CFRP (séries *R* e *S*) e no modelo de referência *LA1M* (com *armadura mínima*).

Tabela 6.5 - Comprimentos de ancoragem ( $l_t$ ) das séries reforçadas com CFRP.

Série - Laje		$l_{t, série} \text{ (cm)}$ [i]		$l_{t, máx} \text{ (cm)}$ [ii]
		Ensaio [i]	Média	Doc. de homologação
R	LC3R	17.5 / 18.5	19.5	9.1 (8.3)
	LC4R	24.5 / 17.5		
S	LC1S	13.5 / 19.0	17.3	17.7 (15.7)
	LC2S	17.5 / 19.0		

[i] - Informações retiradas das Tabelas C.23 a C.26 e apresentação do valor médio por série;

[ii] - Valor máximo do comprimento de ancoragem determinado pela equação [Eq-2.3] e admitindo-se as características definidas nos Capítulos 3 e 4, excepto quando o (valor) = [Eq-2.3] e  $f_{ctm} = f_{ctm,p}$  (ensaio de "pull-off" resumido na Tabela 4.6).

Do mesmo modo, nesta Tabela expõem-se os valores máximos do comprimento efectivo de ancoragem,  $l_{t, máx}$ , calculados pela equação [Eq-2.3] proposta no documento de homologação do sistema CarboDur (Homologação Nr. Z-36.12-29, 1997). Indicam-se dois valores para cada uma das séries, resultando o primeiro da imposição pela homologação da condição limite máximo para a tensão  $f_{ctm} = 3.0 \text{ MPa}$  (se  $f_{ctm,p} \geq 3.0 \text{ MPa}$ ) e o segundo se se considerar os valores médios das tensões de arrancamento por tracção,  $f_{ctm,p}$  (resumidos na Tabela 4.6 do Capítulo 4), que são superiores ao valor dessa tensão limite.

A principal conclusão a extrair é que a equação [Eq-2.3] conduz a valores muito próximos dos observados experimentalmente, sobretudo, para o comprimento não fendilhado da ligação betão-laminado ( $l_{t, série S}$ ). Por outro lado, constata-se que esta equação é bastante sensível ao valor da espessura do compósito CFRP ( $t_L$ ), conduzindo a valores muito baixos para o comprimento efectivo de ancoragem ( $l_{t, máx}$ ) da ligação betão-mantas flexíveis (série R). A equação conduz a que, quando sistemas de reforço diferentes são colados à mesma superfície de betão, apresentam comprimentos efectivos de ancoragem proporcionais ao termo " $E_L t_L$ ", (por exemplo  $E_L t_L$  (série R) = 0.27  $E_L t_L$  (série S)), sem qualquer dependência da área de colagem (na equação não intervêm a largura do reforço). Nos casos analisados conclui-se existir alguma dependência com o valor da largura do FRP.

### 3 - Comportamento geral

Sob o ponto de vista do comportamento em serviço, as lajes das três séries apresentam as características indicadas na Tabela 6.6, nomeadamente a carga de início de fendilhação ( $P_{fend}$ ), a flecha em serviço ( $a_m$ ) e as taxas que medem as relações das séries R e S com a série N, em termos de força (relação entre inícios de fendilhação -  $TP_{fend}$ ) e de rigidez relativa (relação entre flechas -  $Ta_m$ ). Para além dos aspectos evidenciados, convém salientar que, nesta fase, a perda de rigidez relativa dos

modelos reforçados com compósitos, expressa nas Figuras 6.11 e 6.12, traduz-se no facto da flecha da *série N* representar 76% do valor da *série R* e 82% do valor da *série S*.

Tabela 6.6 - Informações médias do comportamento em serviço.

Propriedades	Séries de laje		
	<i>tipo N</i>	<i>tipo R</i>	<i>tipo S</i>
$P_{fend} \text{ (kN)}$	8.2	10.2	10.7
$TP_{fend} = P_{fend} / P_{fend, N}$	1.0	1.24	1.30
$a_m \text{ (mm)}$ [i]	4.9	6.5	6.0
$Ta_m = a_m / a_{m, N}$	1.0	1.32	1.22
$a_m / \ell$ [ii]	1/326	1/246	1/266

[i] - Flechas obtidas para a carga total de 15 kN, isto é, quando  $P \cong P_{máx, N}/2$  (consultar Tabela 6.7);

[ii] -  $\ell = 1.6 \text{ m}$ .

Por sua vez, relativamente à comparação do comportamento resistente dos modelos, resumem-se na Tabela 6.7 as principais características em termos dos componentes *modelo* e *reforço* (aço e CFRP), ou seja, a capacidade máxima ( $P_{máx}$ ), a flecha máxima em plena resistência ( $\delta_{máx}$ ) e o esforço máximo no aço e nos compósitos ( $F_{máx}$ ). Para completar a análise expõem-se, igualmente, as relações das *séries R* e *S* com a *série N* através dos cocientes indicativos das taxas de reforço em termos de cargas totais últimas ( $T_P$  e  $T_P^*$  calculadas com base na armadura de  $6\phi 6$  e  $3\phi 6$ , respectivamente), de ductilidade da estrutura ( $\delta_{máx} / \ell$ ), de desempenho do compósito em relação à componente de aço de  $3\phi 6$  ( $T_{F, exp}$ ) e os modos de ruína tipo observados nas séries. Para o esforço  $F_{máx}$ , apresentam-se dois valores que resultam, por via experimental:

1 - Do *equilíbrio da secção* para a carga total  $P_{máx}$  e admitindo as equações seguintes:

Série N:

$$0.5 P_{máx} \times \text{braço} = F_{máx, N} \times z_s ; \quad [\text{kNm}] \quad [\text{Eq-6.3}]$$

onde:  $\left\{ \begin{array}{l} \text{braço} = 0.55 \text{ m (ver Figura 3.10);} \\ z_s = 0.95 d_s; \quad [\text{m}] \\ d_s = 0.07 \text{ m;} \end{array} \right.$

$$\left. \begin{array}{l} z_s = 0.95 d_s; \quad [\text{m}] \\ d_s = 0.07 \text{ m;} \end{array} \right\} \quad [\text{Eq-6.4}]$$

Série R e Série S:

$$0.5 P_{máx} \times \text{braço} = F_{máx, N} \times z_s + F_{máx, L} \times z_L; \quad [\text{kNm}] \quad [\text{Eq-6.5}]$$

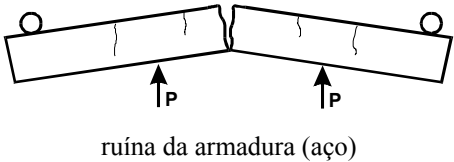
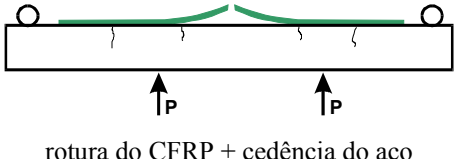
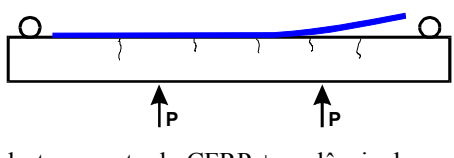
onde:  $\left\{ \begin{array}{l} F_{máx, L} = F_{máx, R} \text{ (série R) e } F_{máx, L} = F_{máx, S} \text{ (série S);} \\ z_L = z_s + (d_L - d_s); \quad [\text{m}] \\ d_L = 0.0801 \text{ m (série R) e } d_L = 0.0806 \text{ m (série S);} \end{array} \right.$

$$\left. \begin{array}{l} z_L = z_s + (d_L - d_s); \quad [\text{m}] \\ d_L = 0.0801 \text{ m (série R) e } d_L = 0.0806 \text{ m (série S);} \end{array} \right\} \quad [\text{Eq-6.6}]$$

2 -Do valor médio obtido da *análise extensométrica* e resumido na Tabela 5.5 (*série R*) ou na Tabela 5.6 (*série S*) do Capítulo 5.

Os dois valores deveriam ser semelhantes, em termos médios, mas aspectos como, por exemplo, o módulo de elasticidade longitudinal do compósito ( $E_L$ ) admitido no cálculo (Capítulo 3) e o desfaseamento de posições entre o extensómetro colado ao modelo e a secção de esforço máximo (secção de fenda) podem conduzir às diferenças de resultados apresentados na Tabela 6.7.

Tabela 6.7 - Informações médias do comportamento resistente em termos de modelo e de reforço.

Lajes (série)	Modelo				Aço e CFRP		Modos de ruína
	$P_{máx}$ (kN) [i]	$T_P/T_P^*$ [ii]	$\delta_{máx}$ (mm) [v]	$\delta_{máx}/\ell$ [vi]	$F_{máx}$ (kN) [iii]	$T_{F, exp}$ [iv]	
<i>Série N</i>	29	1.0/1.0	27.7	1/58	60.0 (-)	1.0 (-)	
<i>Série R</i>	38	1.31/1.61	36.5	1/44	84.33 (73.2)	1.61 (1.47)	
<i>Série S</i>	36	1.24/1.48	33.0	1/48	76.65 (66.4)	1.55 (1.34)	

[i] -  $P_{máx} = 2 \times P_{último}$ ;

[ii] - Taxa de reforço em termos de cargas totais últimas aplicadas às lajes ( $T_P = P_{máx} / P_{máx, N}$ ) e em termos de cargas admitidas na relação entre componentes CFRP vs armadura  $3\phi6$  ( $T_P^* = P_{CFRP} / P_{3\phi6} = 2T_P - 1$ );

[iii] - Esforço no aço ( $F_{3\phi6}$ ) e nos compósitos resultante do equilíbrio da secção para  $P_{máx}$  ou medidos por via experimental onde (valor) = dobro do valor médio de  $F_{máx}$  das Tabelas 5.5 e 5.6;

[iv] - Taxa de desempenho do reforço em termos de esforços calculados (ou medidos) no CFRP em relação à armadura  $3\phi6$ , isto é, valores determinados por:  $T_{F, expR} = F_{máx,R} / F_{3\phi6} \times z_{L,R} / z_s$  e  $T_{F, expS} = F_{máx,S} / F_{3\phi6} \times z_{L,S} / z_s$ ;

[v] - Flechas correspondentes ao início de perda de resistência dos modelos;

[vi] -  $\ell = 1.6 m$ .

As *séries R* e *S* mostram ser mais resistentes e mais dúcteis que a *série N*, como se observa nos incrementos de 20% a 27% do rendimento último e de 1/48 a 1/44 do cociente  $\delta_{máx} / \ell$ , respectivamente, apesar da antecipação da ruína na *série S*, sem o aproveitamento pleno do laminado. Qualquer uma destas séries ultrapassa o dobro da capacidade de carga dos modelos de *armadura mínima*, cujo carga total máxima obtida foi de 13.2 kN (objecto dum trabalho futuro). A nível da



componente de reforço, as parcelas do laminado e da manta mobilizam esforços 55% a 61% superiores aos da parcela de reforço equivalente em aço ( $3\phi 6$ ) da *série N*, segundo o critério de equilíbrio de esforços na secção (1) e valores ligeiramente inferiores a estes, na opção da análise extensométrica (2). Se esta interpretação partir dos resultados globais dos modelos, isto é, com base nas taxas  $T_P^*$ , obtêm-se percentagens compreendidas entre as hipóteses (1) e (2), como seria de esperar.

Recordando as previsões estabelecidas no estudo do projecto de reforço das séries de lajes com os sistemas CFRP unidireccionais (item 3.1.1.2 do Capítulo 3), na Tabela 6.8 confronta-se a relação entre as *taxas previstas* e as *taxas observadas* nos ensaios. Sublinha-se o facto de, nas primeiras, admitir-se sempre a ruína do CFRP e, nas segundas, efectuar-se a determinação com base nas medições próximas dos modos de ruína observados nos ensaios, nem sempre por colapso do compósito (consultar Tabelas C.23 a C.26 do anexo C).

Tabela 6.8 - Relação entre *taxas previstas* e *observadas*.

Modelos de laje	Resistência			Rigidez	
	$T_F$ [i]	$T_F/T_P^*$	$T_F/T_{F,exp}$	$T_K$ [ii]	$T_K/(Ta_m)^{-1}$
<b>Série R</b>	2.2	1.37	1.62	1/2.0	1/1.5
<b>Série S</b>	2.4	1.62	1.87	1/2.3	1/1.9

[i] - Valores determinados na Tabela 3.1 do Capítulo 3;

[ii] - Valores determinados na Tabela 3.2 do Capítulo 3.

Da análise comparativa entre *previsão* e *resultados experimentais* para as séries reforçadas com CFRP (*tipo R* e *tipo S*), conclui-se que:

- i) em *termos de resistência*, expressa nos resultados dos cocientes entre taxas obtidos a nível do comportamento do modelo em geral ( $T_F/T_P^*$ ) e do compósito ( $T_F/T_{F,exp}$ ), as taxas de sobredimensionamento previsto no Capítulo 3 para os modelos com CFRP são de 1.37 a 1.62 (*série R*) e de 1.62 a 1.87 (*série S*) superiores às taxas de desempenho obtidas nos ensaios experimentais respectivos;
- ii) em *termos de rigidez*, a deformação esperada das *séries R* e *S* é de 1.5 e de 1.9 vezes maior do que o valor das flechas obtidas nos testes.

#### 4 - Tensão de corte na junta e modos de ruína

No Capítulo 2, referiu-se que a resistência de uma ligação colada é ditada pelo valor máximo da aderência entre os materiais envolvidos na ligação. Concretamente, na interface betão-adesivo-compósito e atendendo aos modos de ruína teoricamente possíveis (item 2.3.2), o problema surge ao nível da comparação dos valores da resistência ao corte na camada superficial do betão, da resistência coesiva do adesivo e da resistência interlaminar do compósito. Dos três casos, o condicionante será o que apresentar menor valor, adiantando-se que nos casos correntes observados o betão tem sido o principal responsável (item 2.3.3.2).

Da mesma forma, a área de distribuição das tensões rasantes (corte) na interface betão-CFRP é fundamental para garantir a colagem do reforço, compatível com a resistência do betão ao corte, adjacente à interface. Esta distribuição de tensões vai depender, entre outros factores, do padrão de fendilhação que se formou no betão e do adesivo seleccionado, de modo a apresentar resistência à tracção e ao corte superiores ao da camada de base.

Nestas condições, o reforço com laminados pré-fabricados (*série S*) é preterido em favor da manta flexível (*série R*), visto que as tensões de corte de  $3.5\text{ MPa}$  a  $4.9\text{ MPa}$  registadas no primeiro, em relação aos valores de  $1.8\text{ MPa}$  obtidos nos segundos, conduzem ao esgotamento da capacidade de aderência do betão que consiste no valor de cerca de  $3.8\text{ MPa}$  (consultar Tabelas 5.5 e 5.6). Assim, a *série S* apresenta um modo de ruína prematuro por perda do comprimento efectivo de ancoragem e antecipação do destacamento do laminado, em oposição à *série R* que provoca a rotura da manta flexível de CFRP (Tabela 6.7).

Em particular, da observação da zona crítica das extremidades dos laminados de CFRP (consultar as Figuras 5.78 e 5.79 do Capítulo 5), deduz-se que o destacamento prematuro do compósito resultou da coexistência dos modos de ruína, sobretudo a interlaminar do CFRP e a adesiva na interface adesivo-CFRP (também observados por Rostásy e Neubauer). Este facto reforça a ideia partilhada por vários autores (Capítulo 2) de que, em estado limite último, o efeito de "peeling" numa extremidade é devido à acção conjunta da concentração da tensão de corte e da tensão de tracção normal à junta, apesar de esta última não ter sido medida nos ensaios realizados no laboratório.

Outro factor, que favorece a aderência na *série R* e que terá alguma responsabilidade nos modos de ruína constatados, consiste na aplicação nesta série de um primário à superfície de betão, antes da colagem do compósito.

Por último, estes factos repercutem-se no nível de rendimento do desempenho do compósito, traduzido no valor baixo da tensão normal da *série S* (ordem de  $55\% f_{Lu}$ ), relativamente ao valor elevado da mesma tensão obtida na *série R* (de  $70\% f_{Lu}$  a  $100\% f_{Lu}$ ).

### 5 - Alguns aspectos de controlo e de garantia de qualidade

A concluir esta análise comparativa, refira-se que a garantia do êxito de um reforço com a técnica de colagem de compósitos de CFRP ao betão, passa por, além dos aspectos já descritos nesta secção, integrar três pontos importantes que foram sendo abordados ao longo dos Capítulos 2 a 4 e que se enquadram nos procedimentos de controlo de qualidade e de garantia de qualidade deste método (ACI 440F, 1999; JCI TC952, 1998).

#### (i) - Inspeção e preparação da superfície

O engenheiro deve definir qual o procedimento adequado para a preparação da superfície do betão (base de ligação com a armadura adicional), em face das condições existentes na estrutura e do sistema de reforço adoptado, de modo a que possa desenvolver-se suficiente resistência à tracção directa e ao corte, na transferência de esforços entre si e o sistema compósito.

O controlo da rugosidade, da humidade, da temperatura, do padrão inicial de fendilhação da superfície a reforçar e a exigência de um valor mínimo de tensão de aderência (por ensaio de "pull-off") de cerca de  $1.4 \text{ MPa}$  a  $1.5 \text{ MPa}$  (referidos no Capítulo 2), originam um critério para o despiste das ruínas por descolamento na superfície de contacto betão-adesivo.

#### (ii) - Inspeção do compósito de CFRP

A nível de projecto é fundamental o conhecimento completo das propriedades do material compósito, antes e depois de aplicado, na execução de um reforço estrutural. Assim se compreende a compatibilidade que existe entre as fases de *projecto* e de *desempenho real* da estrutura. A alteração das propriedades do material (entre o previsto e o medido), após a sua aplicação, pode implicar a incompatibilidade das duas fases, suscitando alguma desconfiança no comportamento esperado para a estrutura. Este aspecto é, sobretudo, crucial nos sistemas de CFRP curados "in situ", uma vez que os sistemas pré-fabricados podem ser acompanhados por documentos de homologação do compósito publicados por instituições estatais credíveis como, por exemplo, os emitidos pelo DIBt na Alemanha. A degradação no tempo dessas mesmas propriedades não deve ser preterida, também, em favor somente das informações estáticas sobre os materiais.

Para desbloquear a situação, é sempre necessário realizar ensaios com protótipos próximos das condições finais pretendidas, mas com algumas reservas que serão salvaguardadas pelos coeficientes de segurança. A *série R* reforçada com manta flexível inclui-se nestas condições, onde o grau de cura, a impregnação e o alinhamento das fibras, a espessura do CFRP e as propriedades finais do compósito dependem do critério de aplicação. Pelo contrário, o reforço com o laminado pré-fabricado da *série S* apresenta características constantes e independentes da aplicação, condicionadas na homologação Nr. Z-36.12-29 (1997).

Contudo, os dois sistemas apresentam, ainda, aspectos que não estão esclarecidos na literatura internacional, como o comportamento a longo prazo.

*(iii) - Inspeção do primário, do adesivo e do estado da colagem*

O controlo do tipo, da espessura, do estado de cura e das deficiências de espalhamento do sistema adesivo (primário e adesivo) é muito importante, para estabelecer-se quais as características da junta de ligação, sob o ponto de vista da *adesão* nas interfaces (betão-adesivo e CFRP-adesivo) e da *coesão* interna do material. O processo de cura é influenciado, sobretudo pela temperatura e humidade do ambiente no caso das resinas polimerizadas à temperatura natural, como as usadas nas *séries R* e *S*.

Deste modo, durante a confecção e espalhamento do adesivo (*Sikadur 30*), da resina de saturação (resina *L700W*) ou do primário (*PS 301*) e suas posteriores identificações, é imperativo registar-se por cada mistura realizada a data, as proporções de combinação, as condições higrotérmicas do ambiente e da superfície e outros factores que possam afectar as propriedades (ACI 440F, 1999). Dessa mistura, devem constituir-se provetes, a curar "in situ", e ensaiados em seguida, para controlo da caracterização do adesivo.

Após a colagem da armadura adicional de material compósito, deve ser empreendida a detecção de anomalias, recorrendo a um método de inspeção que seja capaz de registar destacamentos, vazios ou delaminações com área de cerca de  $13 \text{ cm}^2$  ou superior. Geralmente, estes métodos são do tipo *análise acústica simples* (suaves pancadas sobre o CFRP), *ultrasons* e métodos *termográficos* (ACI 440F, 1999).

### 6.3.3 - Conclusões

A previsão do comportamento médio de modelos de betão armado, reforçados por colagem de armaduras exteriores de material compósito (FRP), é representada satisfatoriamente pelas curvas de

desempenho obtidas através do modelo de cálculo numérico utilizado neste capítulo, apesar do comportamento mais flexível resultante para as faixas de lajes da *série S*.

De um modo geral, o programa experimental desenvolvido com base nos protótipos reduzidos de faixas de laje demonstram que é verosímil o projecto de reforço da laje do tabuleiro da "Ponte de Nossa Senhora da Guia" (em Ponte de Lima), atingindo-se o objectivo principal que consiste em duplicar a capacidade resistente actual.

A técnica de colagem de armaduras adicionais a elementos de betão existentes, através dos dois sistemas compósitos reforçados com fibras de carbono unidireccionais em estudo (o *laminado pré-fabricado* e a *manta flexível e pré-impregnada*), conduziu a resultados que manifestam, em relação ao modelo de betão armado de resistência equivalente, um aumento de 24% a 30% da carga do início de fendilhação, uma diminuição da rigidez em serviço de cerca de 22% a 32%, um aumento médio da resistência e da flecha central última na ordem de 27% e de 25%.

O comportamento geral das lajes reforçadas com os dois sistemas de CFRP é semelhante, entre si, apesar dos laminados pré-fabricados serem mais permissivos a ruínas prematuras e ao efeito de "peeling" nas extremidades livres. A área de distribuição das tensões rasantes (corte) na interface betão-CFRP é fundamental para garantir a colagem do reforço, compatível com a resistência do betão ao corte, adjacente à interface. Nestas condições, o reforço com laminados pré-fabricados (*série S*) é preterido em favor da manta flexível (*série R*), visto que as tensões de corte de 3.5 MPa a 4.9 MPa registadas no primeiro, em relação aos valores de 1.8 MPa obtidos nos segundos, conduzem ao esgotamento da capacidade de aderência do betão que consiste no valor de cerca de 3.8 MPa. Assim, a *série S* apresenta um modo de ruína prematuro por perda do comprimento efectivo de ancoragem e antecipação do destacamento do laminado, em oposição à *série R* que provoca a rotura da manta flexível de CFRP.

Um factor, que favorece a aderência na *série R* e que terá alguma responsabilidade nos modos de ruína constatados, consiste na aplicação nesta série de um primário à superfície de betão, antes da colagem do compósito.

O pré-dimensionamento do compósito, admitindo como pressuposto o valor da extensão última de cálculo do CFRP de  $\varepsilon_{Lud} = 8 \text{ ‰}$  (Capítulo 3), traduziu-se, na realidade, num critério satisfatório de segurança para o desempenho do compósito. No geral, em estado limite último a sua deformação atingiu valores médios na ordem de  $\varepsilon_{máx} \cong 10.5 \text{ ‰}$ , isto é, obtiveram-se relações médias de cerca de  $\varepsilon_{máx} \cong 1.3 \varepsilon_{Lud}$  em relação ao pré-dimensionamento e de  $\varepsilon_{máx} \cong 3.3 \varepsilon_{sy}$  em face da deformação do

aço ( $\phi 6$  tem  $\varepsilon_{sy} = 3.18\%$ ). Por outro lado, o seu rendimento manifestou-se no valor baixo da tensão normal da *série S* (ordem de  $55\% f_{Lu}$ ), relativamente ao valor elevado da mesma tensão obtida na *série R* (de  $70\%$  a  $100\% f_{Lu}$ ).

A aplicação das expressões indicadas por [Eq-2.2], para o *valor médio da força máxima de ancoragem* e por [Eq-2.3], para o *valor máximo do comprimento efectivo de ancoragem* aos dois sistemas de reforço estudados, conduziram a resultados mais ajustados relativamente ao comportamento experimental dos laminados pré-fabricados. Nestes, as diferenças observadas nos valores entre a aplicação da primeira equação e os resultados experimentais (Tabela 5.6 do Capítulo 5) deve-se, sobretudo à definição da largura do laminado ( $b_L$ ), que nas condições estipuladas nos exemplos testados da *série S*, admite-se atribuir um valor colaborante superior à da faixa de reforço (que é de  $1.6\text{ cm}$ ), devido à mobilização de alguma rigidez do adesivo *Sikadur 30*, espalhado nos lados do laminado (pormenor da Figura 5.71). Constatou-se, também, que a segunda equação é sensível ao termo  $E_L t_L$  (módulo de elasticidade  $\times$  espessura do compósito) e, principalmente, à interpretação do parâmetro espessura ( $t_L$ ) quando se tratam dos sistemas de FRP curados "in situ" e, em especial, nas situações de reforço com várias camadas de mantas flexíveis polimerizadas no local.

Por último, é necessário instituir na prática de aplicação desta técnica de colagem, princípios de controlo e garantia de qualidade, que englobem, para além de outros, primeiro a inspecção e a preparação da superfície e após a execução do reforço, a avaliação do estado do compósito de CFRP, do adesivo e da colagem.



# Capítulo 7

---

## Considerações Finais

As soluções futuras poderão estar, em parte, nos *novos materiais*. A revolução dos materiais prevista durante os anos 60 para ocorrer na viragem deste milénio tem consistido mais numa *evolução* do que numa *revolução*. Em engenharia civil, é mais difícil adquirir a confiança em novas soluções e novos materiais do que destruí-la. Sendo assim, torna-se essencial recorrer a *projectos piloto* que permitam ensinar através dos erros cometidos e convencer, quer os empresários quer as entidades oficiais ligadas à construção civil, sobre as múltiplas opções no emprego dos compósitos reforçados com fibras (FRP), para a reparação, a reabilitação e o reforço de estruturas. Até hoje, existem mais de 500 casos de aplicações em todo o mundo e não há registos assinaláveis de nenhum colapso estrutural (Meier, 1995).

Apesar dos materiais compósitos de FRP não poderem ser considerados como substitutos directos do aço, apresentam características potenciais que, sob o ponto de vista do conhecimento das propriedades dos materiais sujeitos a várias condições e diversos ambientes, permitem reconhecer que um reforço com FRP pode introduzir um enorme impulso à construção de estruturas de Engenharia Civil.

Nestas situações, a prática de vários autores descrita no Capítulo 2 tem demonstrado que o sucesso da técnica de colagem de sistemas de CFRP (laminados ou mantas) ao betão é completo, se as premissas forem, nomeadamente, o fácil manuseamento, a resistência à corrosão, a fadiga e o condicionamento arquitectónico. O facto mais importante a reter não é o *preço por kg* dos materiais compósitos, mas sim o *custo real* da reabilitação de uma estrutura, considerando a sua esperança de vida e os valores das alternativas. Num futuro imediato, os modernos materiais podem ser a chave para melhoramentos na engenharia de obras de arte, não só para reforço de tabuleiros, como também para os casos de reforço de vigas de pontes com vãos extensos ou na reabilitação de pilares com avarias.

Contudo, o conhecimento do seu comportamento nestas circunstâncias dependerá, fortemente, das conclusões a extrair da realização de um número alargado de projectos de investigação. Deve ser atribuída particular atenção à caracterização dos novos compósitos de CFRP, quanto ao seu comportamento a *curto e longo prazo*, à interpretação da *aderência* na junta de ligação, à prevenção de *ruínas prematuras* sobretudo por efeito de "peeling" nas extremidades livres da armadura



adicionada e à necessidade de se estabelecer códigos e normas de procedimentos, para os projectos e para a execução de estruturas.

Nesse sentido, o principal motivo que norteia este trabalho desenvolvido no Departamento de Engenharia Civil da FEUP é o de criar, entre investigadores, o espírito de divulgação e de discussão dos seus sucessos e deficiências, em benefício da integração efectiva e segura dos novos materiais de CFRP na construção. O trabalho foi estabelecido, basicamente, a partir duma *componente experimental* orientada para o reforço de estruturas de betão armado (vigas e faixas de laje) por colagem de armaduras de material compósito com a utilização, em particular, de dois sistemas constituídos por fibras de carbono (CFRP) unidireccionais: *o laminado pré-fabricado* e a *manta flexível e pré-impregnada*.

Durante este trabalho, foram surgindo problemas e levantadas questões, alguns do conhecimento geral da revisão bibliográfica, outros de natureza nova, aos quais se ajustaram soluções e cujos resultados principais são concluídos neste Capítulo e ainda outros a serem solucionados num futuro próximo. Como tal, discriminam-se a seguir as principais informações, as conclusões gerais, as recomendações e os desenvolvimentos futuros, que possam contribuir para a formação dos princípios do comportamento desta técnica de reforço.

## 7.1 - PRINCIPAIS INFORMAÇÕES

O trabalho de investigação exposto conduziu à realização genérica dos objectivos propostos nos Capítulos 1 e 3. O estudo experimental efectuado permite apontar as seguintes informações principais:

- i) - O primeiro contacto com o comportamento real de modelos reduzidos de vigas e de faixas de laje de betão reforçados exteriormente com materiais compósitos de CFRP, particularmente, o laminado pré-fabricado tipo *CarboDur S 512* da Sika e a manta flexível e pré-impregnada de referência *Replark 20* do sistema Replark, disponíveis agora no mercado nacional;
- ii) - A confiança nas características mecânicas, físicas e químicas dos novos materiais de reforço, ou seja, o laminado de CFRP, a manta flexível de CFRP, o adesivo de epóxido e o primário;

- iii) -A influência, no modo de ruína e no comportamento da interface betão-adesivo-compósito de CFRP, de aspectos como:
- o estado físico e mecânico do betão existente a reforçar;
  - a preparação das superfícies de colagem (betão e compósito);
  - a resistência de aderência da ligação colada e o critério para a sua avaliação;
  - o sistema compósito de reforço;
  - a área de colagem do CFRP ao betão;
  - o sistema de ancoragem das extremidades do laminado (vigas).
- iv) -A quantificação dos esforços de tracção no compósito e de transferência por corte ao longo da interface betão-CFRP para vários níveis de carga, incluindo a carga de cedência e a de pós-cedência (em alguns casos);
- v) - A avaliação de parâmetros de comparação, em serviço e em estado limite último, do comportamento de lajes de betão armado com lajes reforçadas por dois sistemas de CFRP, modelos com capacidade resistente similar;
- vi) -A análise comparativa das respostas experimental e numérica de alguns exemplos ensaiados, em certa medida, com vista a certificar sobre os modelos constitutivos utilizados nos programas de cálculo e a interpretar aspectos associados à aderência na interface betão-adesivo-compósito, nomeadamente a lei de distribuição de esforços de transferência entre o betão e o compósito.

O programa experimental desenvolvido com base nos protótipos reduzidos de faixas de laje demonstram que é positiva a resposta ao desafio lançado no início do trabalho, quanto à viabilidade do projecto de reforço da laje superior do tabuleiro da "Ponte de Nossa Senhora da Guia" (Ponte de Lima), por colagem de qualquer dos dois sistemas de CFRP, atingindo-se o objectivo principal, que consiste na duplicação da capacidade resistente actual.

## 7.2 - CONCLUSÕES GERAIS

As diversas conclusões a extrair do trabalho foram devidamente assinaladas nos Capítulos precedentes, pelo que apenas as mais relevantes serão enumeradas nos parágrafos seguintes.

(i) - *Estado actual do conhecimento*

A pesquisa e síntese bibliográfica sobre o reforço das estruturas de betão por aplicação da técnica de colagem de armaduras de material compósito de FRP indica, claramente, existir uma elevada divergência de opiniões relativamente aos aspectos mais importantes. Todavia, aceitam-se como critérios de prevenção satisfatórios, principalmente, os derivados dos estudos experimentais acerca da análise da aderência na interface betão-adesivo-compósito (capacidade de aderência, força máxima de ancoragem e comprimento efectivo de ancoragem), a identificação dos modos de ruína e a prevenção dos colapsos prematuros, sobretudo devidos ao efeito de "peeling" nas extremidades de interrupção da armadura adicional. Apesar de se encontrarem alguns registos sobre resultados do comportamento a longo prazo dos sistemas de FRP, verifica-se que estes estão ainda limitados a um período máximo de *15 anos*, aquém do desejável para período de vida útil de uma estrutura. Dignas de registo são as publicações sobre a certificação dos sistemas laminados pré-fabricados de CFRP (documentos de homologação do "Deutches Institut für Bautechnik - DIBt" sobre os produtos, os critérios de dimensionamento e o processo de aplicação) e os documentos sobre recomendações para o dimensionamento e aplicação dos sistemas de FRP no reforço e reabilitação de estruturas de betão do JSCE (1997), do JCI TC952 (1998) e do ACI 440F (1999).

(ii) - *Comportamento geral*

A técnica do reforço, utilizando a colagem de laminados de CFRP a modelos de vigas, resulta num melhoramento significativo da capacidade última de carga e num menor acréscimo da rigidez à flexão. O reforço de vigas pré-fendilhadas, nestas condições e sem o cuidado de selagem das fendas, proporcionou um comportamento semelhante às não fendilhadas, apesar da maior ductilidade obtida naquelas.

A mesma técnica de colagem de armaduras adicionais a faixas de laje, através de dois sistemas compósitos em estudo (o laminado e a manta) conduziu a resultados que manifestam, em relação ao modelo de betão armado de resistência equivalente, um acréscimo da carga de início de fendilhação, uma diminuição da rigidez em serviço e um acréscimo da resistência e da flecha central última.

Os modos de ruína observados nos modelos reforçados à flexão (vigas e lajes) são do tipo dúctil e frágil e apresentam um aspecto semelhante aos modos previstos por outros programas de investigação, resumidos no Capítulo 2. Nunca se obteve a ruína do laminado de *CarboDur S 512*, porque este conduziu ao esgotamento da resistência ao corte do betão proporcionando, assim, o destacamento antecipado do laminado. Em contrapartida, foi alcançada a rotura do compósito no caso da manta *Replark 20*.

*(iii) - Preparação da superfície*

O controlo da rugosidade, da humidade, da temperatura, do padrão de fendilhação e da deterioração da camada superficial do betão a reforçar origina um critério para o despiste das ruínas, por falta de aderência no contacto betão-adesivo. Constatou-se que o grau de rugosidade do betão, pretendido para o reforço com sistemas *laminados pré-fabricados*, é diferente do definido para os sistemas de *mantas flexíveis curadas "in situ"*. Nos primeiros, recomenda-se a limpeza do betão com a passagem de jacto de areia ou de um martelo de agulhas e, nos segundos, o polimento com um esmeril e a projecção de um jacto de ar, de modo a obter-se uma superfície lisa com exposição dos inertes. Após aspiração da superfície, melhora-se a adesividade entre a resina de saturação (adesivo) e o betão, com o espalhamento obrigatório de um primário.

*(iv) - Aderência da ligação colada*

O êxito de um reforço numa estrutura depende, entre outros factores, da aderência entre o CFRP e o betão, ao longo do comprimento da ligação. O mau condicionamento na preparação da superfície (imperfeições), o desenvolvimento de um padrão de fendilhação intenso no betão, a concentração de tensões rasantes no betão entre fendas e a redução progressiva do comprimento de colagem (delaminações intercalares) são os principais responsáveis pelo esgotamento da aderência e o destacamento prematuro do compósito, com conseqüente sub-aproveitamento do material. Este efeito é frequente no comportamento com os laminados, pondo em questão o uso apropriado destes nas circunstâncias dos modelos ensaiados, sobretudo, sem a intervenção de mecanismos de fixação externos.

De entre os ensaios de aderência conhecidos até ao momento, neste trabalho, estabeleceu-se o ensaio de arrancamento por tracção como norma e avaliou-se a aderência da ligação entre compósitos e superfícies de betão, pelo valor da tensão de tracção resultante deste ensaio, de acordo com os pressupostos da pré-norma prEN 1542 (1998) e desde que este seja igual ou superior a  $1.4 \text{ MPa}$  (ACI 440F, 1999) ou  $1.5 \text{ MPa}$  (CEB-GTG 21, 1990; Homologação Nr.Z-36.12-29, 1997). Contudo, sublinha-se que este critério de interpretação da aderência para uma ligação colada ao betão é susceptível de flutuações devido a condicionantes, como o número de amostras ensaiadas, o estado superficial do betão em termos de limpeza, de fendilhação e de deterioração, a execução ou não de pré-carotagem da superfície na zona da amostra e o tipo de cola usada na fixação das pastilhas ao betão.

O grau de deterioração do betão (carbonatação, penetração de cloretos, etc.) de um modelo pode alterar as propriedades mecânicas da interface, na adesão entre os materiais e, sobretudo, na

resistência ao corte do betão. Betões de baixa classe de resistência reduzem, também, a aderência de uma ligação colada.

*(v) - Efeito de extremidade*

A disposição de ancoragens nas extremidades (colocação do laminado sob os apoios realizada nos ensaios de vigas) produziu um aumento da carga última da estrutura, evitando o aparecimento prematuro do efeito de "peeling" no laminado. Embora este aspecto não tenha sido explorado no trabalho, relembra-se que alguns autores (Capítulo 2) indicam que a adição de mecanismos de fixação dos laminados traccionados, de preferência ao longo de todo o comprimento da junta, criam forças de compressão transversais à ligação com efeitos benéficos, sobre os mecanismos de ruína prematura. Por exemplo, os documentos de homologação do iBMB sugerem a aplicação de chapas metálicas em "L" e, recentemente, convertidas em laminado de CFRP com forma de "L", com vantagem acrescida para a resistência ao corte da estrutura de betão.

*(vi) - Critérios de estudo prévio*

O pré-dimensionamento do compósito, admitindo como pressuposto o valor da extensão última de cálculo do CFRP de  $\varepsilon_{Lud} = 8\text{‰}$  (isto é,  $\varepsilon_{Lud} \cong 0.5 \varepsilon_{Luk}$  e  $\varepsilon_{Lud} \leq 5 \varepsilon_{sy}$  definidos no Capítulo 2), traduziu-se num critério satisfatório de segurança para o desempenho das faixas de laje reforçadas, proporcionando um rendimento de valor aceitável a nível de tensões de tracção no laminado (ordem de  $55\% f_{Lu}$ ), relativamente ao bom resultado da mesma tensão obtida na manta (de  $70\%$  a  $100\% f_{Lu}$ ).

Nos dois sistemas de reforço estudados, a aplicação das equações [Eq-2.3] e [Eq-2.3] para cálculo dos termos  $T_{m,máx}$  e  $\ell_{t,máx}$ , conduziu à ideia geral de que se ajustam melhor aos compósitos do tipo laminado pré-fabricado, do que ao caso das mantas flexíveis e pré-impregnadas.

### **7.3 - RECOMENDAÇÕES**

Perante as informações e conclusões gerais apresentadas sobre o trabalho experimental comparativo realizado neste programa de investigação, foi possível, nesta fase, isolar os principais *pontos críticos* esperados para uma estrutura de betão reforçada com CFRP. Para estes pontos, descrevem-se algumas acções de recomendação, de modo a prevenir, a atenuar ou a melhorar situações indesejáveis que possam surgir e, globalmente, otimizar o desempenho das estruturas.

*(i) - Betão*

A sua contribuição é fundamental para a concretização da transferência de esforços entre o reforço e a estrutura. O êxito desta transferência depende do valor da capacidade de aderência, que se pretende ser semelhante ao valor da resistência à tracção e, no conjunto, estes serem os maiores admissíveis para a classe de betão. Nesse sentido, a preparação da superfície do betão deve ser cuidada e melhorada, por meio da aplicação de um *primário*.

*(ii) - Primário e Adesivo*

O êxito de um reforço numa estrutura depende, entre outros aspectos, da caracterização do estado real do primário aplicado na superfície, do adesivo espalhado na ligação do CFRP ao betão (caso dos *laminados*) e da resina de saturação final do compósito (caso das *mantas flexíveis*). Através do conhecimento do estado de cura e do comportamento perante a variação da temperatura (informações obtidas com o ensaio de DMTA), acrescidos da caracterização mecânica do material (ensaios de tracção, de flexão e determinação do módulo de elasticidade) e da inspecção da qualidade final da ligação, é possível estabelecer quais as características da junta de ligação, sob o ponto de vista *da adesão* nas interfaces e *da coesão* interna do material.

*(iii) - Modos de ruína e compósito*

De entre os vários modos possíveis, alguns não devem ocorrer no estado de cedência de uma estrutura reforçada com material compósito. Por exemplo, no caso de vigas reforçadas com laminados, para se reduzir ou eliminar o destacamento das extremidades por efeito de “peeling” (concentração de tensões normais de tracção e tensões de corte), deve actuar-se sobre uma zona próxima das extremidades do laminado da seguinte forma (Capítulo 2):

- criar cintas transversais por meio de varões pós-tensionados ou estribos metálicos planos e em forma de "L";
- ou colocar cintas de material compósito pré-impregnado de modo a envolver o laminado e, parcialmente, a alma das vigas;
- ou, ainda, instalar um sistema de pregagem de uma chapa transversal no betão, que comprima o laminado sem perfuração deste (não interrompendo a continuidade das fibras).

As situações de ruína prematura por destacamento do laminado ao longo de um corte no betão adjacente à interface betão-laminado devem ser, igualmente, melhoradas. Nestes casos, pode-se intervir, segundo as directrizes que se descrevem:

- avaliar correctamente o estado mecânico do betão superficial (com ou sem deterioração), eliminando a espessura necessária para garantir uma superfície adequada de aderência betão-laminado;
- melhorar a aderência entre o betão e o adesivo, através da preparação da superfície a envolver na colagem, por meio da aplicação de um primário;
- estabelecer um comprimento mínimo para a ancoragem do laminado, de modo a permitir a transferência de esforços adequada (homologação Nr.Z-36.12-29, 1997);
- controlar o rendimento do compósito através da limitação das tensões de corte na interface, de maneira a que estas sejam próximas das da resistência superficial à tracção do betão, por ajuste da área de colagem do compósito CFRP ao betão;
- adição de sistemas exteriores de fixação dos laminados ao betão, de preferência ao longo de todo o comprimento da junta, com vantagem para a resistência ao corte.

Em termos gerais, o comportamento de um material compósito pode ser otimizado, se se admitir que este trabalhe 60% da sua capacidade resistente à tracção (principalmente o *laminado*) e beneficie pela adição de várias camadas, com vista a aumentar a resistência e a rigidez (fundamental nas *mantas flexíveis*). A utilização de sistemas compósitos polimerizados, *in situ*, deve ser sempre acompanhada de ensaios, a posteriori, de caracterização mecânica do material nas condições locais de cura e aplicação.

(iv) – *Projecto e execução*

Embora este estudo não integre uma componente analítica para o pré-dimensionamento nem um plano criterioso para execução da técnica de reforço, convém referir que, nesta fase dos trabalhos, a prevenção deve incidir ao nível da:

- definição de um *critério de cedência* para o comportamento da ligação betão-adesivo-laminado, que previna o destacamento do laminado do betão junto às fendas e evite a plastificação da armadura interna em serviço e que se repercuta no desenvolvimento da lei de distribuição das tensões normais e de corte na interface da ligação (até à cedência),

no estabelecimento das leis constitutivas dos materiais e, ainda, na definição dos coeficientes de segurança para cálculo;

- criação de um estado de confiança para o êxito da reparação através da realização obrigatória de um conjunto de acções de controlo e garantia de qualidade na fase de execução (ensaios de caracterização dos materiais) e de pós-execução (monitorização e observação da obra), normalizados num caderno de encargos.

Em síntese, conclui-se que foi concretizado um passo em frente no sentido da confiança a depositar no comportamento de estruturas de betão reforçadas com materiais compósitos. Desde que os pressupostos referidos ao longo desta secção sejam cumpridos nas várias fases do trabalho, é positiva a resposta ao desafio lançado no início deste trabalho, quanto à viabilidade do reforço de estruturas em betão com a adição de materiais compósitos de CFRP (a manta ou o laminado). A selecção de um dos produtos analisados para a execução da proposta base do reforço, prende-se com a análise ponderada de cada um, sobre os requisitos seguintes:

- 1 - vantagens e desvantagens circunstanciais;
- 2 - encargos financeiros;
- 3 - idoneidade da entidade que vai executar a tarefa.

#### **7.4 - DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Apesar de se considerar que foram esclarecidas as principais questões e problemas resultantes do trabalho experimental sobre a técnica de colagem de armaduras de CFRP ao betão, existem, decerto, outras dificuldades relacionadas com a novidade deste tema, que merecem ser discutidas e desmistificadas cientificamente. Não obstante as limitações referidas ao longo do processo de trabalho, podem ainda ser integradas, com relativa facilidade e num futuro próximo, os desenvolvimentos de alguns aspectos como:

- i) - A interpretação da resistência da ligação colada betão-adesivo-CFRP, através do estabelecimento de ensaios adequados de aderência (tração e corte), definição da lei constitutiva da junta e normalização de critérios de cedência dos materiais intervenientes;
- ii) - O estudo de mecanismos de fixação externos para as armaduras de CFRP coladas, com vista a prevenir as ruínas de delaminação prematuras, aumentar o rendimento do desempenho do compósito no reforço e ampliar a capacidade resistente ao corte, sobretudo de estruturas de betão em forma de elementos de viga;



iii) -A análise de repercussão da componente a "longo prazo" nas propriedades físicas, mecânicas e químicas dos sistemas de CFRP para reforço de estruturas de betão, em face de ensaios acelerados em laboratório ao nível da durabilidade, da história de carga e do comportamento ao fogo.

Nos desenvolvimentos futuros que se prevêem para o alargamento do conhecimento sobre a aplicação da técnica de colagem de sistemas de FRP a estruturas de betão, convém considerar os seguintes factores:

- i) - Definição de critérios de dimensionamento para projectos de reforço e/ou reabilitação de estruturas de betão armado e betão pré-esforçado;
- ii) - Estabelecimento de um caderno de encargos normalizado, com integração de critérios de controlo e garantia de qualidade dos sistemas de FRP e respectivas técnicas de aplicação;
- iii) -Investigação dos sistemas *laminados pré-fabricados* e dos *polimerizados "in situ"* em áreas, como o reforço de estruturas em pedra ou madeira de preservação histórica, o reforço de alvenarias ao sismo e a reabilitação de pilares de pontes.

Finaliza-se mais uma contribuição para o aumento do conhecimento e da confiança a introduzir na engenharia, sobre a utilização de compósitos reforçados com fibras, FRP, na esperança de que os ensinamentos descritos no trabalho se ajustem, o melhor possível, às soluções dos nossos problemas. O homem pode sempre dispor de *um recurso*, de modo a impulsionar *um sistema* para o *seu objectivo*, cada vez mais próximo, à semelhança da cenoura que acciona, direcciona e presegue o instinto do animal para uma trajectória, como se representa na Figura 7.1.

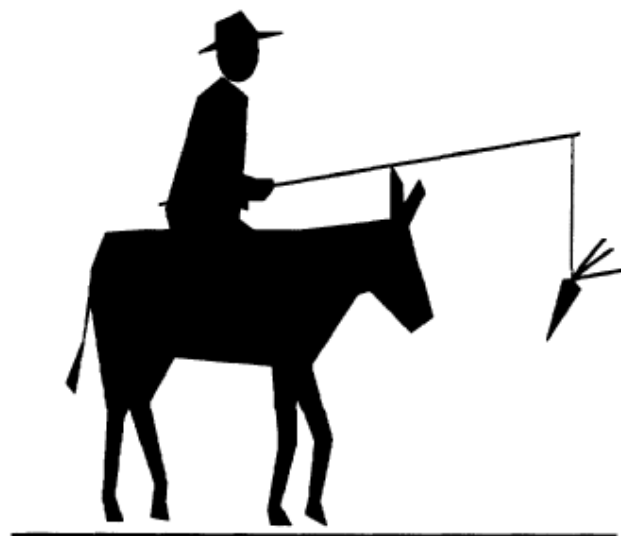


Figura 7.1 - O animal procurará sempre alcançar a cenoura colocada à sua frente.

# Capítulo 8

## Referências

- "Introduction to Composites", 1992, 2nd edition, SPI Composites Institute, NY.
- ABDELRAHMAN, A. e RIZKALLA, S., 1997, "*Design of concrete members prestressed by FRP*", texto de apoio do curso "Design and Retrofit of Structures with Fiber Composites", the Canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures (ISIS Canada), ICCI'98, Janeiro de 1998, Arizona, 63 pp.
- ACI 440F, 1999, "*Guidelines for the selection, design and installation of fiber reinforced polymer (FRP) systems for externally strengthening concrete structures*", American Concrete Institute, ACI Comitê 440, Sub-Comitê 440F, Fevereiro, 57 pp. (versão de trabalho).
- ACI 440H, 1999, "*Provisional design recommendations for concrete reinforced with FRP bars*", American Concrete Institute, ACI Comitê 440, Sub-Comitê 440H, Janeiro, 206 pp. (versão provisória n.º3).
- ACI 440R-96, 1996, "*State of the art report on fiber reinforced plastic reinforcement for concrete structures*", reported by ACI Committee 440, Manual prático de betão, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 68 pp.
- ACMBS-I, 1992, "*Advanced composite materials in bridges and structures - I*", proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference ACMBS/MCAPC, editados por K. W. Neale e P. Labossière, Sherbrooke, Canadá, 705 pp.
- ACMBS-II, 1996, "*Advanced composite materials in bridges and structures - II*", proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference ACMBS/MCAPC, editado por Mamdouh El-Baldry, Montréal, Canadá, Agosto, 1027 pp.
- ADINI, R., RAHMAN, H., BENMOKRANE, B. e KOBAYASHI, K., 1998, "*Effect of temperature and loading frequency on the fatigue life of a CFRP-bar in concrete*", proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Composites in Infrastructure, ICCI'98, Tucson, Arizona, Janeiro, pp. 203-210.
- ALFAIATE, J., 1986, "*Reforço por adição de elementos metálicos em vigas de betão armado – flexão simples*", Tese de Mestrado em Engenharia de Estruturas, Instituto Superior Técnico (IST), Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Agosto, 75 pp.
- AL-SULAIMANI, G. J., SHARIF, A., BASUNBUL, I. A., BALUCH, M. H. e GHALEB, B. N., 1994, "*Shear repair for reinforced concrete by fiberglass plate bonding*", ACI Structural Journal, vol. 91, n.º 3, Julho-Agosto, pp. 458-464.
- AMMANN, J. W., 1995, "*Hilti plate bonding technique: an integral system for structural repair and strengthening*", proceeding of the ACI Technical Session - Repair and strengthening with adhesive bonded plates, Washington, editado por R.N. Swami e R. Gaul, Março, pp. 55-72.
- ANDO, N., MATSUKAWA, H., HATTORI, A. e MASHINA, M., 1997, "*Experimental studies on long-term tensile properties of FRP tendons*", proceedings of the 3<sup>rd</sup> Int. Symp. on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), JCI, Japão, pp. 203-210.
- APPLETON, J. e GOMES, A., 1997, "*Reforço de estruturas de betão armado por adição de armaduras exteriores*", Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, n.º 41, Janeiro, literatura de apoio do curso de "Durabilidade, Reparação e Reforço de Estruturas de Betão", 23 Junho-11 Julho, Instituto Superior Técnico (IST), Lisboa, 18 pp.
- APPLETON, J. e SILVA, V., 1995, "*Strengthening of reinforced concrete beams by external reinforcement*", proceedings of Int. Symp., IABSE, São Francisco, USA, Agosto, pp. 1179-1184.
- ARDUINI, M. e NANNI, A., 1997, "*Behavior of precracked RC beams strengthened with carbon FRP sheets*", Journal of Composites for Construction, ASCE, vol. 1, n.º 2, Maio, pp. 63-70.

- ARDUINI, M., DI TOMMASO, A. e MANFRONI, O., 1995, "*Fracture mechanisms of concrete beams bonded with composite plates*", proceedings of the 2<sup>nd</sup> International RILEM Symposium of Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPCS-2), Ghent, Bélgica, Agosto, pp. 483-491.
- ASHBY, M.F., 1987, "*Technology of the 1900s: advanced materials and predictive design*", Phil. Trans. of the Royal Soc. of London, A322, pp. 393-407.
- BARROS, J.A.O., 1995, "*Comportamento do betão reforçado com fibras - análise experimental e simulação numérica*", Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, FEUP, Dezembro, 492 pp.
- BLASCHKO, M., NIEDERMEIER, R. e ZILCH, K., 1998, "*Bond failure modes of flexural members strengthened with FRP*", proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Composites in Infrastructure - ICCI'98, Editado por Saadatmanesh e Eshani, University of Arizona, Tucson, USA, Janeiro, vol I, pp. 315-327.
- BRESSON J., 1971, "*Nouvelles recherches et applications concernant l'utilisation des collages dans les structures*", Beton Plaque Annales de l'Institut Tecnique du Batiment et Travaux Publics, N° 278.
- BRITO, M., 1986, "*Caracterização do comportamento dos plásticos reforçados com vista a aplicações estruturais*", LNEC, Dep. de Materiais de Construção, Núcleo de Cerâmica e Plásticos, Proc. 23/11/7460, Vols. I, II e III. Outubro, Lisboa.
- BROSENS, K. e VAN GEMERT, D., 1997, "*Anchoring stresses between concrete and carbon fibre reinforced laminates*", proceedings of the 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on FRPRCS-3, editado por Japan Concrete Institute, Sapporo, Japão, Outubro, pp. 271-278.
- BROSENS, K. e VAN GEMERT, D., 1999, "*Stress analysis in the anchorage zones of externally bonded CFRP laminates*", proceedings of the Int. Conf. of Infrastructure Regeneration and Rehabilitation, Improving the Quality of Life Through Better Construction, a vision for the Next Millenium, University of Sheffield, Sheffield, Junho, pp. 931-940.
- BUDELMANN, H. e ROSTÁSY, F.S., 1993, "*Creep rupture behavior of FRP elements for prestressed concrete - phenomenon, results and forecast models*", proceedings of the ACI International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures, Vancouver, Canada, Março, pp.87-100.
- BÜYÜKÖZTÜRK, O. e HEARING, B., 1997, "*Failure investigation of concrete beams retrofitted with FRP laminate*", proceedings of the Us-Canada-Europe Workshop on Bridge Engineering, editado por Urs Meier and Raimondo Betti, Zurich, Suiça, Julho, pp. 107-114.
- BÜYÜKÖZTÜRK, O. e HEARING, B., 1998, "*Failure behavior of precracked concrete beams retrofitted with FRP*", ASCE, Journal of Composites for Construction, Vol. 2, N° 3, Agosto, pp. 138-144.
- CARBOPONTE, 1996, "*Reforço de pontes com compósitos avançados*", Projecto de I&D em Consórcio, Medida 3.1b no âmbito do Programa Quadro da União Europeia do Programa PRAXIS XXI.
- CDCC'98, 1998, "*Durability of fiber reinforced polymer (FRP) composites for construction*", proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference, Quebec, Canadá, Agosto, 692 pp.
- CEB - GTG 21, 1990, "*Redesign of concrete structures*", Redesign of Concrete Structures, Novembro.
- CEB-FIP, 1993, Comité Euro-International du Béton - CEB-FIP Model Code 1990 - Design code, editado por Thomas Telford.
- CHAALLAL, O., NOLLET, M.J. e PERRATON, D., 1997, "*Renforcement au cisaillement de poutres en béton armé par des lamelles composites collées à l'aide de résine époxy*", Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 212, réf. 4148, Novembro-Dezembro, pp. 87-93.
- CHAJES, M. J., FINCH, W.W., e MERTZ, D. R., 1995-a, "*Development of probability-based fatigue resistance of advanced composite material-to-concrete adhesive bonds*", proceedings of the 1995 American Society of Civil Engineers Structures Congress, Boston, Massachusetts, pp. 1450-1453.
- CHAJES, M.J., FINCH, W.W., JANUSZKA, T.F. e THOMSON, T.A., 1996, "*Bond and force transfer of composite material plates bonded to concrete*", ACI Structural Journal, vol. 93, n° 2, pp. 208-217.

- CHAJES, M.J., JANUSZKA, T.F., MERTZ, D.R., THOMSON, T. A. e FINCH, W.W., 1995-b, "*Shear strengthening of reinforced concrete beams using externally applied composite fabrics*", ACI Structural Journal, Vol. 92, pp. 295-303.
- CHAJES, M.J., KARBHARI, V.M., MERTZ, D.R., KALIAKING, V.N., FAQIRI, A., e CHAUDHRI, M., 1993, "*Rehabilitation of cracked adjacent box beam bridges*", proceedings of the NSF Symposium on Practical Solutions for Bridge Strengthening and Rehabilitation, Sponsored by NSF, Des Moines, Iowa, Abril, pp. 265-274.
- CHAJES, M.J., MERTZ, D.R., e THOMSON, T.A., 1994-a, "*Durability of composite material reinforcement*", proceedings of the American Society of Civil Engineers 3<sup>rd</sup> Materials Engineering Conference, ASCE, San Diego, California, pp. 598-605.
- CHAJES, M.J., THOMSON, T. A., JANUSZKA, T.F. e FINCH Jr, W. W., 1994-b, "*Flexural strengthening of concrete beams using externally bonded composite materials*", Construction and Building Materials, vol. 8, n° 3, Maio, pp. 191-201.
- COSTEIRA SILVA, P., 1999, "*Modelação e análise de estruturas de betão reforçadas com CFRP*", Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), DECivil, Porto, Junho, 254 pp.
- COUTINHO, M.J.A.R.S., 1998, "*Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da cofragem*", Tese de Doutoramento em Engenharia Civil pela Universidade do Porto, FEUP, Departamento de Engenharia Civil, Porto, Julho, 392 pp.
- CSA, 1996, "*Canadian highways bridge design code, section 16, fiber reinforced structures*", Canadian Standards Association, 28 pp.
- D0128, 1995, "*Nachträgliche verstärkung von bauwerken mit CFK-lamellen*", reforço de estruturas por colagem de laminados de CFK (CFRP), publicação da série - Documentos SIA, Sociedade Suíça de Engenheiros e de Arquitectos, Zurich, Setembro.
- D0144, 1997, "*Erhaltung von betontragwerken*", conservação de estruturas em betão, publicação da série - Documentos SIA, Sociedade Suíça de Engenharia e de Arquitectos, Zurich, Outubro, 80 pp.
- DE SOUZA, R. H. F., 1990, "*Análise do comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão e ao esforço transversal*", Tese de Doutoramento em Engenharia Civil pela Universidade Técnica de Lisboa, IST, Departamento de Engenharia Civil, Lisboa, Junho, 319 pp.
- DE SOUZA, R.H.F., APPLETON, J. e RIPPER, T., 1998, "*Avaliação do desempenho de compósitos armados com tecidos de fibras de carbono como elemento de reforço de vigas de betão armado*", actas das Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, JPEE 98, LNEC, Lisboa, Novembro, pp. 479-488.
- DESKOVIC, N., 1991, "*Innovative method of prestressing structures with externally bonded FRP composites*", Tese de Mestrado, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, Massachusetts, USA, Fevereiro, 174 pp.
- DEURING, M., 1993, "*Verstärken von Stahlbeton mit gespannten Faserverbundwerkstoffen*", Tese de Doutoramento, ETH, Eidgenössischen Technischen Hochschule, Diss. ETH n° 10199, Zurich, 279 pp.
- DEURING, M., 1996, "*Efficient strengthening by using the Sika CarboDur-System*", Sika AG Zürich, Switzerland, CFK-COPP. DOC 2, 15 pp.
- DUSSEK, I.J., 1974, "*Strengthening of bridge beams and similar structures by means of epoxy-resin-bonded external reinforcement*", Transport Research Record, National Research Record, n° 785, Washington, USA, pp. 21-24.
- ECCM-8, 1998, "*Science, technologies and applications*", proceedings of the 8<sup>th</sup> European Conf. on Composite Materials, editado por Ignazio C. Visconti, Woodhead Publishing Limited, Naples, Itália, Junho (3 volumes).
- EMMONS, P.H., VAYSBURD, A.M., THOMAS, J. e VADOVIC, M., 1997, "*Strengthening of concrete structures-state of the art and future needs*", proceedings of the Int. Composites EXPO'97, session rebars, reinforcements and repairs: Composites to the rescue, Nashville, Tennessee, EUA, Janeiro, pp. 1-12.
- EUROCÓDIGO 2, 1991, "*Design of concrete structures*", Comité Européen de Normalization (CEN).

- EUROCOMP, 1996, "*Structural design of polymer composites - EUROCOMP design code and handbook*", the European Structural Polymeric Composites Groups, editado por John L. Clarke, E& FN Spon, ISBN 0419194509, Londres, 751 pp.
- FIGUEIRAS, J., JUVANDES, L.F.P. e OLIVEIRA, L.P., 1999, "*Reforço experimental da laje do tabuleiro da ponte N.S. da Guia em Ponte de Lima*", relatório técnico integrado no projecto PRAXIS XXI - medida 3.1 B de título - CARBOPONTE: reforço de pontes com compósitos avançados, DECivil, FEUP, Porto, Abril, 48 pp.
- FRANKE, L., 1981, "*Behavior and design of high-quality glass-fiber composite rods as reinforcement for prestressed concrete members*", report, International Symposium, CP/Ricem/i Bk, Prague, 52 pp.
- FRPRCS-2, 1995, "*Non - metallic (FRP) reinforcement for concrete structures-2*", proceedings of the 2<sup>nd</sup> Int. RILEM Symp. FRPRCS-2, editado por L. Taerwe, Ghent, Bélgica, Agosto, 714 pp.
- FRPRCS-3, 1997, "*Non - metallic (FRP) reinforcement for concrete structures-3*", proceedings of the 3<sup>rd</sup> Int. Symp. FRPRCS-3, editado por Japan Concrete Institute, Sapporo, Japão, Outubro, 1541 pp. (2 volumes).
- GANGARAO, H. e VIJAY, P.V., 1997, "*Aging of structural composites under varying environmental conditions*", proceedings of the 3<sup>rd</sup> Int. Symp. on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), JCI, Japão, Outubro, pp. 91-98.
- GOMES, A. e VIEGAS, P., 1998, "*Ensaio de uma viga reforçada à flexão e ao esforço transversal com adição de chapas de aço de grande espessura*", actas das Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, JPEE 98, LNEC, Lisboa, Novembro, pp. 459-468.
- GORTY, S.S., 1994, "*Mechanical properties of composite cables*", Tese de Mestrado, South Dakota School of Mines & Technology, Rapid City, pp. 21-33.
- GREEN, M., BISBY, L., BEAUDOIN, Y. e LABOSSIERE, P., 1998, "*Effects of freeze-thaw action on the bond of FRP sheets to concrete*", proceedings of the 1<sup>st</sup> Int. Conf. on Durability of Composites for Construction, CDCC'98, Sherbrooke, Canadá, Agosto, pp. 179-190.
- HAMELIN, P., VARASTEHPOUR, H. e LAGARDE, G., 1995, "*Le renforcement des ouvrages d'art par des armatures composites*", proceedings of the Journées Européennes sur des Matériaux Composites, Paris, França, Abril.
- HENRIQUES, A.A.R., 1998, "*Aplicação de novos conceitos de segurança no dimensionamento do betão estrutural*", Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, FEUP, Porto, Fevereiro, 522 p.
- HOLZENKÄMPFER, P., 1994, "*Ingenieurmodelle des verbundes geklebter bewehrung für betonbauteile*", Tese de Doutoramento, TU Braunschweig, Helf 108, Alemanha.
- HOMOLOGAÇÃO DE CONSTRUÇÃO NR. Z-36.12-29, 1997, "*Verstärkungen von Stahlbeton-und Spannbetonbauteilen durch schubfest aufgeklebte Kohlefaserlamellen – Sika CarboDur*", autorização geral de construção dada pelo Deutsches Institut Fur Bautechnik (DIBt), Berlim, Novembro, 28 pp.
- HOMOLOGAÇÃO DE CONSTRUÇÃO NR. Z-36.12-54, 1998, "*Verstärkung von Stahlbetonbauteilen durch mit dem Baukleber ispo Concretin SK 41 schubfest aufgeklebte S&P Kohlefaserlamellen*", autorização geral de construção dada pelo Deutsches Institut Für Bautechnik (DIBt), Berlim, Outubro, 31 pp.
- HORIGUCHI, T. e SAEKI, N., 1997, "*Effect of test methods and quality of concrete on bond strength of CFRP sheet*", proceedings of the 3<sup>rd</sup> Int. Symp. on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), JCI, Japão, pp. 265-270.
- HORIGUCHI, T., SAEKI, N. e HATA, S., 1995, "*Fatigue of reinforced concrete beams externally prestressed with aramid fibre cables*", proceedings of the 2<sup>nd</sup> International RILEM Symposium of Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPCS-2), Ghent, Bélgica, Agosto, pp. 601-607.
- HULL, D., 1981, "*An introduction to composite materials*", Cambridge University Press, Cambridge, England.
- ICCI'96, 1996, "*Fiber composites in infrastructure*", proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Composites in Infrastructure –ICCI'96, editados por H. Saadatmanesh e M. R. Ehsani, University of Arizona, Tucson, USA, Janeiro, 1231 pp.

- ICCI'98, 1998, *"Fiber composites in infrastructure"*, 1998, proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Composites in Infrastructure - ICCI'98, editados por H. Saadatmanesh e M. R. Ehsani, University of Arizona, Tucson, USA, Janeiro, 1506 pp. (2 volumes).
- ISO 6721-5, 1995, *"Plastics - determination of dynamic mechanical properties"*, Part 5: Flexural vibration - non - resonance method, International Standard ISO, Genève, Suíça, Março, 15 pp.
- IYER, S.L., e ANIGOL, M., 1991, *"Testing and evaluation fiber glass, graphite and steel cables for pretensioned beams"*, proceedings of the Specialty Conference on Advanced Composite Materials in Civil Engineering Structures, ASCE, Las Vegas, Fevereiro, pp. 44-56.
- JCI TC952, 1998, *"Continuous fiber reinforced concrete"*, relatório técnico do JCI, comité técnico em betão reforçado com fibras contínuas (TC952), editado por JCI, Tokyo, Japão, Setembro, 164 pp.
- JONES R., SWAMY, R. N. e SALMAN, F. A. R., 1985, *"Structural implications of repairing by epoxy bonded steel plates"*, proceedings of the 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Structural Faults & Repair, London, Abril-Maio, pp. 75 -79.
- JONES, R., SWAMY, R.N. e CHARIF, A., 1988, *"Plate separation and anchorage of reinforced concrete beams strengthened by epoxy - bonded steel plates"*, the Structural Engineer, vol. 66, n.º 5, 1, Março, pp. 85-94.
- JORNADAS DE ESTRUTURAS DE BETÃO, 1996, *"Betões de elevado desempenho - novos compósitos"*, actas das 1<sup>as</sup> Jornadas de Estruturas de Betão, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), DECivil, Porto, Outubro, 233 pp.
- JORNADAS DE ESTRUTURAS DE BETÃO, 1998, *"Comportamento em serviço de estruturas de betão"*, actas das 2<sup>as</sup> Jornadas de Estruturas de Betão, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), DECivil, Porto, Abril, 230 pp.
- JPEE 98, 1998, *"Jornadas portuguesas de engenharia de estruturas"*, actas das Jornadas JPEE 98, GPPE, GPBE, LNEC, OE, editadas por S. Pompeu Santos e Manuel Pipa, Novembro, 932 pp.
- JSCE, 1997, *"Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing material"*, editado por Atsuhiko Machida, Comité de investigação em materiais de reforço com fibras contínua, JSCE, Concrete Engineering Séries, n.º 23, Tokyo, Japão, Outubro, 325 pp.
- JUVANDES, L., 1996, *"Comportamento de estruturas de betão reforçadas com laminados de material compósito"*, actas das 1<sup>as</sup> Jornadas de Estruturas de Betão, Betões de Elevado Desempenho - novos compósitos, FEUP, Porto, Outubro, pp. 171-184.
- JUVANDES, L., ESTEVES, J. L., FIGUEIRAS, J. A., BRITO, F. M. e MARQUES, A. T., 1997-a, *"Characterization of composite materials and adhesion systems to be used in the reinforced of concrete beams"*, proceedings of the Int. Conf. of New Technologies in Structural Engineering - NEW TECH, editado por S. Pompeu Santos e António M. Baptista, IABSE, FIP, vol. 1, LNEC, Lisboa, Julho, pp. 329-336.
- JUVANDES, L., ESTEVES, J.L., FIGUEIRAS, J.A. e MARQUES A. T., 1998-e, *"Comparasion des differents systèmes composites a matrice polymérique pour le renfort/rehabilitation de structures en béton"*, proceedings of the ARQUIMACOM 98 – Conf. Int. sur les Matériaux Composites en Architecture, Construction et Genie Civil, Bordeaux, Outubro, pp. 421-426.
- JUVANDES, L., FIGUEIRAS, J. A. e MARQUES, A. T., 1997-b, *"Strengthening of concrete beams with CFRP laminates"*, proceedings of the US-Canada-Europe Workshop on Engineering, editado por Urs Meier e Raimondo Betti, Zurich, Julho, pp. 83-90.
- JUVANDES, L., FIGUEIRAS, J. A. e MARQUES, A. T., 1998-g, *"Performance of concrete beams strengthened with CFRP laminates"*, ICCI'98, proceedings of the 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Composites in Infrastructure, Tucson, Arizona, Janeiro, pp. 126-137.
- JUVANDES, L., FIGUEIRAS, J.A e DIAS, S.J.E., 1998-f, *"Estudo comparativo da eficiência do reforço com CFRP de lajes de betão"*, actas das Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, JPEE 98, LNEC, Lisboa, Novembro, pp. 141-150.

- JUVANDES, L., FIGUEIRAS, J.A. e MARQUES A. T., 1998-a, "*Comportamento experimental de vigas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP*", 1º relatório experimental, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), DECivil, Porto, Maio, 164 pp.
- JUVANDES, L., FIGUEIRAS, J.A. e MARQUES A. T., 1998-c, "*Deterioration RC beams strengthening with CFRP laminates*", proceedings of the XVI<sup>th</sup> Academic Meetings of Civil Engineering – The construction in their environment, Civil Engineering Dep. of Academic Institute of Technology (IUT) of Reims, France, Abril, pp. 65-72.
- JUVANDES, L., FIGUEIRAS, J.A. e MARQUES A. T., 1998-d, "*Tests on RC beams with CFRP laminates*", proceedings of the XVI<sup>th</sup> Academic Meetings of Civil Engineering – The construction in their environment, Civil Engineering Dep. of Academic Institute of Technology (IUT) of Reims, France, Abril, pp. 98-105.
- JUVANDES, L., FIGUEIRAS, J.A. e MARQUES, A.T., 1996-b, "*The use of composite materials for building construction*", proceedings of the ARQUIMACOM '96 - Conf. Int. sobre Materiales Compuestos en Arquitectura y Construcción, Sevilha, Outubro, pp. 465-476.
- JUVANDES, L., FIGUEIRAS, J.A. e MARQUES, A.T., 1999, "*Tests on RC beams strengthened with CFRP laminates*", proceedings of the Int. Conf. of Infrastructure Regeneration and Rehabilitation, Improving the Quality of Life Through Better Construction, a vision for the Next Millenium, University of Sheffield, Sheffield, Junho, pp. 973-982.
- JUVANDES, L., MARQUES A. T. e FIGUEIRAS, J.A., 1996-a, "*Materiais compósitos no reforço de estruturas de betão*", relatório técnico, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), DECivil, Porto, Março, 112 pp.
- JUVANDES, L., MARQUES A.T. e FIGUEIRAS, J.A., 1996-c, "*Reforço de estruturas de betão com materiais compósitos*", in actas do 6º Encontro Nacional do Grupo Português de Pré-esforçado, Betão Estrutural 1996, LNEC, Lisboa, Novembro, pp. 2175-2186.
- JUVANDES, L., SALVADOR, J.E.D e FIGUEIRAS, J.A., 1998-b, "*Comportamento experimental de faixas de laje de betão armado reforçadas com compósitos de CFRP unidireccionais*", 2º relatório experimental, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), DECivil, Porto, Dezembro, 117 pp.
- KAISER, H., 1989, "*Strengthening of reinforced concrete with epoxy-bonded carbon-fiber plastics*", Tese de Doutoramento, Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH), ETH Nr.8918, Zurich, 224 pp.
- L'HERMITE, R., 1967, "*L'application des colles et resines dans la construction*", La beton a coffrage portant, Annales l'Institut Technique, nº 239.
- L'HERMITE, R., 1977, "*Use of bonding techniques for reinforcing concrete and masonry structures*", Materiaux et Constructions, vol. 10, nº 56, Março - Abril, pp. 85-89.
- LADNER, M. e WEDER, Ch., 1981, "*Concrete structures with bonded external reinforcement*", report n.º206, EMPA - Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, Dübendorf, 60 pp.
- LNEC FE-Pa36, 1986, "*Revestimento de paredes - ensaio de arrancamento por tracção*", ficha de ensaio, MHOP-Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Edifícios, Núcleo de Comportamento das Construções, Lisboa, Abril, 3 pp.
- LOURENÇO, P.L.B.B., 1992, "*Observação experimental do comportamento de vigas de betão*", Relatório da Aula Teórico-prática, Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica, Dep. Eng<sup>a</sup> Civil da Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Outubro, 84 pp.
- MAEDA, T., ASANO, Y., SATO, Y., UEDA, T. e KAKUTA, Y., 1997, "*A study on bond mechanism of carbon fiber sheet*", proceedings of the 3<sup>rd</sup> Int. Symp. on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), JCI, Japão, pp. 279-286.
- MALEK, A. M., 1997, "*Analytical study of reinforced concrete beams strengthened with fiber reinforced plastic plates (fabrics)*", Tese de Doutoramento, Universidade de Arizona, Dep. Eng. Civil e Eng. Mecânica, Tucson, Arizona, 163 pp.

- MARQUES, A. T., 1982, "*Introdução aos materiais poliméricos*", texto de apoio à disciplina de Materiais de Construção II da licenciatura em Engenharia Mecânica, (DEMEC) FEUP, Porto.
- MAYS, G.C. e RAITHBY, K.D., 1985, "*Bonded external reinforcement for strengthening concrete bridges*", Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, 70 pp.
- MEIER, H., 1998, "*CFRP L-shaped plates*", Schweizer Ingenieur und Architekt SI+A, nº 43, versão em Inglês, Sika, EMPA, Zürich, pp. 1-3.
- MEIER, U. e KAISER, H.P., 1991, "*Strengthening of structures with CFRP laminates*", proceedings of the Speciality Conf. on Advanced Composites Materials in Civil Engineering Structures, editado por Srinivasa L. Iyer, Las Vegas, ASCE, New York, Janeiro-Fevereiro, pp. 224-232.
- MEIER, U., 1987, "*Bridge repair with high performance composite materials*", Material und Technik, Vol. 15, nº 4, pp. 125-128.
- MEIER, U., 1992, "*Carbon fiber-reinforced polymers: Modern materials in bridge engineering*", International Association for Bridge and Structural Engineering, IABSE, Structural Eng. International, Vol. 2(1), Zurich, pp. 7-12.
- MEIER, U., 1995, "*Applications of composites to structural strengthening*", NAFEMS research working group seminar, Composites in Infrastructure Design and Rehabilitation, editado por V. Peshkam, Londres, Novembro, pp. 1-4.
- MEIER, U., 1997-a, "*Repair using advanced composites*", proceedings of the International Conference of Composite Construction - Conventional and Innovative, IABSE, Innsbruck, Austria, Setembro, pp. 113-124.
- MEIER, U., 1997-b, "*Post strengthening by continuous fiber laminates in Europe*", proceedings of the 3<sup>rd</sup> Int. Symp. on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), Japan Concrete Institute, Sapporo, Japão, Outubro, pp. 41-56.
- MEIER, U., DEURING M., MEIER H., e SCHWEGLER G., 1992, "*Strengthening of structures with CFRP laminates: research and applications in Switzerland*", proceedings of the 1<sup>st</sup> Advanced Composite Materials in Bridges Structures, ACMBS-I, CSCE, Sherbrooke, Montréal, Canadá, pp. 243-251.
- MEIER, U., DEURING, M., MEIER, H. e SCHWEGLER, G., 1993, "*CFRP bonded sheets*", Fiber Reinforced Plastic (FRP) - Reinforcement for concrete structures: properties and applications, editado por Antonio Nanni, Elsevier Science Publishers B.V., Vol. 42, Amsterdam, pp. 423-434.
- MONTEIRO, L. e GOMES, A., 1996, "*Reforço à flexão de vigas de betão armado – modelos de dimensionamento e verificação de segurança*", Betão Estrutural 1996, 6º Encontro Nacional do Grupo Português de Pré - esforçado, LNEC, Novembro, pp. 2.161-2.174.
- NAGATAKI, S., OHGA, H. e KIM, E.K., 1986, Proc. of the 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, American Concrete Institut (ACI), Special publication SP-91, pp. 521-540.
- NANNI, A., 1993, "*Fiber reinforced plastic (FRP) - reinforcement for concrete structures: properties and applications*", editado por António Nanni, Elsevier Science Publishers B.V., Vol. 42, Amsterdam, Holanda, 450 pp.
- NEUBAUER, U. e ROSTÁSY, F.S., 1997, "*Design aspects of concrete structures strengthened with externally bonded CFRP-plates*", proceedings of the Int. Conf. on Structural Faults & Repair-97, vol. 2, Edinburgh, Inglaterra, Julho, pp. 109-118.
- NEUBAUER, U., 1998, "*Carbon fiber reinforced plastics-plates for strengthening of structural members*", Concrete Precasting Plant and Technology, BFT6, pp. 58-63.
- NORRIS, T., SAADATMANESH, H. e EHSANI, M.R., 1997, "*Shear and flexural strengthening of RC beams with carbon fiber sheets*", ASCE, Journal of Structural Engineering, vol. 123. Nº 7, Julho, pp. 903-911.
- NP-ENV 206, 1993, "*Betão – Comportamento, produção, colocação e critérios de conformidade*", Norma Portuguesa, IPQ, Outubro.



- NSAMBU, R. e GOMES, A., 1998, "*Ensaaios experimentais de vigas de betão armado reforçadas à flexão com adição de laminado de fibras de carbono*", actas das Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, JPEE 98, LNEC, Lisboa, Novembro, pp. 469 - 478.
- NSAMBU, R., 1997, "*Reforço à flexão de vigas de betão armado com laminado de fibras de carbono*", Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Dezembro, 155 pp.
- OEHLERS, D.J. e MORAN, J.P., 1990, "*Premature failure of externally plated reinforced concrete beams*", Journal of Structural Engineering, ASCE, vol. 116, N° 4, Abril, pp. 978-995.
- OLIVEIRA, L.P.F.A. e FIGUEIRAS, J.A., 1999-a, "*Análise de esforços e deformações transversais do tabuleiro da Ponte da Senhora da Guia em Ponte de Lima*", relatório técnico, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), DECivil, Julho, 37 pp.
- OZ Lda, 1998, "*Ensaaios não destrutivos ou pouco intrusivos realizados no tabuleiro da Ponte da Senhora da Guia, em Ponte de Lima*", Projecto - CARBOPONTE: reforço de pontes em compósitos avançados, relatório n° 220/00, trabalho realizado para a STAP, Lisboa, Agosto, 31 pp.
- PETERSEN, C.G., e POULSEN, E., 1997, "*In-situ testing of near-to-surface layer of concrete and epoxy-bonded CFRP strips*", proceedings of the US-Canada-Europe Workshop on Bridge Eng., Dubendorf. Zurich, Suíça, Abril, 8 pp.
- PICHLER; D., 1993, "*Die Wirkung von anpressdrücken auf die verankerung von Klebelamellen*", Tese de Doutoramento, Leopold - Franzens - Universität, Insbruck Institut für Betonbau, 251 pp.
- PL-DMTA, 1991, "*MKII dynamic mechanical thermal analyser*", literatura técnica e manual do operador, PL-Polymer Laboratoires, Inglaterra, 16 pp.
- POULSEN, E., 1996, "*Epoxy bonded flat slab structure of precast concrete elements - presentation of the anchorage-problems*" e "*Anchorage of CFRP laminates to concrete - a proposal for a test series supported by international funds*", documentos de informação pessoal de Ervin Poulsen, the AE Claboratory, AEC Consulting Engineers Ltd e de Sika-Beton A/S, Dinamarca, 10 pp.
- POULSEN, E., JENSEN, A.P. e OTTOSEN, C., 1997-a, "*On the anchorage to concrete of Sika Carbodur CFRP strips - with particular reference to anchorage devices*", proceedings of the US-Canada-Europe Workshop on Bridge Eng., Dubendorf. Zurich, Suíça, Julho, 8 pp.
- POULSEN, E., JENSEN, A.P. e OTTOSEN, C., 1997-b, "*The failure criteria for Sikadur 30 and 31 adhesives tested by CEN Test method pr EN 12188*", proceedings of the US-Canada-Europe Workshop on Bridge Eng., Dubendorf. Zurich, Suíça, Julho, 8 pp.
- PÓVOAS, R.H.C.F., 1991, "*Modelos não-lineares de análise e dimensionamento de estruturas laminares de betão incluindo efeitos diferidos*", Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Maio, 417 pp.
- prEN 1542, 1998, "*Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - measurement of bond strength by pull-off*", European Standard, CEN, Bruxelas, Novembro, 10 pp.
- PRIESTLEY, M.J.N., SEIBLE, F., e FYFE, E., 1992, "*Column seismic retrofit using fibreglass/epoxy jackets*", proceedings of the 1<sup>st</sup> Int. Conf. on Advanced Composite Mat. in Bridges and Struct, ACMBS-I, Sherbrooke, Canadá, pp. 287-298.
- RAKNES, E., 1971, "*Limning av tre*", colagem com madeira, Yrekesopplaneringsrådet fär håndverk og industri, Universitetsforlaget, Edgar Högfelt A/S, Kristiansand (em Norueguês).
- RANISCH, E.H., 1982, "*Zur tragfähigkeit von verklebungen zwischen baustahl und beton - geklebte bewehrung*", Tese de Doutoramento Institut für Baustoffe, Massivbau unb Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, iBMB, Heft 54, 173 pp.
- RAY PUBLISHING, 1998, "*Composites for Infrastructure - a guide for civil engineers*", editado por Ray Publishing, Inc., Wheat Ridge, USA, 99 pp.

- REPLARK System Procedure Instruction, 1997, "*Revitalizing concrete structures - Replark technical datasheet - Replark systems design guideline*", Carbon fiber prepreg sheet for construction industries, Mitsubishi Chemical Corporation, 81 pp.
- RIBEIRO, M.S.S., 1996, "*Processos tradicionais de reparação da corrosão em estruturas de betão*", Seminário Prevenção da Corrosão em Estruturas de Betão Armado, LNEC, literatura de apoio do curso de Durabilidade, Reparação e Reforço de Estruturas de Betão, 23 Junho a 11 Julho, 1997, Instituto Superior Técnico de Lisboa (IST), Lisboa, pp. 317-336.
- RIPPER, T. e COSTA, J.P., 1998, "*Utilização de folha flexível de fibras de carbono pré-impregnada no aumento da resistência e ductilidade de elementos estruturais de betão armado*", actas das 2<sup>as</sup> Jornadas de Estruturas de Betão, FEUP, Porto, Abril, pp.177-189.
- RITCHIE, P.A., THOMAS, D.A., LU, Le-Wu e CONNELLY, G. M., 1991, "*External reinforcement of concrete beams using fiber reinforced plastic*", ACI Structural Journal, Vol. 88, N° 4, Julho-Agosto, pp. 490-500.
- ROBERTS, T.M. e HAIJI-KAZEMI, H., 1989, "*Theoretical study of the behavior of reinforced concrete beams strengthened by externally bonded steel plates*", Proc. Instn. Civ. Engrs., Part 2, Março, pp. 39-55.
- RODRIGUES, C.M.C., 1993, "*Comportamento da ligação aço-resina-betão em elementos estruturais*", Tese de Mestrado em Engenharia de Estruturas, Instituto Superior Técnico (IST), Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Junho, 209 pp.
- ROSTÁSY, F. S., 1997-a, "*Beurteilung der eignug von CFK-lamellen des systems Sika CarboDur als klebewehrung für die verstärkung von betonbauteilen sowie bemessungsgrundlagen für die allgemeine bauaufsichtliche zulassung*", Gutachen Nr. 97/0250, 14.01.1997, relatório técnico, Sika, TU Braunschweig, 31 pp.
- ROSTÁSY, F.S. e NEUBAUER, U., 1997-a, "*Bond behaviour of CFRP-laminates for the strengthening of concrete members*", proceedings of the International Conference of Composite Construction - Conventional and Innovative, Innsbruck, Austria, Setembro, pp.717-722.
- ROSTÁSY, F.S., 1997-b, "*On durability of FRP in aggressive environments*", proceedings of the 3<sup>rd</sup> Int. Symp. on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), JCI, Japão, Outubro, pp. 107-114.
- ROSTÁSY, F.S., 1998, "*Assesment of the suitability of CRP plates from the S&P CRP system for use as adhesive-bonded reinforcement to strengthen concrete constructional elements and bases of assessment for their general approval by the construction supervisory authorities*", expert opinion n.º98/0322, S&P Reinforcement, TU Braunschweig, 46 pp (versão inglesa).
- ROSTÁSY, F.S., HANKERS, C., e RANISCH, E.H., 1992, "*Strengthening of R/C and P/C structures with bonded FRP plates*", proceedings of the 1<sup>st</sup> Int. Conf. on Advanced Composite Mat. in Bridges and Strct., ACMBIS-I, CSCE, Shearbrooke, Canadá, pp. 253-263.
- ROSTÁSY, F.S., HOLZENKÄMPFER, P. e HANKERS, C., 1996, "*Geklebte bewehrung für die verstärkung von betonbauteilen*", Betonkalender 1996, Teil II, publicação complementar às normas DIN, editado por W. Ernst & Sohn, Berlin, pp. 547-577.
- ROSTÁSY, F.S., NEUBAUER, U. e HANKERS, C., 1997-b, "*Verstärken von betontragwerken mit geklebter äußerer bewehrung aus kohlenstoffaserverstärkten kunststoffen*", Beton-und Stahlbetonbau 92, Heft 5, editado por W. Ernest & Sohn, Berlin, pp. 132-138.
- RSA, 1983, "*Regulamento de segurança e acções para edificios e pontes*", Decreto-Lei n° 253/83 de 31 de Maio, edição Lopes da Silva, Porto, 93 pp.
- RUTZ, J., 1995, "*Mit klebewehrungen verstärkte stahlbetondecken im brandfall - schadenbegrenzung als teill des vorbeugenden brandschutzes*", Lajes em betão armado reforçadas com armaduras coladas em situação de fogo - Controlo de prejuízos com protecção ao fogo, GVA, AFS, St. Gallen, 15 pp.
- S & P, 1998, "*30 x less weight than steel for the same tensile force*", literatura técnica de apoio do sistema S & P - Clever Reinforcement Company, Scherer & Partner bausystem, 30 pp.

- SAADATMANESH, H. e MALEK, M., 1997-b, "*Prediction of shear and peeling stresses at the plate ends of beams strengthened with FRP plates*", proceedings of the 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on FRPRCS-3, editado por Japan Concrete Institute, Sapporo, Japão, Outubro, pp. 311-318.
- SAADATMANESH, H. e TANNOUS, F., 1997-a, "*Durability of FRP rebars and tendons*", proceedings of the 3<sup>rd</sup> Int. Symp. on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), JCI, Japão, Outubro, pp.147-154.
- SAADATMANESH, H., e EHSANI, M., 1990, "*Flexural strength of externally reinforced concrete beams*", proceedings of the First Materials Engineering Congress'90, ASCE, pp. 1152-1161.
- SAADATMANESH, H., e EHSANI, M., 1991, "*RC beams strengthened with GFRP plates. I: experimental study*", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 117(1), pp. 3417-3433.
- SAADATMANESH, H., e EHSANI, M., 1991, "*RC beams strengthened with GFRP plates. II: analysis and parametric study*", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 117(1), pp. 3434-3455.
- SASAKI, I., NISHIZAKI, I., SAKAMOTO, H., KATAWAKI, K. e KAWAMOTO, Y., 1997, "*Durability evaluation of FRP cables by exposure tests*", proceedings of the 3<sup>rd</sup> Int. Symp. on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), JCI, Japão, Outubro, pp.131-138.
- SCHWARTZ, M.M., 1992, "*Composite materials handbook*", 2<sup>nd</sup> edition, McGraw-Hill Companies, Inc., New York.
- SEIBLE, F., 1998, "*US perspective of advanced composites bridge technology in Europe and Japan*", proceedings of the 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Composites in Infrastructure, ICC'98, ed. Saadatmanesh e Ehsani, Tucson, Janeiro, pp. 605-636.
- SHAHAWY, M. e BEITELMAN, T.E., 1998, "*Fatigue performance of RC beams strengthened with CFRP laminates*", proceedings of the 1<sup>st</sup> Int. Conf. on Durability of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction (CDCC'98), editados por Brahim Benmokrane e Habib Rahman, Quebec, Canadá, Agosto, pp. 169-178.
- SHARIF, A., AL-SULAIMANI, G. J., BASUNBUL, I. A. BALUCH, M. H. e GHALEB, B. N., 1994, "*Stengthening of initially loaded reinforced concrete beams using FRP plates*", ACI Structural Journal, vol. 91, n° 2, Março-Abril, pp. 160-168.
- SHEARD, P.A., CLARKE, J.L., DILL, M.J., HAMMERSLEY, G.P. e RICHARDSON, D.M., 1997, "*Eurocrete - taking account o durability for design of FRP reinforced concrete strutures*", proceedings of the 3<sup>rd</sup> Int. Symp. on Non-Metalic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), JCI, Japão, Outubro, pp. 75-82.
- SIKA, 1998, "*Prontuário de fichas técnicas – Construir com segurança*", Sika, Indústria Química S.A., edição n° 2, Janeiro, pp. 344.
- SPENA, F. R. et al., 1995, "*L'uso di materiali compositi per il consolidamento delle structore*", Centro Internazionale di Studi di Archtettura Andrea Palladio, Vicenza, Itália.
- STEINER, W., 1996 "*Strengthening of structures with CFRP Strips*", proceedings of the 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBS-II), Montréal, Canadá, Agosto, pp. 407 - 417.
- STRUCTURAL FAULTS & REPAIR, 1997, "*Extending the life of bridges; concrete & composites; building civil structures*", proceedings of the 7<sup>th</sup> Int. Conf., editado por Michael C. Ford, Edinburgh, Julho (3 volumes).
- TAERWE, L., 1997, "*FRP activities in europe: survey of research and applications*", proceedings of the 3<sup>rd</sup> Int. Symp. on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), JCI, Japão, Outubro, pp. 59-74.
- TAERWE, L., KHALL, H. e MATTHYS, S., 1997, "*Behaviour of RC beams strengthened in shear by external CFRP sheets*" proceedings of the 3<sup>rd</sup> Int. Symp. on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), JCI, Japão, pp. 483-490.
- TÄLJSTEN, B., 1994, "*Plate bonding-strengthening of existing concrete structures with epoxy bonded plates of steel or fiber reinforced plastics*", Tese de Doutorado, Division of Structural Engineering, Lulea University of Technology, ISSN 0348-8373, Lulea, Suécia, Novembro, 237 pp.

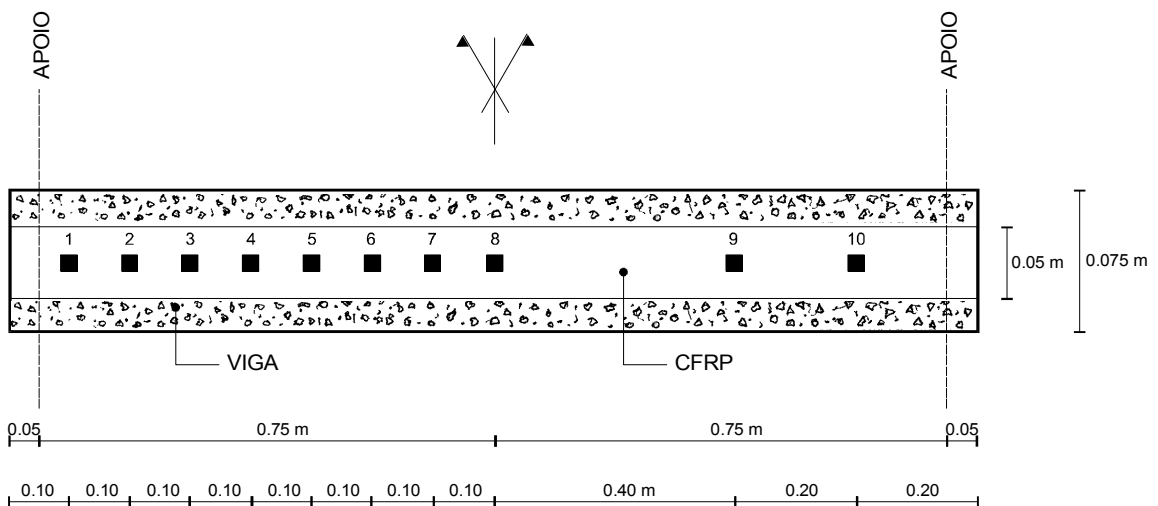
- TALY, N., 1998, "*Design of modern highway bridges*", editado por Narendra Taly, Department of Civil Engineering, California State University, McGraw-Hill, ISBN 0070629978, EUA, 1352 pp.
- TANAKA et al., 1996, "*A study on seismic retrofitting of RC columns with carbon fiber sheets (Part 6)*", Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan, C-2, pp. 163-164.
- TRIANAFILLOU, T.C e PLEVRIS N., 1991, "*Post-strengthening of RC beams with epoxy-bonded fiber composite materials*", proceedings of the Speciality Conf. on Advanced Composites Materials in Civil Engineering Structures, editado por Srinivasa L. Iyer, Las Vegas, ASCE, New York, Janeiro-Fevereiro, pp. 245-256.
- TRIANAFILLOU, T.C. e FARDIS, M.N., 1993, "*Advanced composites for strengthening of historic structures*", proceedings of IABSE Symp on Structural Preservation of the Architectural Heritage, Roma, Italia, pp. 541-548.
- TRIANAFILLOU, T.C. e PLEVRIS, N., 1992-b, "*Strengthening of R/C beams with epoxy-bonded fiber-composite materials*", Materials and Structures, Vol. 25, pp. 201-211.
- TRIANAFILLOU, T.C., 1996, "*Innovative strengthening of masonry monuments with composites*", proceedings of the 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBS-II), Montréal, Canadá, Agosto, pp. 473-480.
- TRIANAFILLOU, T.C., DESKOVIC, N., e DEURING, M., 1992-a, "*Strengthening of concrete structures with prestresse fiber reinforced plastic sheets*", ACI Structural Journal, Vol. 89, Nº 3, Maio-Junho, pp. 235-244.
- TU, L. e KRUGER, D., 1996, "*Engineering properties of epoxy resins used as concrete adhesives*", ACI Materials Journal, vol, 93, nº 1, Jan-Fev., pp. 26-35.
- UOMOTO, T., NISHIMURA, T. e OHGA, H., 1995, "*Static and fatigue strength of FRP rods for concrete reinforcement*", proceedings of the 2<sup>nd</sup> International RILEM Symposium of Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPCS-2), Ghent, Bélgica, Agosto, pp. 100-107.
- US-CANADA-EUROPA WORKSHOP ON BRIDGE ENGINEERING, 1997, "*Recent advances in bridge engineering - advanced rehabilitation, durable materials, non destructive evolution and management*", proceedings of the Workshop on Bridge Engineering, editado por Urs Meier e Raimondo Betti, EMPA, Zurich, Suíça, Julho, 429 pp.
- VAN GEMERT, D., 1980, "*Force transfer in epoxy bonded steel-concrete points*", Int. Journal of Adhesion and adhesives, nº 1, Jan., pp. 67-72.
- VAN GEMERT, D.A., 1981, "*Repairing of concrete structures by externally bonded steel plates*", proceedings of the Int. Symp. Plastics in material and structural engineering, ICP, RILEM, IBK, Praga, Junho, pp. 519-526.
- VARASTEHPOUR, H. e HAMELIN, P., 1995, "*Structural behaviour of reinforced concrete beams strengthened by epoxy bonded FRP plates*", proceedings of the 2<sup>nd</sup> International RILEM Symposium of Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPCS-2), Ghent, Bélgica, Agosto, pp. 559-567.
- VARASTEHPOUR, H. e HAMELIN, P., 1996, "*Analysis and study of failure mechanism of RC beam strengthened with FRP plate*", proceedings of the 2<sup>nd</sup> Int. Conf. ACMBS/MCAPC, Montréal, Canadá, Agosto, pp. 527-536.
- VARASTEHPOUR, H. e HAMELIN, P., 1997, "*Strengthening of concrete beams using fiber-reinforced plastics*", Materials and Structures, Scientific reports, vol. 30, Abril, pp. 160-166.
- VIEGAS, P.M.F., 1997, "*Reforço de vigas com adição de chapas metálicas de grande espessura*", Tese de Mestrado em Engenharia de Estruturas, Instituto Superior Técnico (IST), Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Julho, 112 pp.
- VOLKERSON, O., 1938, "*Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten nietverbindungen mit Konstanten laschenquerschnitten*", Luftfahrtforschung, 15, pp. 41-47.
- WEAVER, A., 1995, "*Carbon plate stops the cracks*", Reinforced Plastic, Elsevier Science Publishers, Julho/Agosto, pp. 34-37.

- WENDEL, F., 1995, "*Vortrag klebebewehrungen GVB/AIB*", sistema PROMAT AG, Palestra sobre Armaduras Coladas GVB/AIB, Informação técnica, Winterthur-Hegi, 7 pp.
- WU, Z., MATSUZAKI, T. e TANABE, K., 1997, "*Interface crack propagation in FRP-strengthened concrete structures*", proceedings of the 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on FRPRCS-3, editado por Japan Concrete Institute, Sapporo, Japão, Outubro, pp. 319-326.
- YAGI, K., TANAKA, T., SAKAI, H. e OTAGURO H., 1997, "*Durability of carbon fiber sheet for and retrofitting*", proceedings of the 3<sup>rd</sup> Int. Symp. on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), JCI, Japão, Outubro, pp. 259-267.
- YAMAGUCHI, T., KATO, Y., NISHIMURA, T. e UOMOTO, T., 1997, "*Creep rupture of FRP rods made of aramid, carbon and glass fibers*", proceedings of the 3<sup>rd</sup> Int. Symp. on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), JCI, Japão, Outubro, pp. 179-186.
- ZHANG, S., RAOOF, M. e WOOD, L.A., 1995 "*Prediction of peeling failure of reinforced concrete beams with externally bonded steel plates*", Journal of Structures and Buildings, Vol. 110, N° 3, pp. 257-268.

# Anexo A

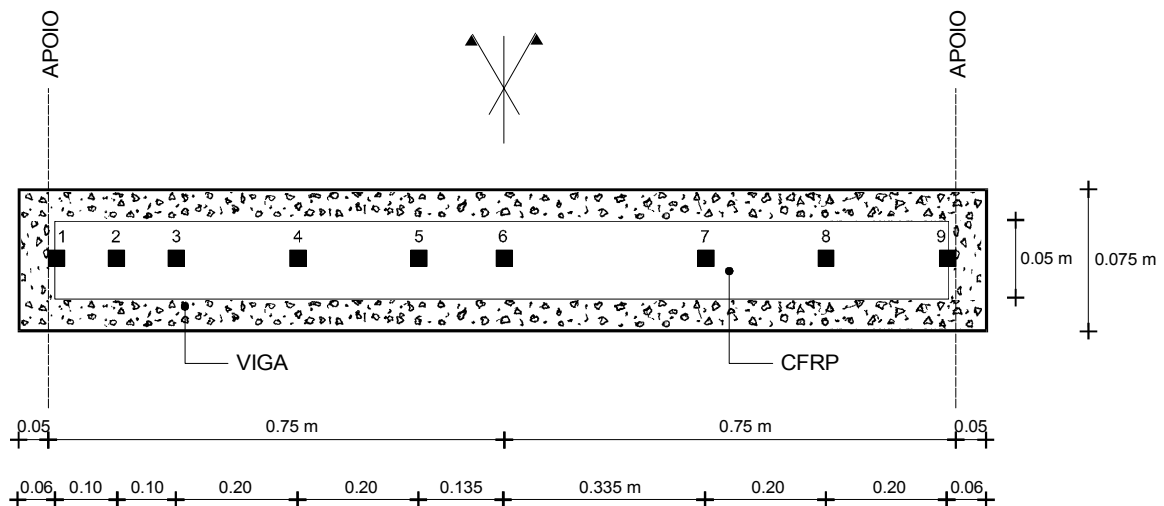
## Instrumentação e Materiais

### PLANTAS COM A POSIÇÃO DOS EXTENSÓMETROS COLADOS NO CFRP



VIGA - B.8; B.3; B.5; B.9; B.13

■ - EXTENSÓMETRO ELÉCTRICO (K = 2.075)  
EA - 06 - 250 BG 120 (da MM)

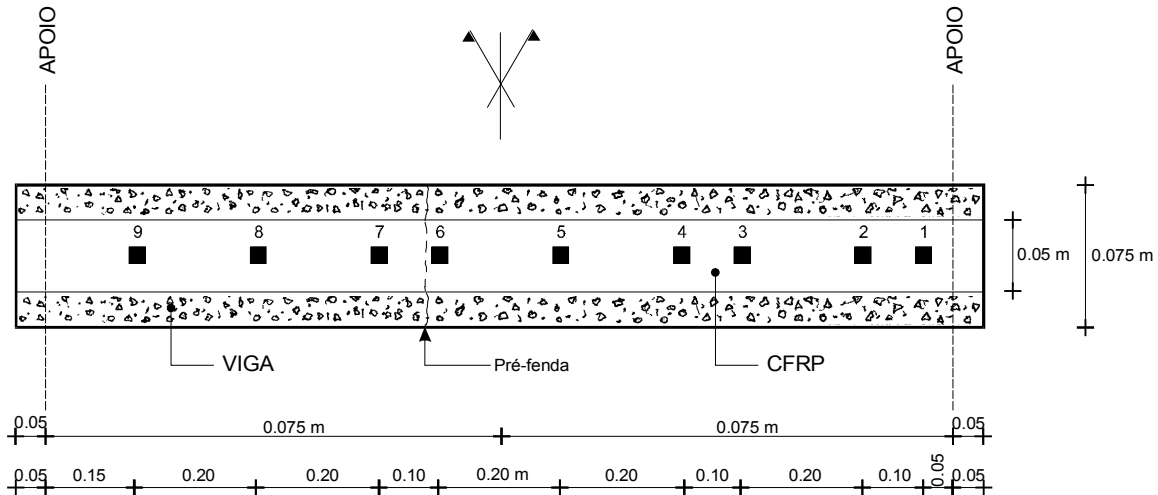


VIGA - B.7

■ - EXTENSÓMETRO ELÉCTRICO (K = 2.075)  
EA - 06 - 250 BG 120 (da MM)

Figura A.1 – Plantas com a posição dos extensómetros eléctricos colados ao laminado de carbono (vigas B.3, B.5, B.7, B.8, B.9, B.13).

### PLANTAS COM A POSIÇÃO DOS EXTENSÓMETROS COLADOS NO CFRP (continuação)



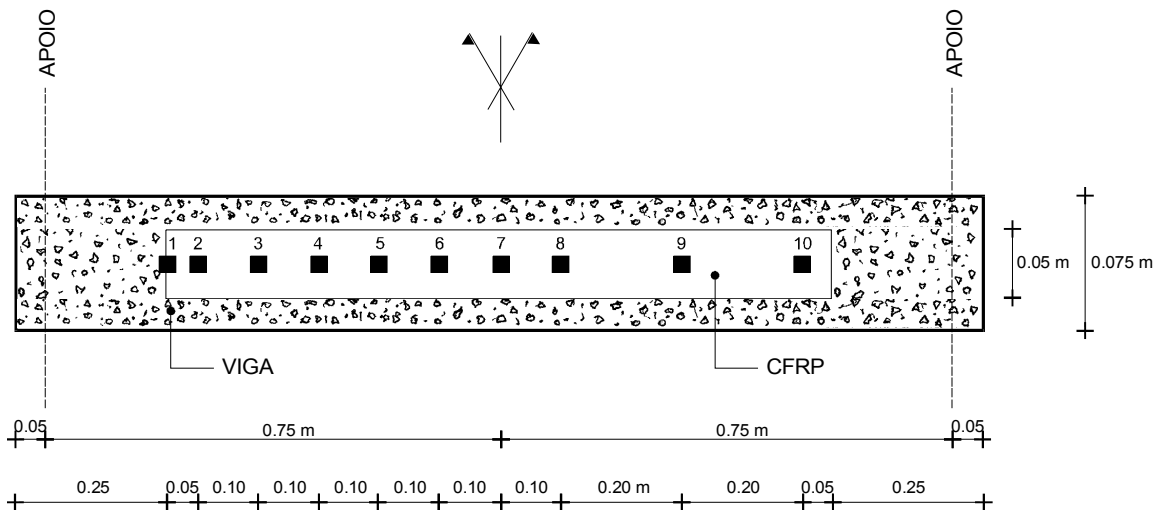
VIGA - B.10

■ - EXTENSÓMETRO ELÉCTRICO

K=2.03 - EXT. 6; EXT. 7; EXT. 8; EXT. 9

K=2.075 - EXT. 1; EXT. 2; EXT. 3; EXT. 4; EXT. 5

EA - 06 - 250 BG 120 (da MM)



VIGA - B.11

■ - EXTENSÓMETRO ELÉCTRICO

(K = 2.075)

EA - 06 - 250 BG 120 (da MM)

Figura A.2 – Plantas com a posição dos extensómetros eléctricos colados ao laminado de carbono (vigas B.10 e B.11).

**PLANTAS COM A POSIÇÃO DOS EXTENSÓMETROS COLADOS NO CFRP**  
(continuação)

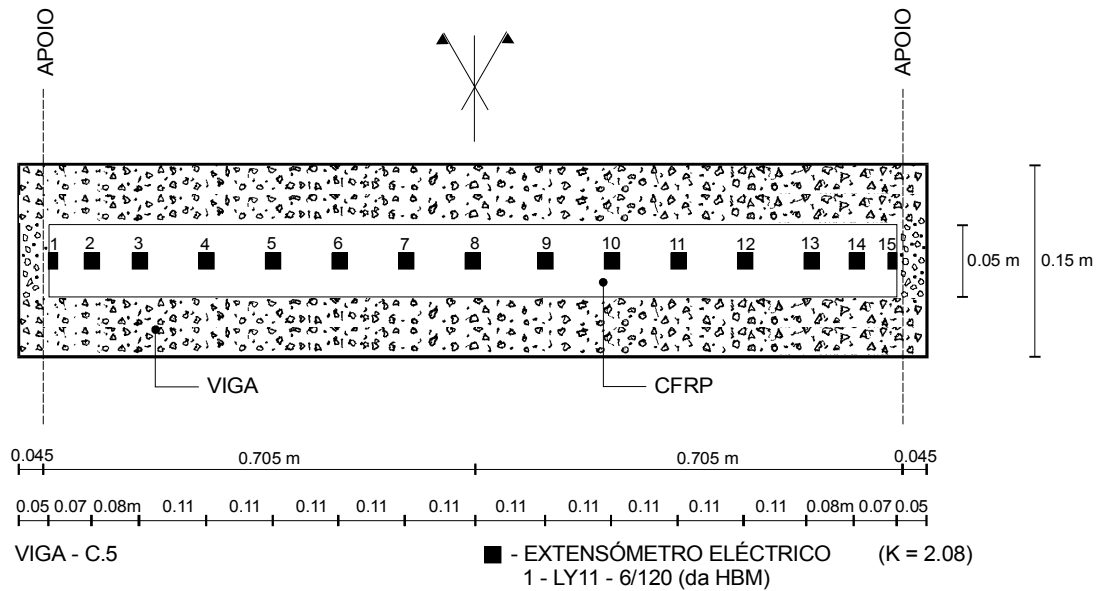
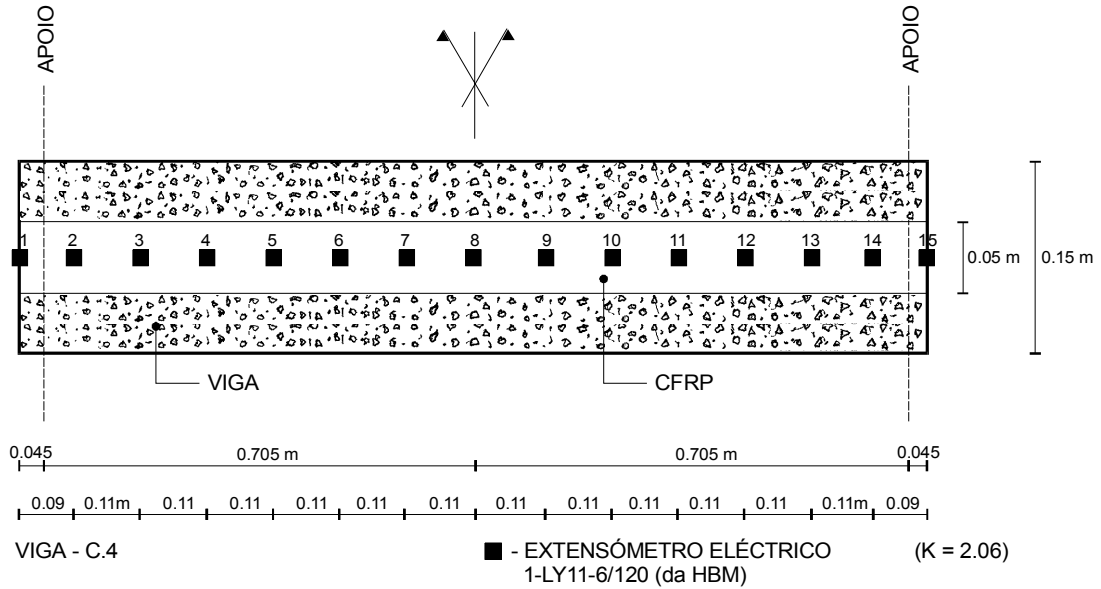


Figura A.3 – Plantas com a posição dos extensómetros eléctricos colados ao laminado de carbono (vigas C.4 e C.5).



## Programa das tarefas

A realização do vasto programa de investigação experimental obriga a conciliar um conjunto de factores, nomeadamente, a disponibilidade de espaço, a coordenação das séries de amassaduras, a compatibilização das datas de betonagem com as datas do reforço exterior e as dos ensaios dos modelos, entre outros aspectos.

Sendo assim, efectuou-se um planeamento das tarefas para a análise experimental e que se apresenta resumidamente na Tabela A.1, com o título de "plano geral dos ensaios". Nela, estão registadas as informações que interessarão às secções deste trabalho.

Tabela A.1 - Plano geral dos ensaios das vigas e das lajes.

Modelo	Amassadura / Betonagem			Reforço com CFRP		Ensaio do Modelo
	Data	Provetes	Ensaio	Data	Adesivo	
<b>ENSAIOS N° 1 (vigas)</b>						
<b>B.1</b>	06/12/96	aulas de betão armado		01/08/96	1A	13/09/96
<b>B.2</b>	06/12/96	aulas de betão armado		sem	sem	10/05/96
<b>ENSAIOS N° 2 (vigas)</b>						
<b>C.2</b>	27/07/90 (dúvida)	carotes várias	LEMC	sem	sem	25/09/96 (1ª Fase)
				26/09/96	2A	01/10/96 (3ª Fase)
<b>C.1</b>			LE	26/09/96	2B	01/10/96
<b>C.3</b>			sem	sem	01/10/96	
<b>A.1</b>	23/07/96	cubos 15	LEMC	26/09/96	2A	02/10/96
<b>A.2</b>	26/07/96	cubos 15	LEMC	26/09/96	2A	02/10/96
<b>B.4 (1)</b>	16/10/96	aulas de betão armado		sem	sem	28/11/96
<b>B.4 (2)</b>	16/10/96	aulas de betão armado		sem	sem	30/11/96

Tabela A.1 - Plano geral dos ensaios das vigas e das lajes (continuação).

Modelos	Amassadura /Betonagem			Reforço com CFRP		Ensaio do Modelo
	Data	Provetes	Ensaio	Data	Adesivo	
<b>ENSAIOS N° 3 (vigas)</b>						
<b>B.6</b>	25/11/96	-	-	sem	sem	05/03/97
<b>B.10</b>	17/01/97	-	-	sem	sem	28/02/97 (2ª fase)
<b>B.12</b>	21/01/97	-	-	sem	sem	06/03/97
<b>B.7</b>	15/01/97	cubo 15	LE	27/02/97	3A	10/03/97
<b>B.8</b>		cilindro 30 prisma 55	LE LEMC			11/03/97
<b>B.3</b>	16/10/96	cilindro 30	LE	27/02/97	3B	12/03/97
<b>B.5</b>	25/11/96	-	-		3B	13/03/97
<b>B.13</b>	16/10/96	aulas de Estruturas de Betão		27/02/97	2B	18/03/97
<b>B.11</b>	21/01/97	cubo de 15 prisma 55	LE LEMC	27/02/97	3B	21/03/97
<b>B.9</b>	17/01/97	cubo 15	LE	27/02/97 (face oposta)	3B	25/03/97
<b>B.10</b>		cilindro 30 prisma 55	LE LEMC	28/02/97	3C	27/03/97 (3ª fase)
<b>C.4</b>	27/07/90 (dúvida)	½ cilindro ½ cilindro	LEMC	27/02/97	3A	02/02/98
<b>C.5</b>	27/07/90 (dúvida)	½ cilindro ½ cilindro	LEMC	06/03/98	4A	14/05/98
<b>A.3</b>	18/09/96	cubo 15	LE	27/02/97	3B	30/01/98
<b>A.4</b>						02/02/98
<b>ENSAIOS N° 4 (lajes)</b>						
<b>LB3N</b>	12/03/98	vários provetes	LE LEMC	sem	sem	18/06/98
<b>LB4N</b>				sem	sem	04/09/98
<b>LC4R</b>	19/03/98	vários provetes	LE LEMC	19/05/98	5A	17/09/98
<b>LC1S</b>				11/05/98	6A	21/09/98
<b>LC2S</b>				11/05/98	6A	24/09/98
<b>LC3R</b>				19/05/98	5A	30/09/98

Na Tabela A.2 apresenta-se a composição do betão usado na confecção das várias amassaduras numeradas por ordem cronológica e conforme a betonagem dos modelos da série de vigas.

Tabela A.2 - Composição do betão segundo o nº de ordem da amassadura das vigas.

AMASSADURA Nº	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
	[i]	[ii]								
MATERIAL	PESO (Kg/m <sup>3</sup> )									
Cimento (II/32,5)		460	415	425	425	450	457	450	450	450
Brita grossa (5-15)		-	750	640	640	800	806	500	500	500
Brita (5-10)	Sem informação	700 (ℓ)	600	600	600	645	645	500	500	500
Brita (0-5)		-	600	600	600	645	645	500	500	500
Areia fina (0-4)		570 (ℓ)	640	750	750	800	807	729	729	729
Água		230 (ℓ)	176 (ℓ)	170 (ℓ)	179 (ℓ)	183 (ℓ)	183 (ℓ)	191 (ℓ)	194 (ℓ)	190 (ℓ)
Aditivo		-	5.8 (ℓ)	3.5 (ℓ)	3.5 (ℓ)	3.8 (ℓ)	3.8 (ℓ)	5.7 (ℓ)	5.7 (ℓ)	5.7 (ℓ)
W/C		0.50	0.44	0.41	0.43	0.42	0.41	0.43	0.44	0.43

[i] - Vigas *tipo C* já existentes, cuja informação da composição do betão se desconhece.

[ii] - Composição usada por Lourenço (1992); (ℓ) - litros.

Na Tabela A.3 apresenta-se a composição do betão usado na execução das várias betonagens dos grupos de laje em estudo.

Tabela A.3 - Composição do betão por betonagem das faixas de laje.

Betonagem	A	B	C
Material	[i]	[i]	[i]
Cimento (II - 42.5)	400	400	400
Brita (5 - 15)	775	910	910
Brita (0 - 5)	170	-	-
Areia fina (0 - 4)	775	820	820
Água [ii]	172	166	166
Aditivo [iii]	5	4	4
W/C	0.415	0.428	0.42
Abaixamento (cm)	10.0	8.0	8.0

[i] - Em termos gerais as quantidades dos materiais estão expressas em kg/m<sup>3</sup>.

[ii] - Quantidade definida em litros / m<sup>3</sup>.

[iii] - Superplastificante *Sikament 163* apresentado em litros / m<sup>3</sup>.

**COMPOSIÇÃO DE BETÕES - MÉTODO DE FAURY  
(Betonagem A)**

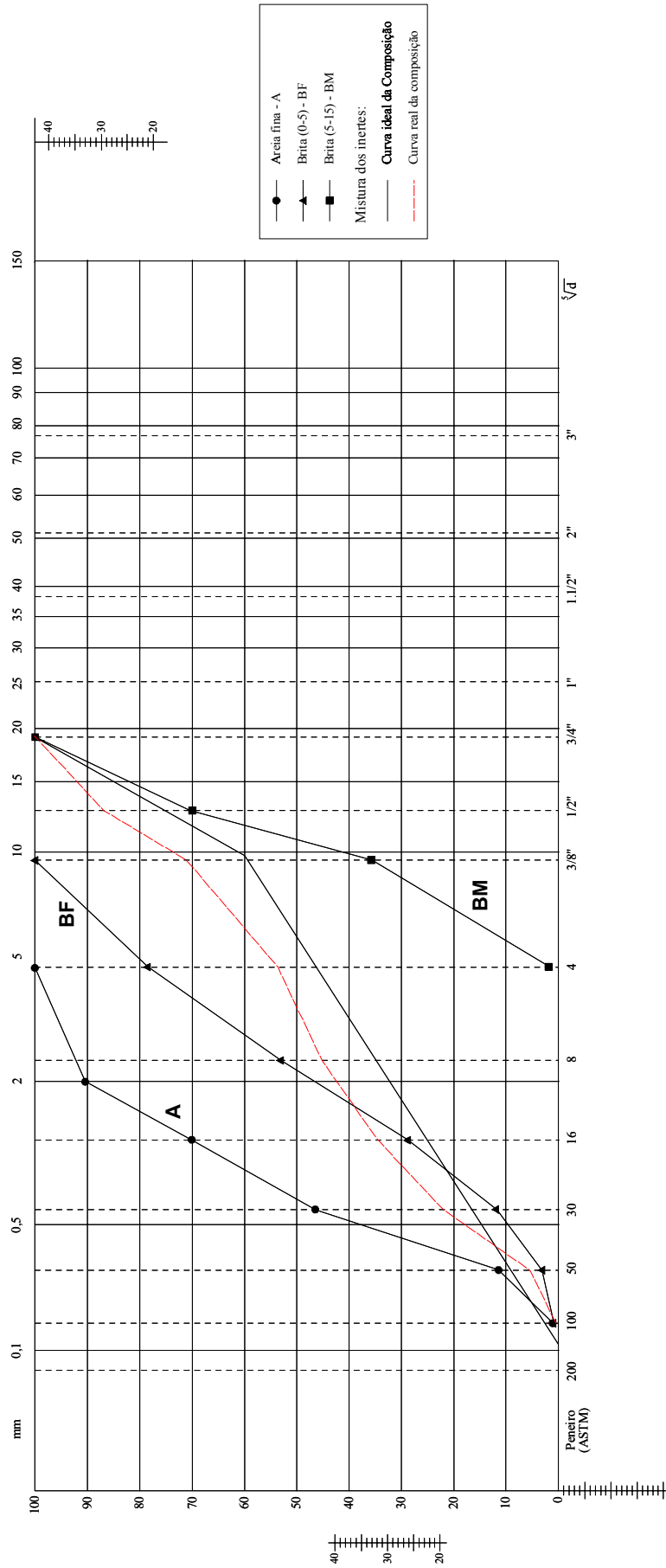


Figura A.4 - Curvas granulométricas dos inertes (betonagem A).

**COMPOSIÇÃO DE BETÕES - MÉTODO DE FAURY  
(betonagens B e C)**

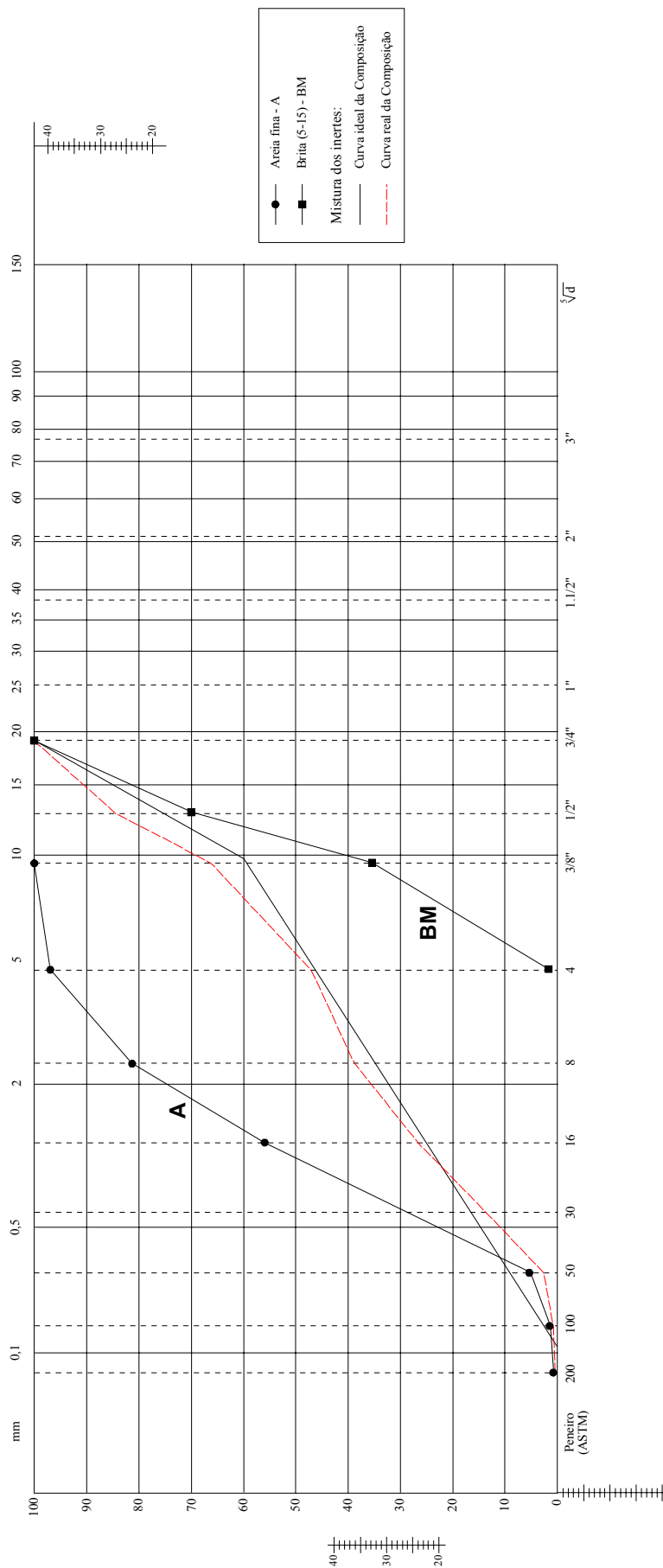


Figura A.5 - Curvas granulométricas dos inertes (betonagens B e C).

**Laboratório de Ensaios da FEUP (LE, LEMC)**  
**Ano de 1998**

**Temperatura (1998)**

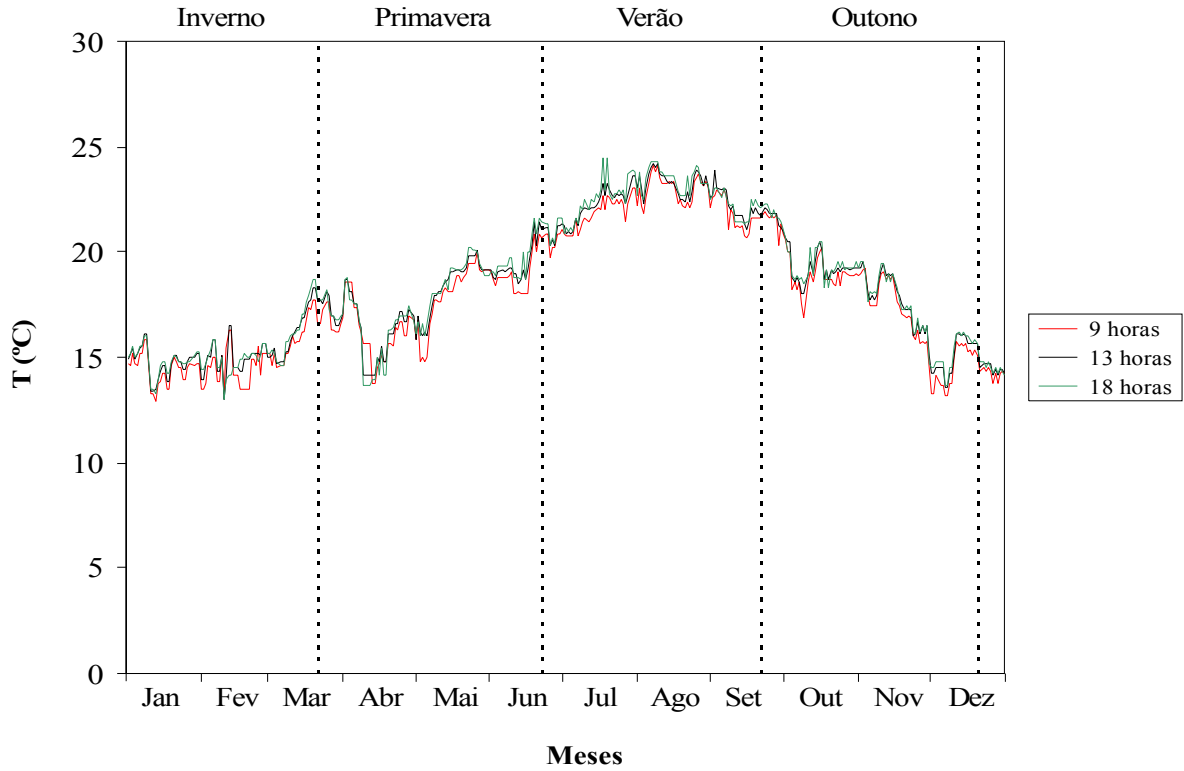


Figura A.6 - Diagrama de variação da temperatura (T).

**Humidade Relativa (1998)**

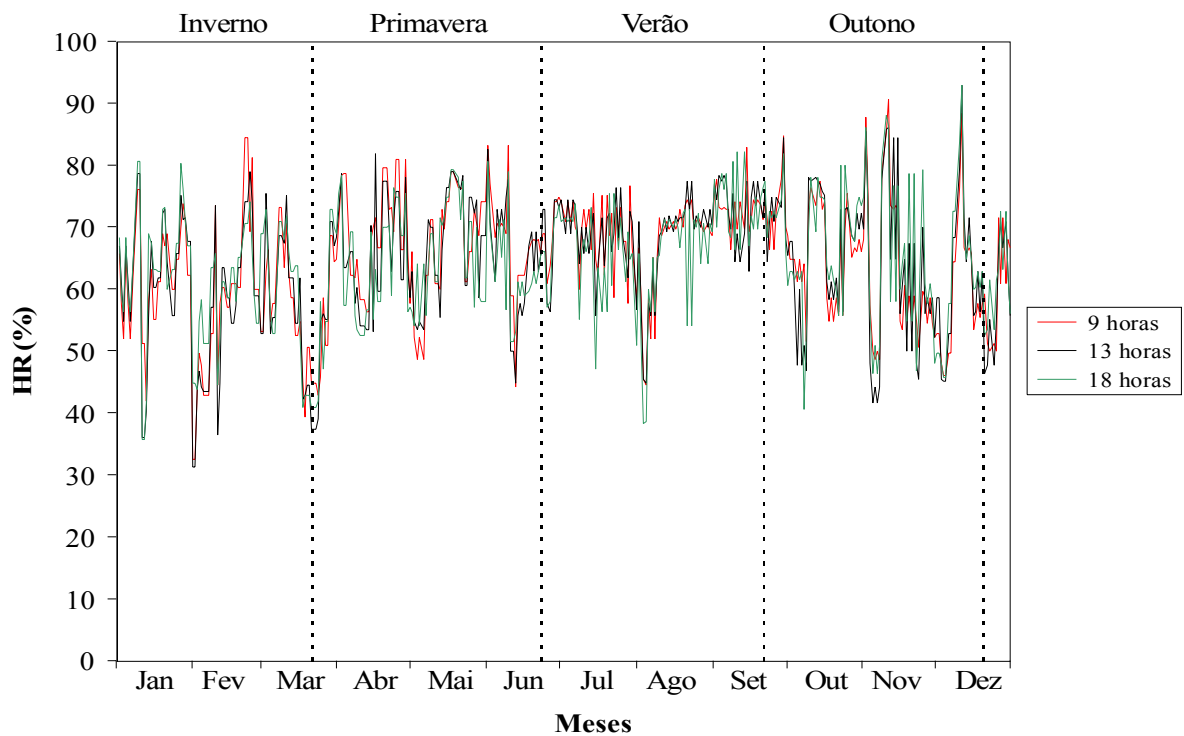


Figura A.7 - Diagrama de variação da Humidade Relativa (HR).

Tabela A.4 - Ensaio de PL-DMTA (“Dynamic Mechanical Thermal Analyser”) do *Sikadur 30* usado nos modelos de vigas.

Mistura	Provete	Data	Pós-cura	1º Varrimento				Pós-cura	Último Varrimento			
				E' / Temp. (Gpa) (°C)	Tc (°C)	Tg (°C)	tan δ		E' / Temp. (Gpa) (°C)	Tc (°C)	Tg (°C)	tan δ
<b>2B</b>	2B - 6	23/10/96	não	8.29 / 25.4	39	55.34	0.806	3 horas a 80°C	8.15 / 20.5	43	65.90	0.600
	2B - 7	23/10/96		8.35 / 25.0	39	54.63	0.753		8.60 / 20.7	42	65.30	0.530
	2B - 8	24/10/96		7.50 / 25.7	39	54.61	0.757		7.95 / 20.6	43	66.08	0.560
	2B - 9	24/10/96		8.35 / 25.0	39	53.99	0.713		8.63 / 20.7	42	65.96	0.518
<b>3A</b>	3A - 3	23/07/96	não	7.31 / 25.2	44	56.78	0.877	não	8.26 / 25.2	45	64.46	0.713
	3A - 4	24/07/96		6.48 / 25.6	39	51.82	0.740		7.40 / 26.8	37	53.41	0.583
	3A - 5	25/07/96		7.89 / 26.6	45	58.06	0.793		7.91 / 25.3	40	62.57	0.794
	3A - 6	25/07/96	1 hora a 85°C	6.95 / 25.1	34	58.00	0.479	1 hora a 85°C	8.21 / 27.4	35	58.11	0.474
	3A - 7	26/07/96		7.82 / 25.6	42	64.18	0.760		7.72 / 25.0	42	65.45	0.723
<b>3B</b>	3B - 2	24/07/97	não	7.72 / 25.6	43	55.73	0.842	não	7.71 / 25.4	39	59.30	0.648
	3B - 3	24/07/97		6.35 / 26.1	43	56.05	0.818		6.23 / 28.2	41	59.45	0.592
<b>3C</b>	3C - 2	25/07/97	não	8.16 / 25.6	33	51.54	0.645	não	7.67 / 25.6	32	53.02	0.586
	3C - 3	25/07/97		8.68 / 27.3	35	51.73	0.696		8.49 / 26.9	32	52.67	0.588
	3C - 4	25/07/97		8.21 / 25.3	35	52.21	0.734		8.21 / 26.4	31	52.61	0.676
<b>4A</b>	4A - 3	27/03/98	não	8.14 / 20.2	37	48.14	1.060	não	7.65 / 20.7	41	56.30	0.900
	4A - 4	28/03/98		8.45 / 20.4	39	48.93	1.055		6.47 / 22.1	42	58.15	0.850
	4A - 5	28/03/98	6 horas a 60°C	7.63 / 20.3	39	55.86	0.920	6 horas a 60°C	6.97 / 21.2	41	55.97	0.918
	4A - 6	28/03/98		7.91 / 20.2	39	56.36	0.870		6.51 / 22.0	41	56.70	0.850

Tg - temperatura de transição vítrea;

tan δ - coeficiente de perda associado à variação dinâmica do modo de elasticidade de um adesivo ( $0.0001 \leq \text{valor} \leq 9.999$ );

Tc - temperatura crítica acima da qual se inicia a redução acentuada do módulo de elasticidade.

# Anexo B

## Ensaio de Aderência

Tabela B.1 – Características da preparação e da aplicação do reforço nas vigas *Tipo A*.

Viga	Amassadura	Comprimento do CFRP (cm)	Adesivo	Preparação da superfície	Data do ensaio
A.1	③	L1 = 55+2,5 c = 5 (descolado)	2A	escova de aço + picagem	02.10.96
A.2	④	L1 = 74+2,5 (entre apoios) c = 5 (descolado)	2A	escova de aço + picagem	02.10.96
A.3	⑤	L1 = 72,5+4,5 (entre apoios) c = 9 (descolado)	3B	projecção de jacto de areia	30.01.98
A.4	⑤	L1 = 55+4,5 c = 9 (descolado)	3B	projecção de jacto de areia	02.02.98

Para informações mais detalhadas consultar o trabalho de Juvandes et al. (1998-a).

Tabela B.2 – Características da preparação e da aplicação do reforço nas vigas *Tipo C*.

Viga	Amassadura n°	Comprimento do CFRP (cm)	Adesivo	Preparação da superfície	Data do ensaio
C.1	①	148 (entre apoios)	2B	escova de aço	01.10.96
C.2 (1ª Fase)	①	sem reforço			25.09.96
C.2 (2ª Fase)	①	148 (entre apoios)	2A	escova de aço	01.10.96
C.3	①	sem reforço			01.10.96
C.4	①	148 (entre apoios)	3A	jacto de areia	02.02.98
C.5	①	139 (fora dos apoios)	4A	martelo de agulhas	14.05.98

Para informações mais detalhadas consultar o trabalho de Juvandes et al. (1998-a).



Tabela B.3 - Características da preparação e da aplicação do reforço nas vigas *Tipo B*

Viga	Amassadura	Comprimento do CFRP (cm)	Adesivo	Preparação da superfície	Data do ensaio
B.1	②	158 (entre apoios)	1A	picagem + escova de aço	13.09.96
B.2	②	-	-	-	Nov.95 (aulas B.A.)
B.3	⑥	158 (entre apoios)	3W+3B	jacto de areia + primário (sikadur 31)	12.03.97
B.4 (1)	⑥	-	-	-	28.10.96 (aulas B.A)
B.4 (2)	⑥	-	-	-	30.10.97 (aulas B.A.)
B.5	⑦	158 (entre apoios)	3B	jacto de areia	13.03.97
B.6	⑦	-	-	-	06.03.97
B.7	⑧	148	3A	jacto de areia	10.03.97
B.8	⑧	158 (entre apoios)	3A	jacto de areia	11.03.97
B.9	⑨	158 (entre apoios e na face oposta)	3B	jacto de areia	25.03.97
B.10 (1ª Fase)	⑨	-	-	-	28.02.97
B.10 (2ª Fase)	⑨	158 (entre apoios)	3C	jacto de areia	27.03.97
B.11	⑩	110	3B	jacto de areia	21.03.97
B.12	⑩	-	-	-	06.03.97
B.13	⑥	158 (entre apoios)	2B	jacto de areia	18.03.97

Para informações mais detalhadas consultar o trabalho de Juvandes et al. (1998-a).

Tabela B.4 - Resultados dos ensaios de arrancamento por tracção - Vigas tipo A e tipo B.

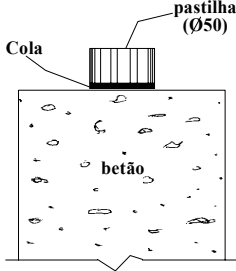
AMOSTRA (Tipo)	VIGA OU PROVETE	AMASSADURA (Nº/Data)	CAROTAGEM PRÉVIA $\phi$ (mm)	CRITÉRIO DE COLAGEM	ENSAIO DE ARRANCAMENTO POR TRACÇÃO				OBSERVAÇÕES [i]	
					EQUIPA.	DATA	FORÇA (KN)	TENSÃO (MPa)		
<b>VIGAS Tipo A</b>										
CE.1	Viga	③	sem		Seta (I.C.)	13/03/98	2.90	1.48	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pastilhas coladas no betão com “massa corfer”</li> <li>• CE.1: ruína pelo betão adjacente à junta de colagem (<b>Tipo 1</b>); CE.2: ruína pela junta (<b>Tipo 3</b>)</li> </ul> (*) resultado excluído da análise	
CE.2	A.1	23/07/96				2.60	1.32 (*)			
CF.1	Viga	④				26/07/96	14/03/98	1.61	1.02	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pastilhas coladas no betão com “massa corfer”</li> <li>• CF.1, CF.3: ruína pelo betão e pela junta de colagem (<b>Tipo 2</b>); CF.2: ruína pela junta de colagem (<b>Tipo 3</b>)</li> </ul>
CF.2	A.2						1.31	0.71 (*)		
CF.3	A.2						2.16	1.38		
CG.1	Viga	⑤				18/09/96	14/03/98	2.69	1.37	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pastilhas coladas no betão com “massa corfer”</li> <li>• CG.1, CG.3: ruína pelo betão e pela junta de colagem (<b>Tipo 2</b>); CG.2: ruína pela junta de colagem (<b>Tipo 3</b>)</li> </ul>
CG.2	A.4						0.83	0.42 (*)		
CG.3	A.4						2.60	1.32		
CG.4	Viga						13/03/98	3.28	1.67	
CG.5	A.5	3.11				1.58	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ruíram pelo betão adjacente à junta de colagem (<b>Tipo 1</b>)</li> </ul>			

Tabela B.4 - Resultados dos ensaios de arrancamento por tracção – Vigas tipo A e tipo B (continuação).

AMOSTRA (Tipo)	VIGA OU PROVETE	AMASSADURA (Nº/Data)	CAROTAGEM PRÉVIA $\phi$ (mm)	CRITÉRIO DE COLAGEM	ENSAIO DE ARRANCAMENTO POR TRACÇÃO				OBSERVAÇÕES [i]
					EQUIPA.	DATA	FORÇA (KN)	TENSÃO (MPa)	
<b>VIGAS Tipo B</b>									
<b>CJ.1</b>	Viga	② 06/12/95			Seta (I.C.)	14/03/98	3.17	1.61	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pastilhas coladas no betão com “massa corfer”</li> <li>• CJ.1: ruína pelo betão adjacente à junta de colagem (<b>Tipo 1</b>); CJ.2: ruína pela junta (<b>Tipo 3</b>)</li> </ul>
<b>CJ.2</b>	<b>B.1</b>						-	-	
<b>CH.1</b>	Viga	⑥ 16/10/96			Seta (I.C.)	14/03/98	4.81	2.45	<ul style="list-style-type: none"> <li>• superfície do betão reparada com o primário <i>SikaDur 31</i></li> <li>• pastilhas coladas ao primário com “massa corfer”</li> <li>• ruíram por extração de uma parcela de betão superior ao perímetro da pastilha (<b>Tipo 1</b>)</li> </ul>
<b>CH.2</b>	<b>B.3</b>		sem				5.00	2.55	
<b>CI.1</b>	Viga	⑦ 25/11/96			Seta (I.C.)	14/03/98	2.33	1.19	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pastilhas coladas no betão com “massa corfer”</li> <li>• CI.1: ruína pelo betão adjacente à junta de colagem (<b>Tipo 1</b>); CI.2: ruína pela junta (<b>Tipo 3</b>)</li> <li>(*) resultado excluído da análise</li> </ul>
<b>CI.2</b>	<b>B.5</b>						1.48	0.75 (*)	

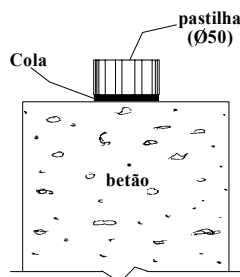


Tabela B.4 - Resultados dos ensaios de arrancamento por tracção – Vigas tipo A e tipo B (continuação).

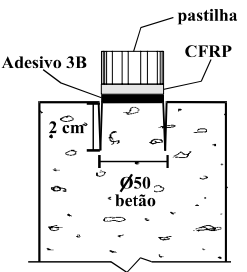
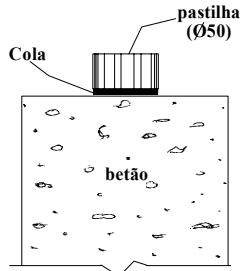
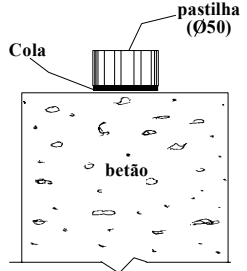
AMOSTRA (Tipo)	VIGA OU PROVETE	AMASSADURA (Nº/Data)	CAROTAGEM PRÉVIA $\phi$ (mm)	CRITÉRIO DE COLAGEM	ENSAIO DE ARRANCAMENTO POR TRACÇÃO				OBSERVAÇÕES  [i]
					EQUIPA.	DATA	FORÇA (KN)	TENSÃO (MPa)	
CA.1	1/2 prisma  (após ensaio à flexão)	⑧  15/01/97	com 50 mm		Seta (I.C.)	23/07/97	6.18	3.15	<ul style="list-style-type: none"> <li>CFRP colado no betão com <i>Sikadur 30</i> da mistura “adesivo 3B”</li> <li>a pastilha foi colada sobre o CFRP com “araldite rapid”</li> <li>ruína pelo betão adjacente à junta de colagem (<b>Tipo 4</b>)</li> </ul>
CA.2	Vigas		sem			13/03/98	4.43	2.26	<ul style="list-style-type: none"> <li>pastilhas coladas no betão com “massa corfer”</li> <li>ruíram pelo betão adjacente à junta de colagem (<b>Tipo 1</b>), excepto no caso CA.3 que ruiu pelo adesivo (<b>Tipo 3</b>)</li> <li>(*) resultado excluído da análise</li> </ul>
CA.3	B.7					e	1.19	0.61 (*)	
CA.4	B.8					16/03/98	2.10	1.07 (*)	
CA.5	1/2 prisma  (após ensaio à flexão)	sem		08/05/98	4.30	2.19	<ul style="list-style-type: none"> <li>pastilhas coladas no betão com “massa corfer”: CA.5, CA.7, CA.9</li> <li>pastilhas coladas no betão com “araldite rapid”: CA.6, CA.8</li> <li>ruíram pelo betão adjacente à junta de colagem (<b>Tipo 1</b>)</li> <li>(*) resultado excluído da análise</li> </ul>		
CA.7					4.58	2.33			
CA.9					3.24	1.65 (*)			
CA.6					5.81	2.96			
CA.8					4.37	2.23			

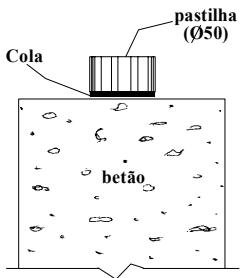
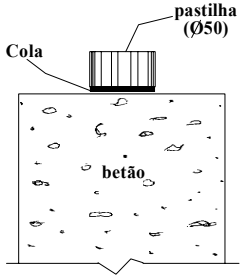
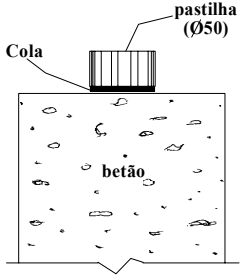
Tabela B.4 - Resultados dos ensaios de arrancamento por tracção – Vigas tipo A e tipo B (continuação).

AMOSTRA (Tipo)	VIGA OU PROVETE	AMASSADURA (Nº/Data)	CAROTAGEM PRÉVIA $\phi$ (mm)	CRITÉRIO DE COLAGEM	ENSAIO DE ARRANCAMENTO POR TRACÇÃO				OBSERVAÇÕES  [i]
					EQUIPA.	DATA	FORÇA (KN)	TENSÃO (MPa)	
CB.1	cub 15	⑨ 17/01/97	sem		Perta (LEM)	Ensaio por realizar			<ul style="list-style-type: none"> <li>a pastilha <math>\phi</math> 75 foi colada sobre o betão com <i>Sikadur 30</i> da mistura “adesivo 3B”</li> <li>o ensaio não realizou-se por falta de equipamento</li> </ul>
CB.2	prisma 15x15x55		com 50 mm		Seta (I.C.)	13/05/97	7.01	3.57	<ul style="list-style-type: none"> <li>CFRP colado no betão com <i>Sikadur 30</i> da mistura “adesivo 3C”</li> <li>a pastilha foi colada ao CFRP com “araldite rapid”</li> <li>ruína na base da carote (<b>Tipo 4</b>)</li> </ul>
CB.3 CB.4	prisma 15x15x55		sem			23/05/97	8.80	3.57	<ul style="list-style-type: none"> <li>CFRP colado no betão com <i>Sikadur 30</i> da mistura “adesivo 3C”</li> <li>pastilhas coladas sobre o CFRP com “araldite rapid”</li> </ul>
					31/07/97	8.50	3.85	<ul style="list-style-type: none"> <li>ruíram pelo betão na secção adjacente ao adesivo e segundo um perímetro superior ao da pastilha (<b>Tipo 1</b>)</li> </ul>	

Tabela B.4 - Resultados dos ensaios de arrancamento por tracção – Vigas tipo A e tipo B (continuação).

AMOSTRA (Tipo)	VIGA OU PROVETE	AMASSADURA (Nº/Data)	CAROTAGEM PRÉVIA $\phi$ (mm)	CRITÉRIO DE COLAGEM	ENSAIO DE ARRANCAMENTO POR TRACÇÃO				OBSERVAÇÕES [i]
					EQUIPA.	DATA	FORÇA (KN)	TENSÃO (MPa)	
CB.5	prisma 15x15x55	⑨ 17/01/97	sem		Seta (I.C.)	23/07/97	10.52	3.33	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pastilha colada no betão com <i>Sikadur 30</i> da mistura “adesivo 3C”</li> <li>• ruíram pelo betão na secção adjacente ao adesivo e segundo um perímetro superior ao da pastilha (<b>Tipo 1</b>)</li> </ul>
CB.6	prisma 15x15x55		com 50 mm			09/05/97	6.70	3.41	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pastilha colada no betão com <i>Sikadur 30</i> da mistura “adesivo 3C”</li> <li>• ruína pelo betão na base da carote (<b>Tipo 1</b>)</li> </ul>
CB.7	Viga B.9		sem			16/03/98	2.07	1.05 (*)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pastilha colada no betão com “massa corfer”</li> <li>• ruína pelo betão adjacente à junta de colagem (<b>Tipo 1</b>)</li> </ul> (*) resultado excluído da análise

Tabela B.4 - Resultados dos ensaios de arrancamento por tracção – Vigas tipo A e tipo B (continuação).

AMOSTRA (Tipo)	VIGA OU PROVETE	AMASSADURA (Nº/Data)	CAROTAGEM PRÉVIA $\phi$ (mm)	CRITÉRIO DE COLAGEM	ENSAIO DE ARRANCAMENTO POR TRACÇÃO				OBSERVAÇÕES [i]
					EQUIPA.	DATA	FORÇA (KN)	TENSÃO (MPa)	
CB.8 CB.9 CB.10	1/2 prisma  (após ensaio à flexão)	⑨  17/01/97	sem		Seta (I.C.)	08/05/98	3.09 3.81 3.14	1.57 1.94 1.60	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pastilhas coladas no betão com “massa corfer”</li> <li>• ruíram pelo betão adjacente à junta de colagem (<b>Tipo 1</b>)</li> </ul>
CC.1 CC.2 CC.3	Viga  B.11	⑩  21/01/97	sem		Seta (I.C.)	13/03/98 a 16/03/98	3.65 2.65 5.54	2.66 1.35 (*) 2.51	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pastilha colada no betão com “massa corfer”</li> <li>• CC.1: ruína pelo betão adjacente à junta de colagem (<b>Tipo 1</b>); CC.3: ruína pelo betão e pela junta de colagem (<b>Tipo 2</b>); CC.2: ruína pela junta de colagem (<b>Tipo 3</b>)</li> </ul>
CC.4 CC.6 CC.8 CC.5 CC.7	1/2 prisma  (após ensaio à flexão)					08/05/98	2.38 2.83 2.73 3.92 3.93	1.21 1.44 1.39 2.00 2.00	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pastilhas coladas no betão com “massa corfer”: CC.4, CC.6, CC.8</li> <li>• pastilhas coladas no betão com “araldite rapid”: CC.5, CC.7</li> <li>• ruíram pelo betão adjacente à junta de colagem (<b>Tipo 1</b>)</li> </ul>

[i] - Os tipos de ruína estão descritos esquematicamente no Capítulo 4, Figura 4.4.

Tabela B.5 - Resultados dos ensaios de arrancamento por tracção – Vigas tipo C.

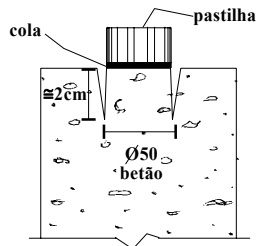
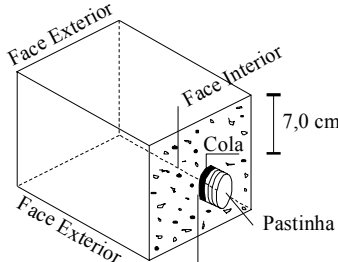
AMOSTRA (Tipo)	VIGA OU PROVETE	AMASSADURA (Nº/Data)	CAROTAGEM PRÉVIA $\phi$ (mm)	CRITÉRIO DE COLAGEM	ENSAIO DE ARRANCAMENTO POR TRACÇÃO				OBSERVAÇÕES [i]
					EQUIPA.	DATA	FORÇA (KN)	TENSÃO (MPa)	
CD.3	Viga	①	50 (prévia)	à superfície 	Seta (I.C.)	08/05/97	2,19	1,115	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pastilha colada sobre o betão com a cola (a): CD.3 - massa corfer (betume ferro+endurecedor) CD.4 - Araldite Rapid</li> </ul>
CD.4					Seta (I.C.)	23/05/97	2,21	1,125	
CD.5 (1ª)	C.1	27/07/90	50 (prévia)	no interior (7 cm) 	Seta (I.C.)	23/07/97	1,46	0,743	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pastilhas coladas sobre o betão com “massa corfer”</li> <li>• CD.5 e CD.7 ruiam pela ligação adesivo/pastilha porque estas eram novas. Os ensaios foram repetidos (1ª e 2ª vez) (ver fotos)</li> <li>• a generalidade dos casos ruiu pelo betão e próximo da base de carotagem (ver fotos)</li> </ul>
CD.5 (2ª)					Seta (I.C.)	28/07/97	1,96	0,998	
CD.6					Seta (I.C.)	23/07/97	2,19	1,12	
CD.7 (1ª)					Seta (I.C.)	23/07/97	1,62	0,825	
CD.7 (2ª)					Seta (I.C.)	28/07/97	2,06	1,05	
CD.8					Seta (I.C.)	23/07/97	2,83	1,44	



Tabela B.5 - Resultados dos ensaios de arrancamento por tracção – Vigas *tipo C* (continuação).

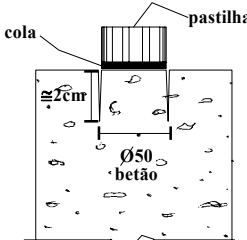
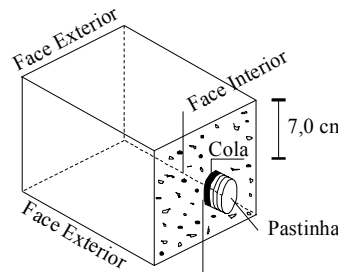
AMOSTRA (Tipo)	VIGA OU PROVETE	AMASSADURA (Nº/Data)	CAROTAGEM PRÉVIA $\phi$ (mm)	CRITÉRIO DE COLAGEM	ENSAIO DE ARRANCAMENTO POR TRACÇÃO				OBSERVAÇÕES [i]
					EQUIPA.	DATA	FORÇA (KN)	TENSÃO (MPa)	
CD.1	Viga	①	50 (prévia)	à superfície 	Seta (I.C.)	08/05/97	1,0	0,509	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pastilha colada sobre o betão com a cola utilizada no Laboratório de Estruturas: massa corfer - betume ferro + endurecedor</li> <li>• ruína no betão na camada imediatamente abaixo da colagem</li> </ul>
CD.2					Seta (I.C.)	08/05/97	1,73	0,881	
CD.9	C.2	27/07/90	50 (prévia)  no centro da secção transversal  sem carbonatação	no interior (7 cm) 	Seta (I.C.)	23/07/97	2,34	1,19	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pastilhas coladas sobre o betão com “massa corfer”</li> <li>• ruínas pelo betão e próximas da base de carotagem em praticamente todos os casos (ver fotos)</li> </ul>
CD.10					Seta (I.C.)	23/07/97	1,64	0,835	
CD.11					Seta (I.C.)	23/07/97	2,20	1,12	
CD.12					Seta (I.C.)	23/07/97	1,71	0,871	
CD.13					Seta (I.C.)	23/07/97	3,13	1,59	

Tabela B.5 - Resultados dos ensaios de arrancamento por tracção – Vigas *tipo C* (continuação).

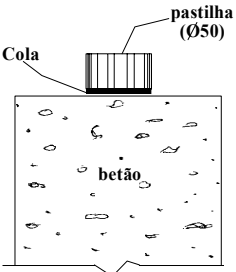
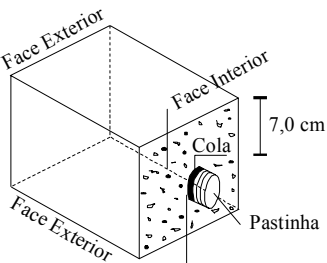
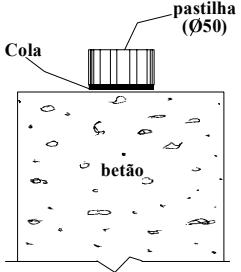
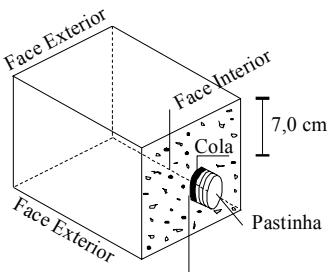
AMOSTRA (Tipo)	VIGA OU PROVETE	AMASSADURA (Nº/Data)	CAROTAGEM PRÉVIA $\phi$ (mm)	CRITÉRIO DE COLAGEM	ENSAIO DE ARRANCAMENTO POR TRACÇÃO				OBSERVAÇÕES [i]
					EQUIPA.	DATA	FORÇA (KN)	TENSÃO (MPa)	
CD.14	Viga	①	sem	à superfície 	Seta (I.C.)	13/03/98	4,20	1,90	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pastilhas coladas sobre o betão com “massa corfer”</li> <li>• ruínas pelo betão</li> </ul>
CD.15							3,80	1,94	
CD.16	C.4	27/07/90	50 (prévia)	no interior (7 cm) 	Seta (I.C.)	15/09/98	6.88	2.50	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A pastilha foi colada a ao betão com “Araldite Rapid</li> <li>• ruínas pelo betão com profundidade de 1 cm</li> </ul>
CD.17							no centro da secção transversa  sem carbonatação	Betão com carotagem até uma profundidade de 1.5cm  colagem: 10/09/97	

Tabela B.5 - Resultados dos ensaios de arrancamento por tracção – Vigas *tipo C* (continuação).

AMOSTRA (Tipo)	VIGA OU PROVETE	AMASSADURA (Nº/Data)	CAROTAGEM PRÉVIA $\phi$ (mm)	CRITÉRIO DE COLAGEM  à superfície	ENSAIO DE ARRANCAMENTO POR TRACÇÃO				OBSERVAÇÕES  [i]	
					EQUIPA.	DATA	FORÇA (KN)	TENSÃO (MPa)		
CD.18	Viga	①	sem		Seta (I.C.)	06/03/98	2,06	1,05	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pastilhas coladas sobre o betão com “massa corfer”</li> <li>• ruínas pelo betão</li> </ul> (*) amostra excluída da média	
CD.19										1,48
CD.20	C.5	27/07/90	50 (prévia)	no interior (7 cm)		Seta (I.C.)	15/09/98	3.30	1.70	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A pastilha foi colada ao betão com “Araldite Rapid</li> <li>• ruínas pelo betão com profundidade de 1 cm</li> </ul>
CD.21										

[i] - Os tipos de ruína estão descritos esquematicamente no Capítulo 4, Figura 4.4.

Tabela B.6 - Resumo dos ensaios de arrancamento por tracção nas lajes *Tipo R*.

Lajes		Betão [i] (idade, $f_{ctm,j}$ )	Preparação da superfície [ii]				Pastilha $\phi 50\text{mm}$		Resultados		$f_{ctm,p}$ (MPa)								
			Tratamento	Primário	Reparação	Carotagem	Adesivo [ii]	Provete	Modo de ruína	$f_{ct,p}$ (MPa)									
1.ª Fase	LC3R	50 dias 4.19 MPA	esmeril + jacto de ar	sem	sem	sem	massa corfer	PE.1	1	3.39	3.7								
							araldite rapid	PE.2	1	4.04									
				com PS 305	com L525	com	L700W	PE.3	1	3.34	3.4								
					sem			PE.4	2	3.41									
	sem	sem		sem	sem	PE.5	2	2.92	3.4										
						PE.6	2	3.82											
	LC4R	61 dias 4.2 MPA		sem	sem	sem	sem	massa corfer	PE.1	1	2.72	3.5							
								araldite rapid	PE.2	2	4.20								
				com PS 305	com L525	com	com	L700W	PE.4	1	3.65	3.6							
					sem			araldite rapid	PE.5	1	3.71								
sem			sem	sem	sem	sem	sem	PE.3	2	2.97	3.3								
								PE.6	1	3.23									
2.ª Fase	LA3R	335 dias 4.2 MPA	com PS 305	com L525	com	L700W	L700W	PE.1	4	3.53	3.8								
								PE.2	4	4.19									
								sem	sem	sem	sem	sem	sem	PE.3	4	3.67	3.7		
														PE.4	4	3.90			
	LB1R	308 dias 4.3 MPA		com L525	com		com	com	L700W	PE.1	4	4.04	3.9						
										PE.2	4	3.78							
										sem	sem	sem	sem	sem	sem	PE.3	4	4.78	3.9
																PE.4	4	3.26	

[i] - Propriedades das betonagens (A, B, C) das faixas de laje descritas no Capítulo 3;

[ii] - Produtos referidos no Capítulo 3 de acordo com os boletins técnicos dos fornecedores.

Tabela B.7 - Resumo dos ensaios de arrancamento por tracção nas lajes *Tipo S*.

Lajes		Betão [i] (idade, $f_{ctm,j}$ )	Preparação da superfície [ii]				Pastilha $\phi 50\text{mm}$		Resultados		$f_{ctm,p}$ (MPa)
			Tratamento	Primário	Reparação	Carotagem	Adesivo [ii]	Provete	Modo de ruína	$f_{ct,p}$ (MPa)	
1. <sup>a</sup> Fase	LC1S	53 dias 4.2 MPA	martelo de agulhas + jacto de ar	sem	sem	sem	massa corfer	PM.1	1	1.99 <sup>(*)</sup>	2.2
								PM.4	2	2.21	
	<i>Sikadur 30</i>						PM.2	1	3.42	3.8	
							PM.3	1	4.13		
LC2S	massa corfer	PM.1					1	2.65	2.4		
		PM.4					1	2.13			
<i>Sikadur 30</i>	PM.2	1					3.52	3.9			
		PM.3					1		4.48		
2. <sup>a</sup> Fase	LA4S	335 dias 4.2 MPA	com	<i>Sikadur 30</i>	PE.1	1	4.38	3.7			
					PE.2	1	3.53				
					PE.3	1	3.41				
					PE.4	1	3.55				
	LB2S				308 dias 4.3 MPA	PE.1	1	3.99	3.9		
						PE.2	1	3.87			
						PE.3	1	3.60			
						PE.4	1	4.25			

[i] - Propriedades das betonagens (A, B, C) das faixas de laje descritas no Capítulo 3;

[ii] - Produtos referidos no Capítulo 3 de acordo com os boletins técnicos dos fornecedores;

(\*) - Amostra excluída na análise.

Tabela B.8 – Resumo dos ensaios de aderência ("pull-off") nos prismas (s/ primário).

Superfície de betão	Betonagem [i]	Pastilha ( $\phi 50\text{mm}$ )	Modo de ruína	$f_{ct,p}$ (MPa)	$f_{ctm,p}$ (MPa)	
1 – Ensaios sem carotagem prévia						
Esmeril	A	PE.4	1	3.31	3.2	3.4
		PE.5	1	3.01		
	B	PE.4	1	3.20	3.4	
		PE.5	1	3.60		
	C	PE.4	1	3.20	3.6	
		PE.5	1	4.01		
Martelo de agulhas	A	PM.1	1	1.93	2.2	1.9
		PM.2	1	2.48		
	B	PM.2	1	1.81	1.7	
		PM.3	1	1.60		
	C	PM.2	2	1.64	1.9	
		PM.3	1	2.10		
2 - Ensaios com carotagem prévia						
Martelo de agulhas	A	PM.3	1	1.86	1.9	1.8
	B	PM.1	2	1.56	1.6	
	C	PM.1	1	2.00	2.0	

[i] - Os ensaios foram realizados em betões com 98 dias (betonagem A), com 71 dias (betonagem B) e com 64 dias (betonagem C).

Os valores médios da resistência à tração simples do betão aos 28 dias ( $f_{ctm,28}$ ) e nos "j" dias dos ensaios de "pull-off" ( $f_{ctm,j}$ ) são os seguintes:

Betonagem	$f_{ctm,28}$ (MPa)	Betão (idade)	$f_{ctm,j}$ (MPa)
A	3.5	98 dias	4.5
B	3.6	71 dias	4.5
C	3.8	64 dias	5.0

Tabela B.9 – Resumo dos ensaios de aderência ("pull-off") nos prismas (c/ primário).

Superfície de betão	Betonagem [i]	Pastilha ( $\phi 50\text{mm}$ )	Modo de ruína	$f_{ct,p}$ (MPa)	$f_{ctm,p}$ (MPa)	
1 - Ensaio sem carotagem prévia						
Esmeril + primário	A	PE.1	1	3.94	3.9	4.7
		PE.2	1	3.94		
	B	PE.2	3	5.10	5.1	
	C	PE.2	3	5.03	5.0	
Martelo de agulhas + primário	A	PM.4	1	4.35	4.3	4.7
		PM.5	2	4.19		
	B	PM.4	2	4.89	4.9	
	C	PM.4	2	4.30	4.8	
		PM.5	1	5.30		
2 – Ensaio com carotagem prévia						
Esmeril + primário	A	PE.3	2	3.05	3.0	3.7
	B	PE.3	2	4.50		
	C	PE.3	1	3.61	3.6	
3 – Reparação pontual com L525 e sem carotagem prévia						
Esmeril + primário	B	PE.1	1	5.20	5.2	5.5
	C	PE.1	1	5.80		
Martelo de agulhas + primário	B	PM.5	1	5.39	5.3	5.3

[i] - Os ensaios foram realizados em betões com 98 dias (betonagem A), com 71 dias (betonagem B) e com 64 dias (betonagem C).

Os valores médios da resistência à tracção simples do betão aos 28 dias ( $f_{ctm, 28}$ ) e nos "j" dias dos ensaios de "pull-off" ( $f_{ctm, j}$ ) são os seguintes:

Betonagem	$f_{ctm, 28}$ (MPa)	Betão (idade)	$f_{ctm, j}$ (MPa)
A	3.5	98 dias	4.5
B	3.6	71 dias	4.5
C	3.8	64 dias	5.0

# Anexo C

## Ensaio de Flexão

Neste anexo, resume-se os principais resultados (desenhos, valores e observações) obtidos nos ensaios de flexão em quatro pontos, para as séries de vigas e de faixas de laje estudadas neste trabalho. Por comodidade, toda a informação é centrada em tabelas tipo, como se expõe em seguida.

Tabela tipo para uma viga.

Esquema do alçado da viga após ruína								
Viga	Com reforço				Ruína			
	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu\text{ m/m}$ )	Betão/adensivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu\text{ m/m}$ )	Betão/adensivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)
①	②	②	②	②	③	③	③	③
Observações	④							

Tabela tipo para uma faixa de laje.

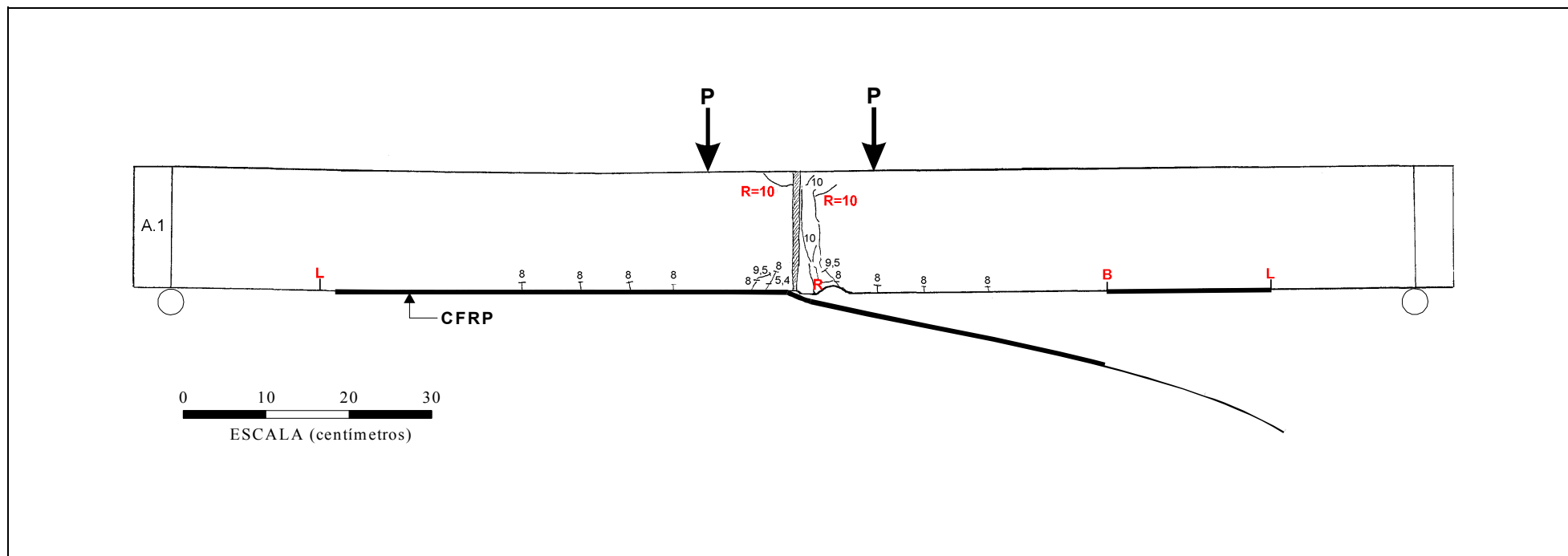
Esquema da planta e do alçado da laje após ruína										
Laje	Com Reforço					Ruína do Reforço				
	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	Betão $\epsilon_{\text{cm máx.}}$ ( $^{\circ}/_{\infty}$ )	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu\text{ m/m}$ )	Betão/adensivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	Betão $\epsilon_{\text{cm máx.}}$ ( $^{\circ}/_{\infty}$ )	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu\text{ m/m}$ )	Betão/adensivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)
①	②	②	②	②	②	③	③	③	③	③
Observações	④									

Legenda:

- ① - identificação do modelo testado;
- ② - valores máximos da carga total do ensaio, deslocamento central do modelo e extensão do CFRP medidos, enquanto não ocorre o destacamento do reforço;
- ③ - valores máximos idênticos ao ponto ② medidos no instante anterior ao destacamento do reforço;
- ④ - notas adicionais resultantes da análise visual dos modelos durante e após o teste.

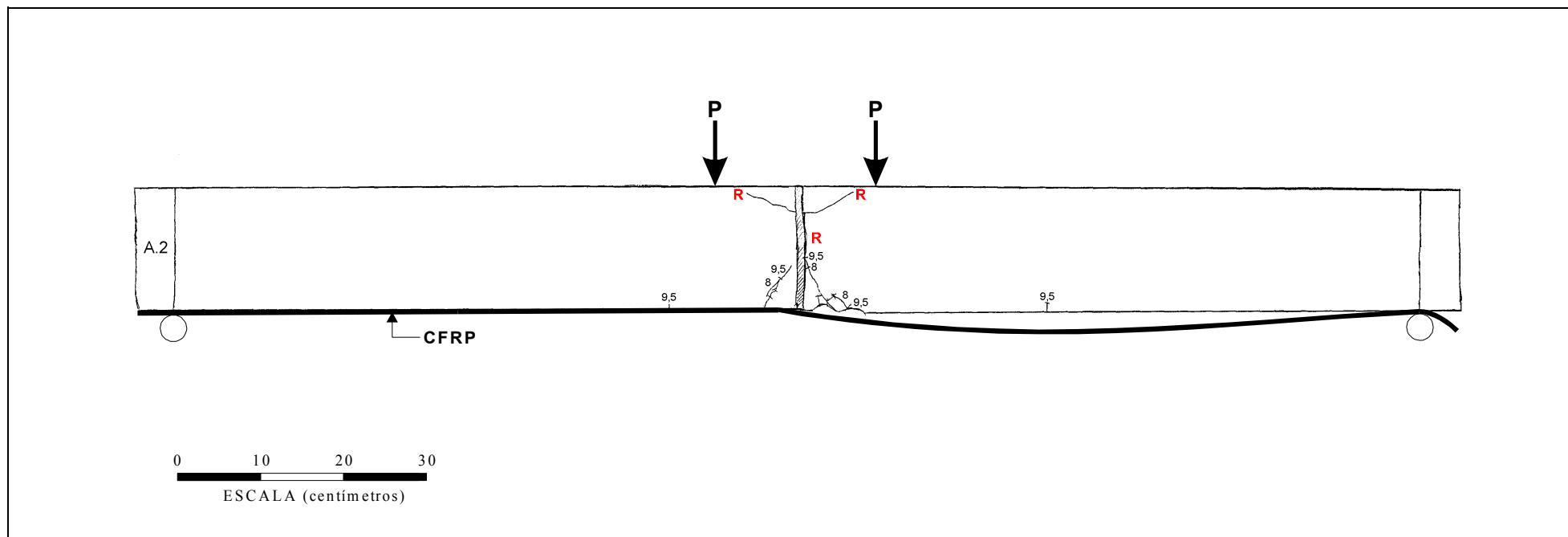


Tabela C.1 – Resultados da viga A.1.



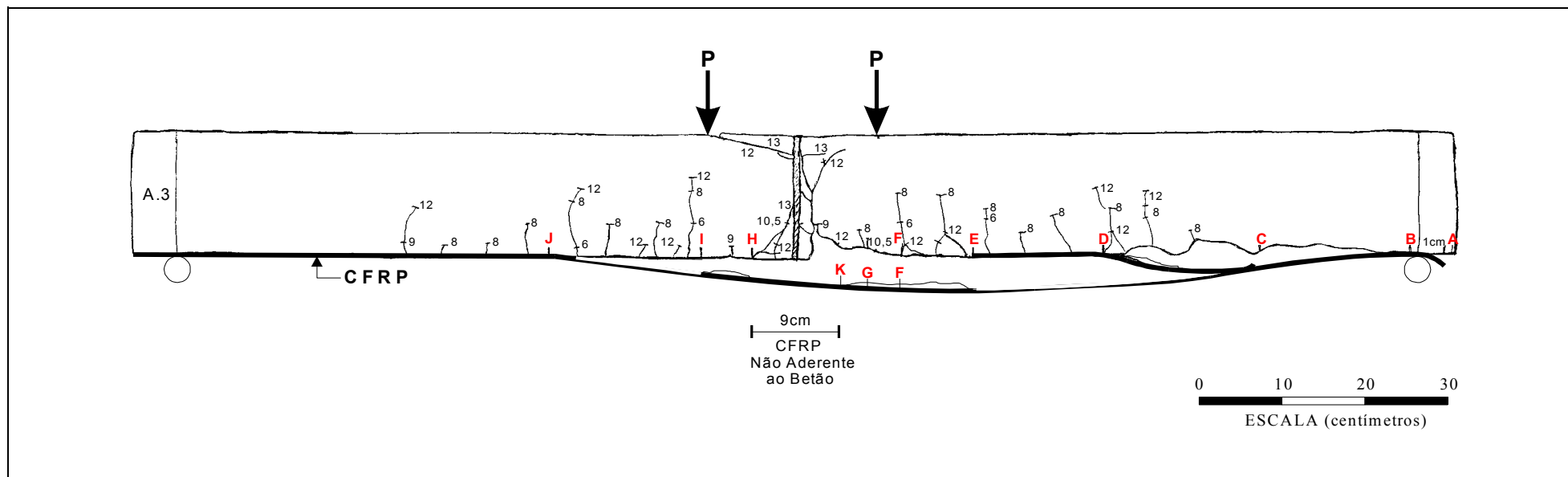
Viga	Com reforço				Ruína			
	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu$ m/m)	Betão/adeseivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu$ m/m)	Betão/adeseivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)
A.1	20.5	5.40 (lvdt 3) 5.14 (lvdt 6)	sem extensómetros		20.4	7.25 (lvdt 3) 6.89 (lvdt 6)	sem extensómetros	
Observações	A fendilhação principal ocorreu na zona central, sendo reduzida fora desta zona. Notou-se maior deformação na parte direita da viga. A ruína surgiu de uma forma brusca, por destacamento da parte direita do laminado em relação ao betão. Por observação desta parte demarcam-se 2 zonas morfológicas diferentes: 1) $\overline{LB} = 20$ cm ruína interlaminar do CFRP; 2) 35 cm de ruína por arrancamento do betão.							

Tabela C.2 - Resultados da viga A.2.



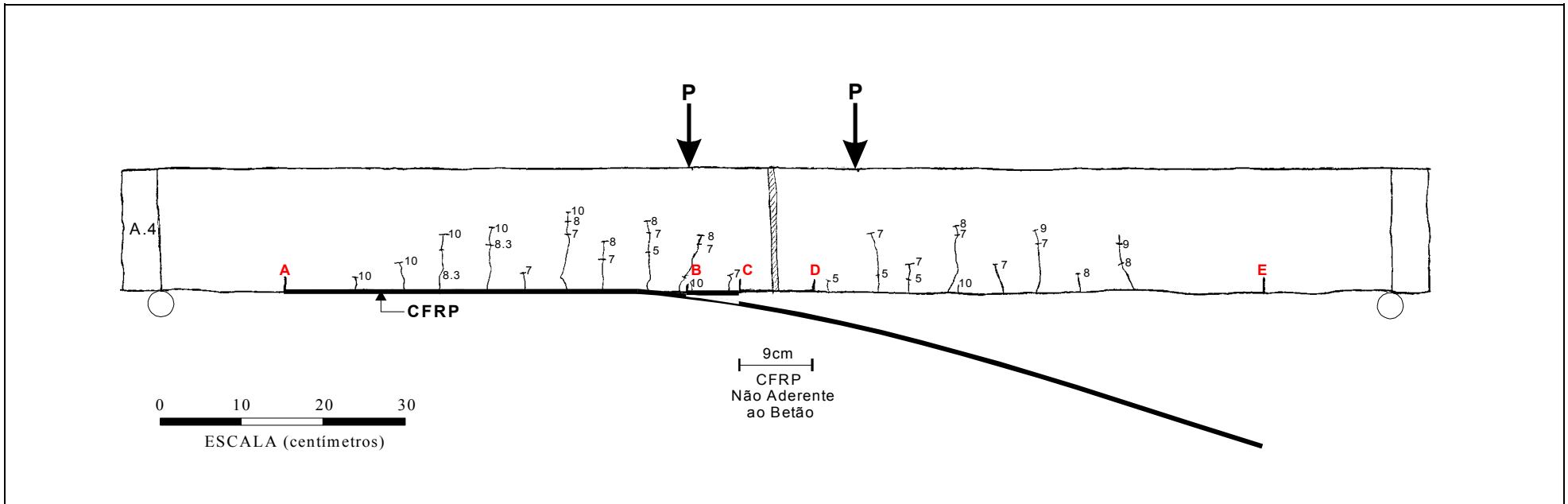
Viga	Com reforço				Ruína			
	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu\text{ m/m}$ )	Betão/adeseivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu\text{ m/m}$ )	Betão/adeseivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)
A.2	19.3	4.93 (lvdt 3) 4.44 (lvdt 6)	sem extensómetros		17.3	6.7 (lvdt 3) 6.05 (lvdt 6)	sem extensómetros	
Observações	<p>A fendilhação é bastante reduzida, excepto na zona central.</p> <p>Próximo da carga total de 19.0 kN, observou-se o início do destacamento parcial do laminado para a esquerda (13 cm) e para a direita (27.5 cm) da zona central não colada.</p> <p>Como previsto, a ruína ocorreu por destacamento total do laminado no lado direito e na zona de interface adesivo/betão.</p>							

Tabela C.3 – Resultados da viga A.3.



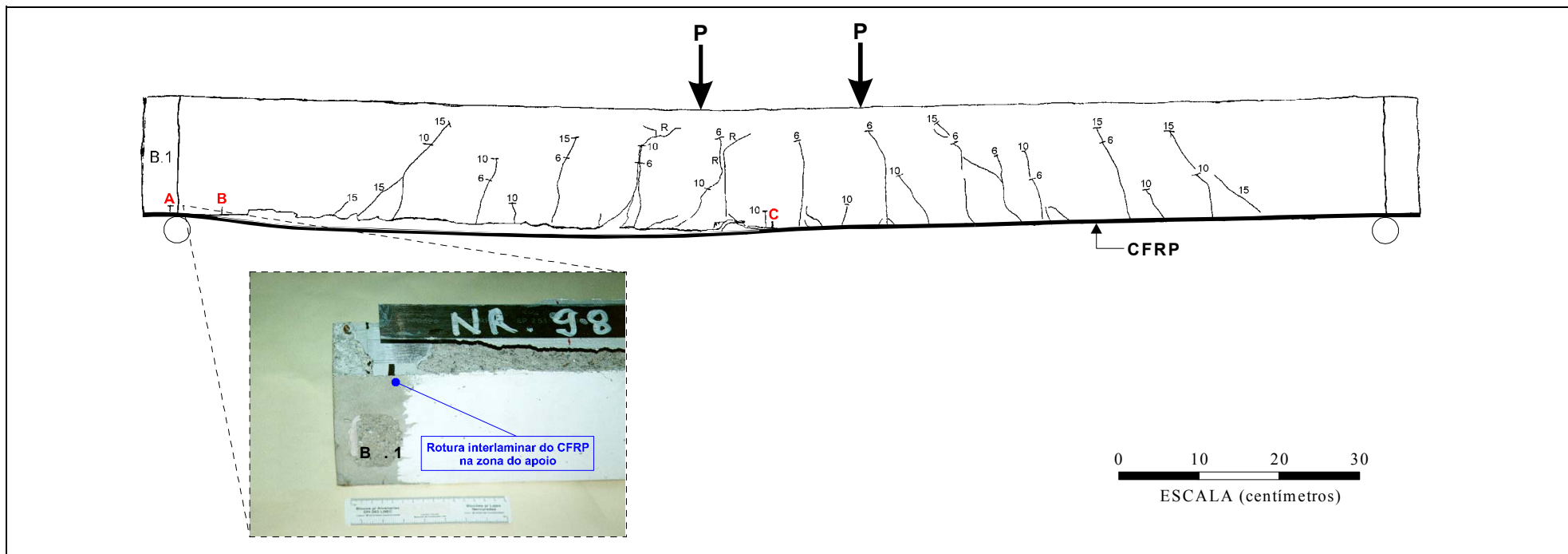
Viga	Com reforço				Ruína			
	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu\text{ m/m}$ )	Betão/adeseivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu\text{ m/m}$ )	Betão/adeseivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)
A.3	26.0	8.62	5778.3	4251.8	23.5	11.69	5047.0	4469.4
Observações	<p>A fendilhação principal ocorreu na zona central da viga, progredindo para os apoios com o aumento da carga. As fendas são, essencialmente, de flexão e com um afastamento regular entre elas. A aproximação da ruína faz-se notar através da audição de sucessivos sons crepitantes resultantes de fendas do betão que progredem na espessura do adesivo, seguido do destacamento de troços de betão entre fendas consecutivas (casos assinalados pelas fendas E, F, G, K, H e I).</p> <p>A ruína foi do tipo frágil por destacamento da parte direita do laminado. Ao longo da superfície de ruína observam-se zonas com morfologias diferentes como: <math>\overline{AB}</math> - escorregamento de 1 cm no apoio devido à ruína interlaminar; <math>\overline{BC}</math> (15cm) e <math>\overline{HI}</math> (6cm) têm corte no betão; <math>\overline{CD}</math> (19cm) resulta de corte no betão e ruína interlaminar; <math>\overline{DE}</math> (16cm) e <math>\overline{IJ}</math> (19cm) têm ruína interlaminar; <math>\overline{EK}</math> (17cm) é provocado por arrancamento do betão.</p>							

Tabela C.4 – Resultados da viga A.4.



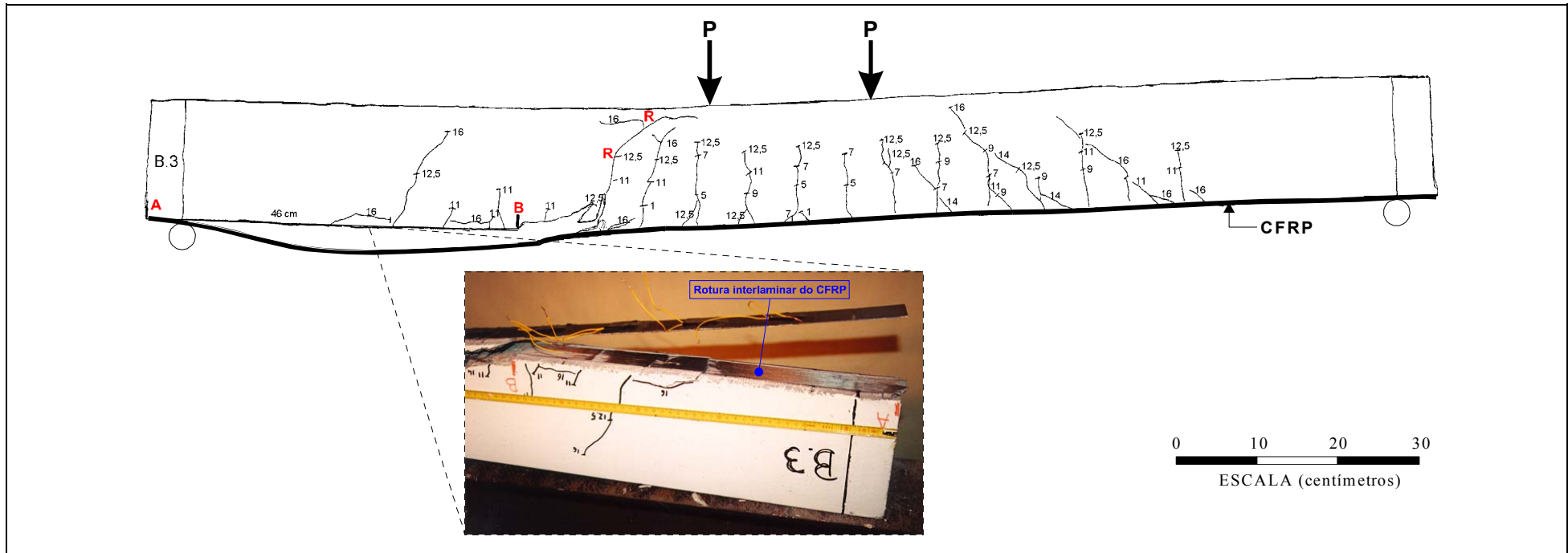
Viga	Com reforço				Ruína			
	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu\text{ m/m}$ )	Betão/adeseivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu\text{ m/m}$ )	Betão/adeseivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)
A.4	20.4	3.56	4398.1	2966.4	20.4	5.70	4439.3	3045.5
Observações	<p>A fendilhação ocorreu por formação de fendas de flexão igualmente espaçadas. Notou-se maior comprimento das fendas no centro das zonas de CFRP coladas ao betão, isto é, nas zonas <math>\overline{AC}</math> e <math>\overline{DE}</math> com 55 cm de comprimento.</p> <p>A ruína surgiu de uma forma brusca por destacamento da parte direita do laminado em relação ao betão. Por observação desta parte demarcam-se 3 zonas morfológicas diferentes: 1) <math>\overline{BC} = 20\text{ cm}</math> com ruína interlaminar do CFRP; 2) <math>\overline{CD} = 9\text{ cm}</math> de laminado não colado ao betão durante o reforço; 3) <math>\overline{DE} = 55\text{ cm}</math> com ruína por arrancamento do betão.</p>							

Tabela C.5 - Resultados da viga B.1



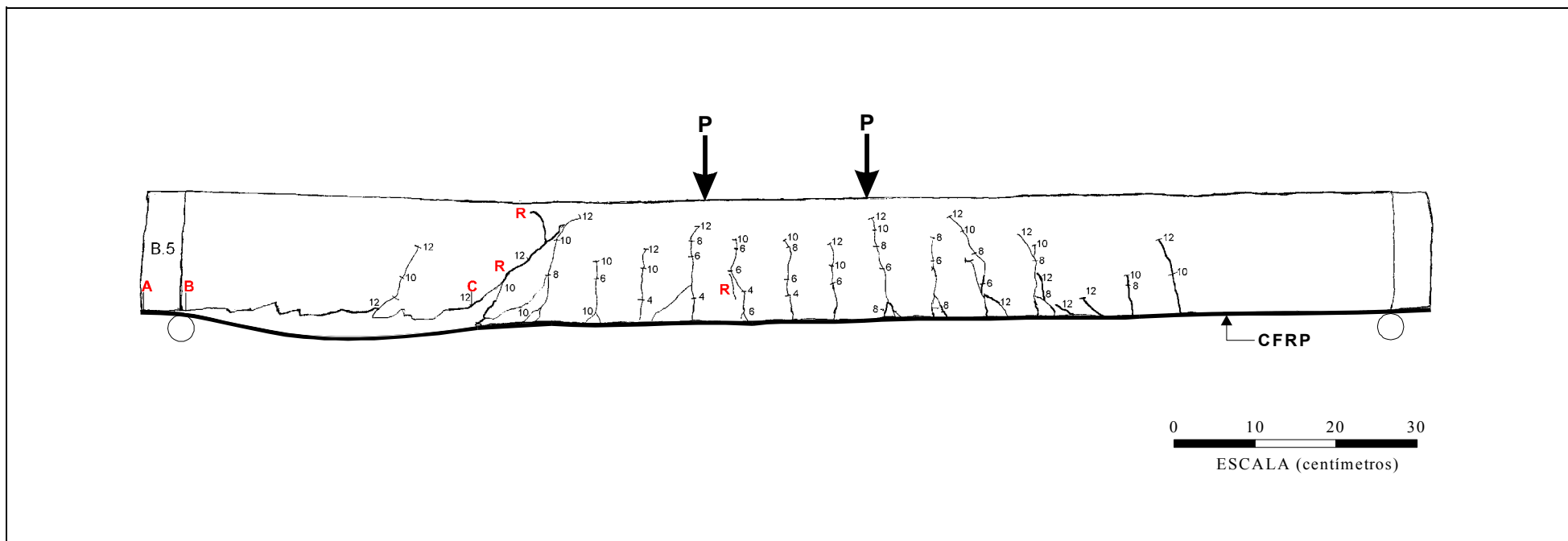
Viga	Com Reforço				Ruína			
	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu\text{ m/m}$ )	Betão/adesivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu\text{ m/m}$ )	Betão/adesivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)
B.1	31.2	11.25	sem extensómetros		31.2	11.25	sem extensómetros	
Observações	O modelo apresentou um padrão de fendilhação uniformemente distribuída ao longo da viga. A ruína ocorreu bruscamente por escorregamento do laminado no apoio ( $\overline{AB} \approx 6.5\text{ cm}$ ) e destacamento do betão ao longo da interface betão-adensivo ( $\overline{BC} \approx 69\text{ cm}$ ). Este sistema foi despoletado pelo avanço desmesurado do comprimento das fendas no sentido da camada de compressão do betão.							

Tabela C.6 – Resultados da viga B.3



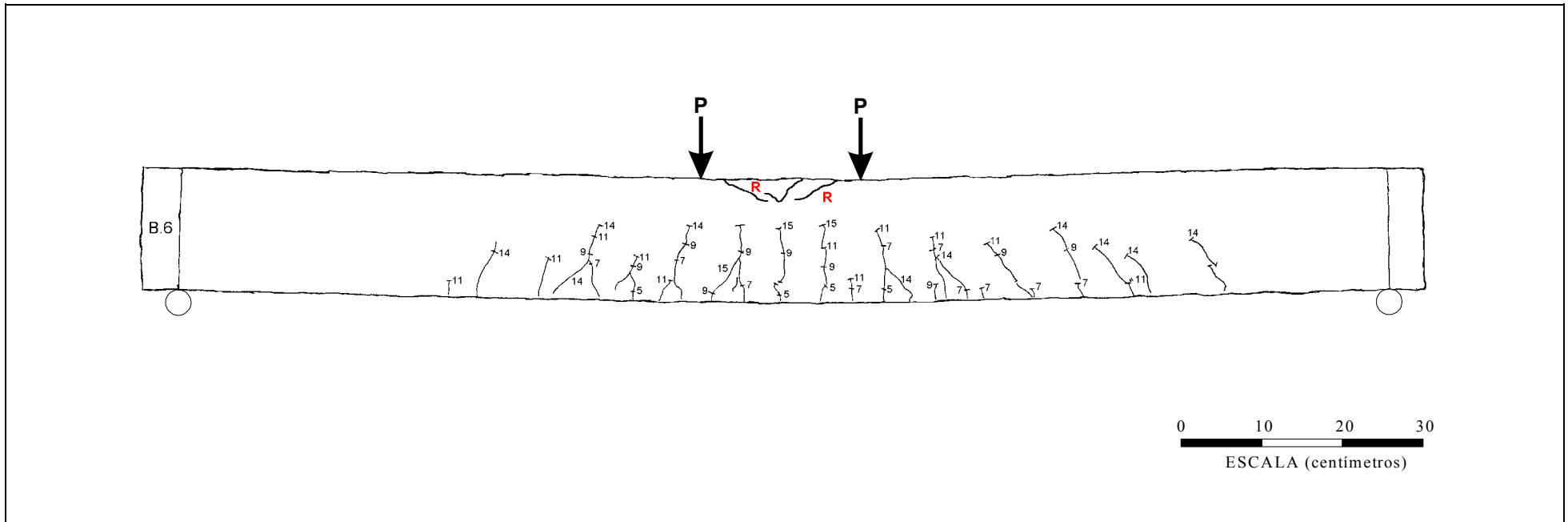
Viga	Com Reforço				Ruína			
	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu\text{ m/m}$ )	Betão/adeseivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu\text{ m/m}$ )	Betão/adeseivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)
B.3	32.05	11.1	6346.0	3357.0	31.1	11.6	6197.6	5022.6
Observações	A regularização da superfície de colagem com o primário ( <i>Sikadur 31</i> ) conduziu ao melhoramento da ligação laminado/betão na interface. A ruína foi brusca devido ao desenvolvimento acentuado de uma fenda de corte sob a célula de carga e consequente destacamento do CFRP por ruína interlaminar desde a fenda até ao extremo da viga ( $\overline{AB} = 46\text{ cm}$ ).							

Tabela C.7 – Resultados da viga B.5.



Viga	Com Reforço				Ruína			
	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu\text{ m/m}$ )	Betão/adesivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu\text{ m/m}$ )	Betão/adesivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)
B.5	26.0	8.5	4753.7	2635.3	24.6	9.16	3119.0	3490.3
Observações	<p>A viga apresentou uma fendilhação típica de flexão e de corte de uma estrutura de betão armado e com a localização destas próximas das posições dos estribos.</p> <p>A ruína foi brusca por destacamento do laminado e desenvolvimento de uma fenda de corte direccionada para a posição da carga. O destacamento do laminado observou-se num troço por arrancamento superficial do betão (<math>\overline{BC} \approx 35\text{ cm}</math>) e outro por escorregamento no apoio com corte interlaminar do CFRP (<math>\overline{AB} \approx 5.5\text{ cm}</math>).</p>							

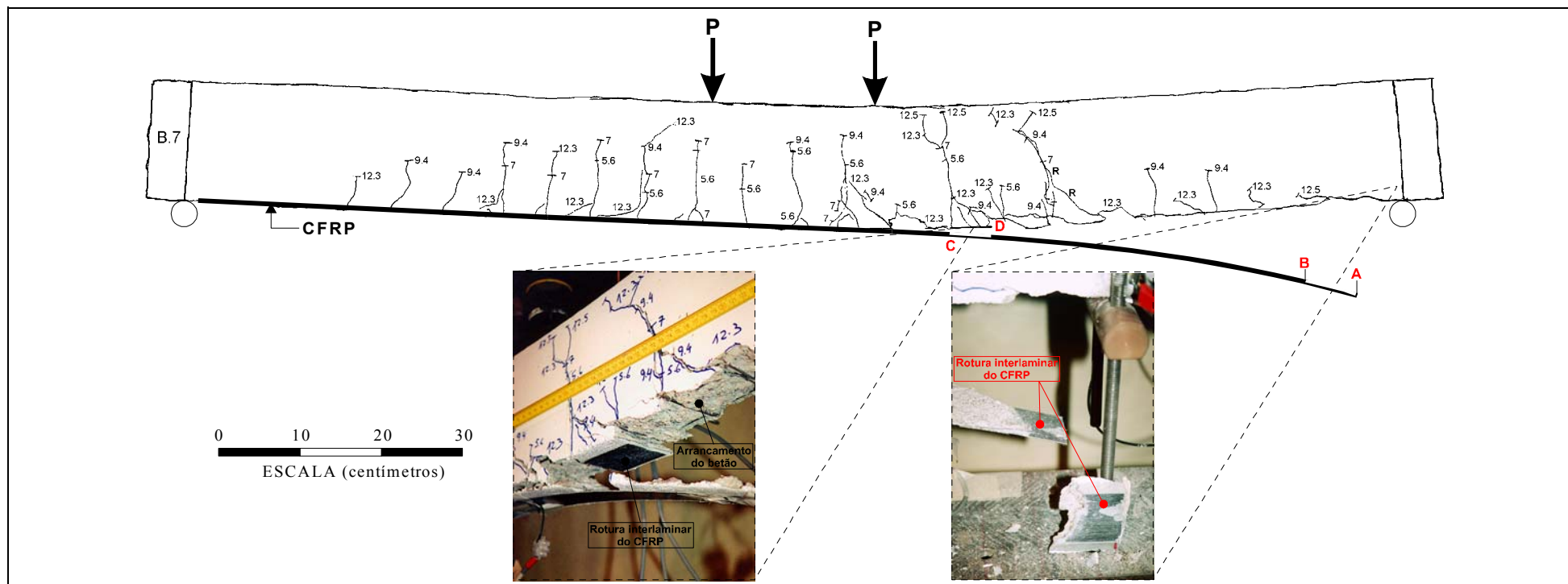
Tabela C.8 – Resultados da viga B.6.



Viga	Com Reforço				Ruína			
	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu$ m/m)	Betão/adesivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu$ m/m)	Betão/adesivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)
B.6	-	-	sem extensómetros		29.8	12.3	sem extensómetros	
Observações	A viga apresenta um padrão de fendilhação regular. A ruína ocorreu por esmagamento da camada de compressão do betão na zona central.							

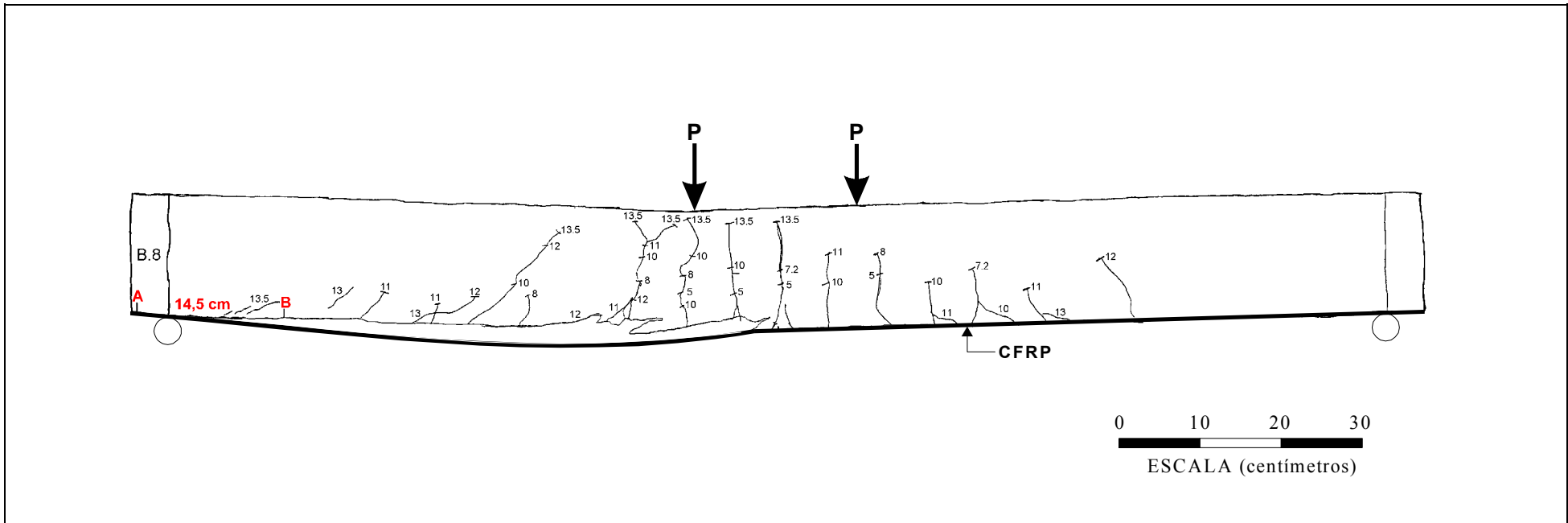


Tabela C.9 – Resultados da viga B.7.



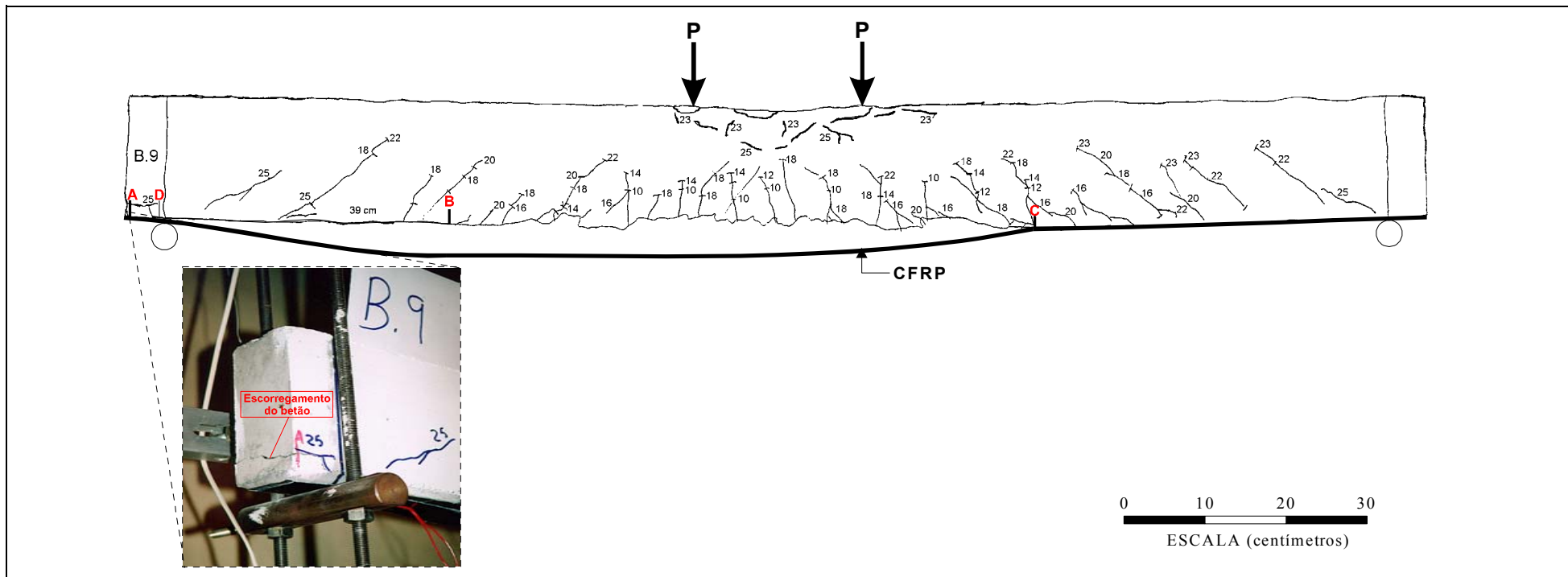
Viga	Com Reforço				Ruína			
	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu\text{ m/m}$ )	Betão/adeseivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu\text{ m/m}$ )	Betão/adeseivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)
B.7	25.0	8.06	4491.6	1797.0	24.6	8.36	4580.2	1667.4
Observações	<p>Apresenta um padrão de fendilhação bastante acentuado e distribuído ao longo da viga.</p> <p>A ruína surgiu bruscamente por destacamento do laminado na extremidade direita e com o desenvolvimento de duas fendas de corte direccionadas para a secção de carga. Ao longo da superfície de ruína observa-se, primeiro, na extremidade do laminado o efeito do "peeling" (<math>\overline{AB} \approx 6\text{ cm}</math> - ruína interlaminar), depois, o arrancamento do betão (<math>\overline{BD} \approx 41\text{ cm}</math>) e, por fim, um pequeno troço com delaminação <math>\overline{DC} \approx 7\text{ cm}</math>.</p>							

Tabela C.10 – Resultados da viga B.8.



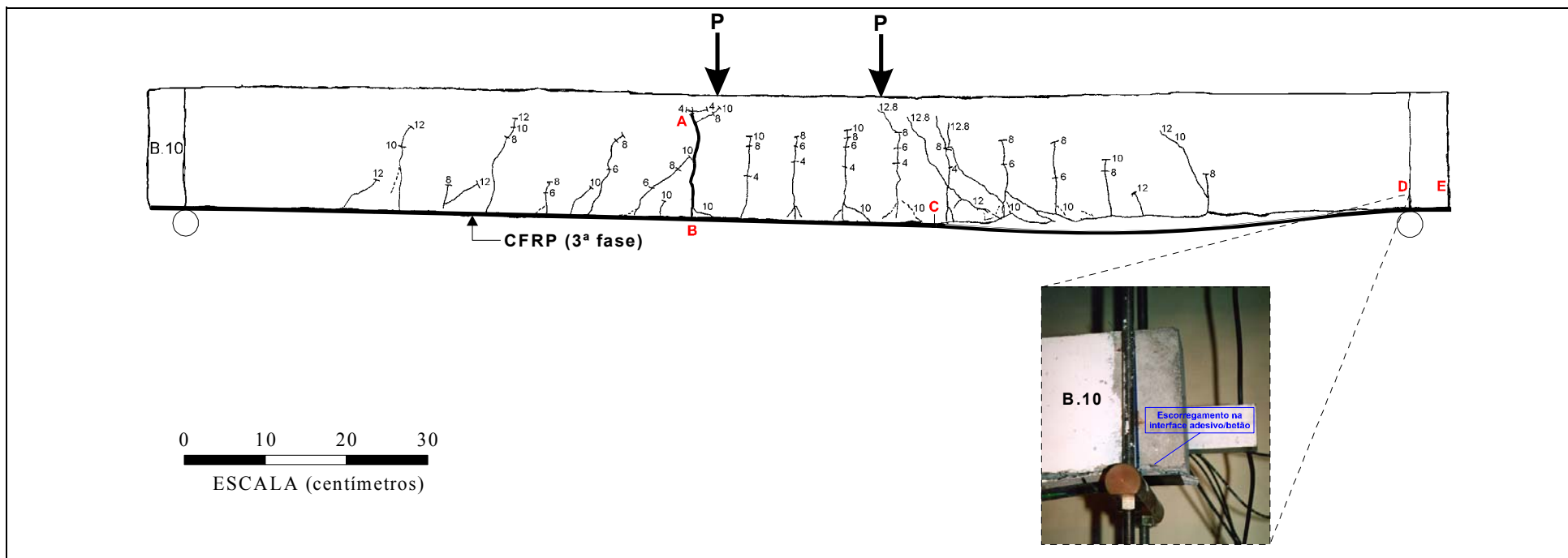
Viga	Com Reforço				Ruína			
	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu\text{ m/m}$ )	Betão/adesivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu\text{ m/m}$ )	Betão/adesivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)
B.8	-	-	-	-	27.0	9.8	4844.3	3456.9
Observações	A viga apresentou uma fendilhação muito demarcada na zona central de flexão, onde as mesmas fendas se desenvolveram, praticamente, até à camada superior do betão. A ruína ocorreu de forma brusca por destacamento do laminado e com acentuada fendilhação por flexão. Observou-se uma zona de escorregamento sobre o apoio com corte interlaminar ( $\overline{AB} = 14,5\text{ cm}$ ) e a restante por arrancamento do betão resultante do corte entre fendas.							

Tabela C.11 – Resultados da viga B.9.



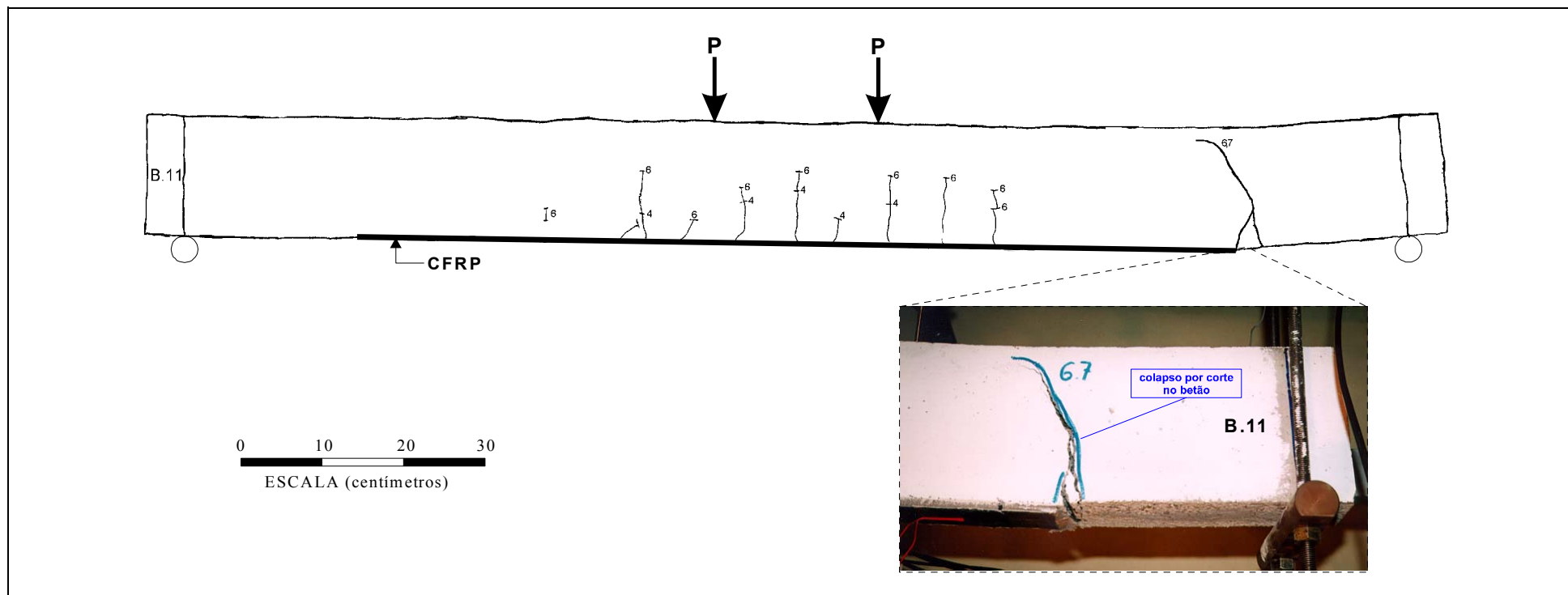
Viga	Com Reforço				Ruína			
	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu$ m/m)	Betão/adeseivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu$ m/m)	Betão/adeseivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)
B.9	50.0	16.6	7213.5	2657.4	46.3	18.0	6905.0	4448.8
Observações	<p>A face inferior da viga armada com <math>3\phi 8</math> e, posteriormente, reforçada com CFRP provocou um aumento de resistência do modelo comparado com os outros. O estado de fendilhação apresentou-se bastante demarcado em toda a viga.</p> <p>A ruína ocorreu de um modo brusco com o destacamento do laminado, mas depois de se ter instalado algum grau de esmagamento na camada superior de compressão do betão. Observou-se ao longo da zona destacada do laminado um sector com corte pelo betão sobre o apoio (<math>\overline{AD} = 4</math> cm), seguido de outro com ruína interlaminar (<math>\overline{DB} = 39</math> cm) e um final por arrancamento do betão adjacente à interface betão/adeseivo (<math>\overline{BC} = 73</math> cm).</p>							

Tabela C.12 – Resultados da viga B.10 (1ª e 3ª fases)



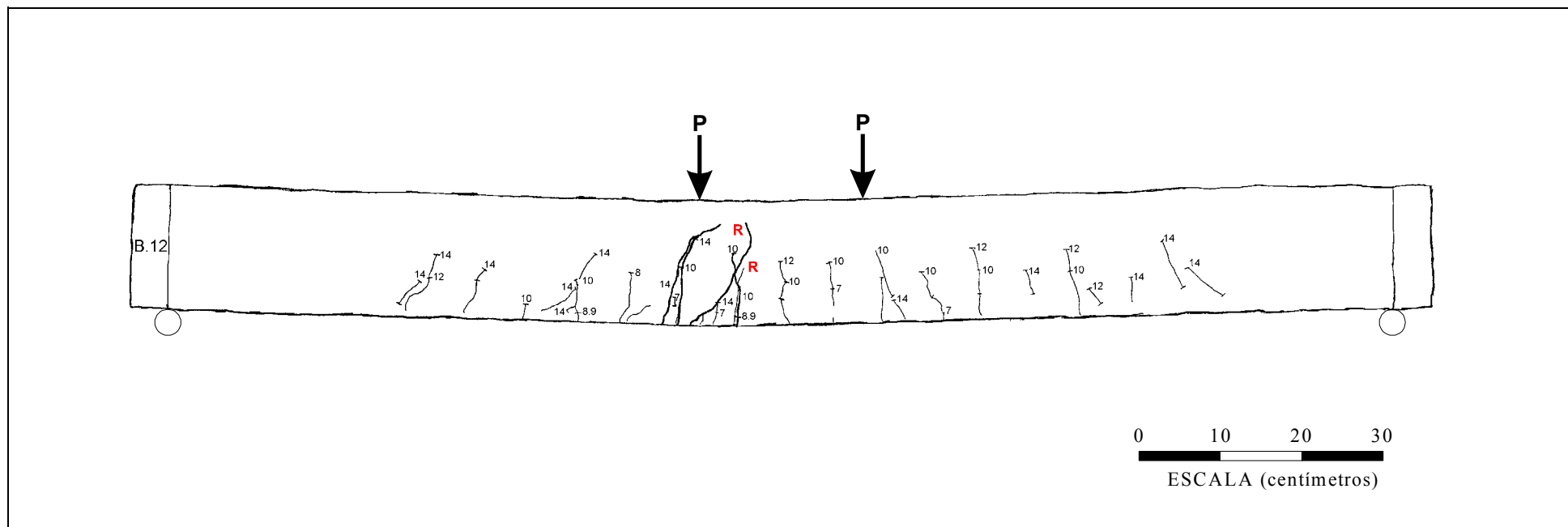
Viga	Com Reforço				Ruína			
	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{m\acute{a}x.}$ ( $\mu$ m/m)	Betão/adeseivo $\tau_{m\acute{a}x.}$ (kPa)	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{m\acute{a}x.}$ ( $\mu$ m/m)	Betão/adeseivo $\tau_{m\acute{a}x.}$ (kPa)
B.10	1ª Fase: 1.2 3ª Fase: 25.4	0.24 8.6	- 4961.0	- 3079.4	- 25.3	- 8.7	- 4971.6	- 2757.4
Observações	1ª Fase: Observou-se a formação de uma única fenda AB sobre a secção de carga. 2ª Fase: A pré-fendilhação não modificou o tipo de fendilhação que ocorreu nesta fase. Esta fenda inicial progrediu apesar da secção respectiva não vir a ser a efectiva de ruína. A rotura ocorreu por destacamento do laminado originado pelo arrancamento do betão entre fendas de corte bem acentuadas ( $\overline{CD} \approx 58$ cm) e escorregamento na interface adesivo-betão ( $\overline{DE} \approx 5$ cm).							

Tabela C.13 – Resultados da viga B.11.



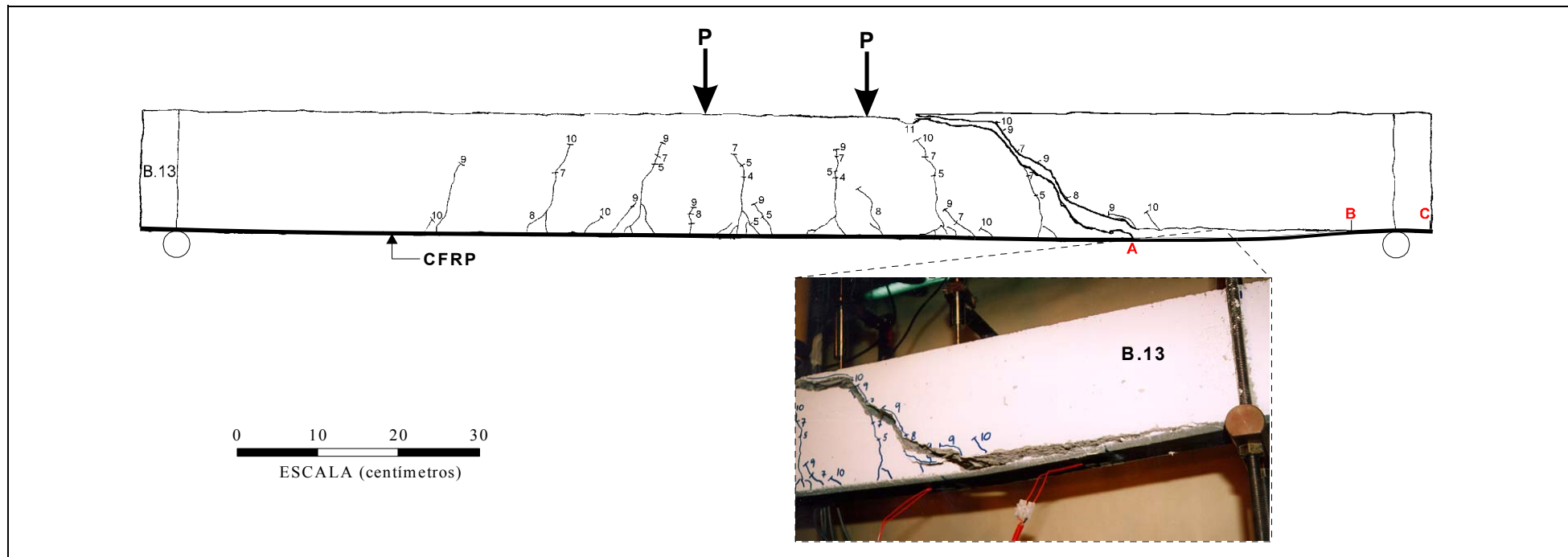
Viga	Com Reforço				Ruína			
	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu$ m/m)	Betão/adesivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu$ m/m)	Betão/adesivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)
B.11	13.4	3.14	1841.0	1539.7	13.4	3.14	1841.0	1539.7
Observações	A ruína ocorreu por desenvolvimento pronunciado de uma fenda de corte na secção correspondente à extremidade do laminado colado à face da viga. Rotura típica de insuficiente resistência da viga ao corte.							

Tabela C.14 – Resultados da viga B.12.



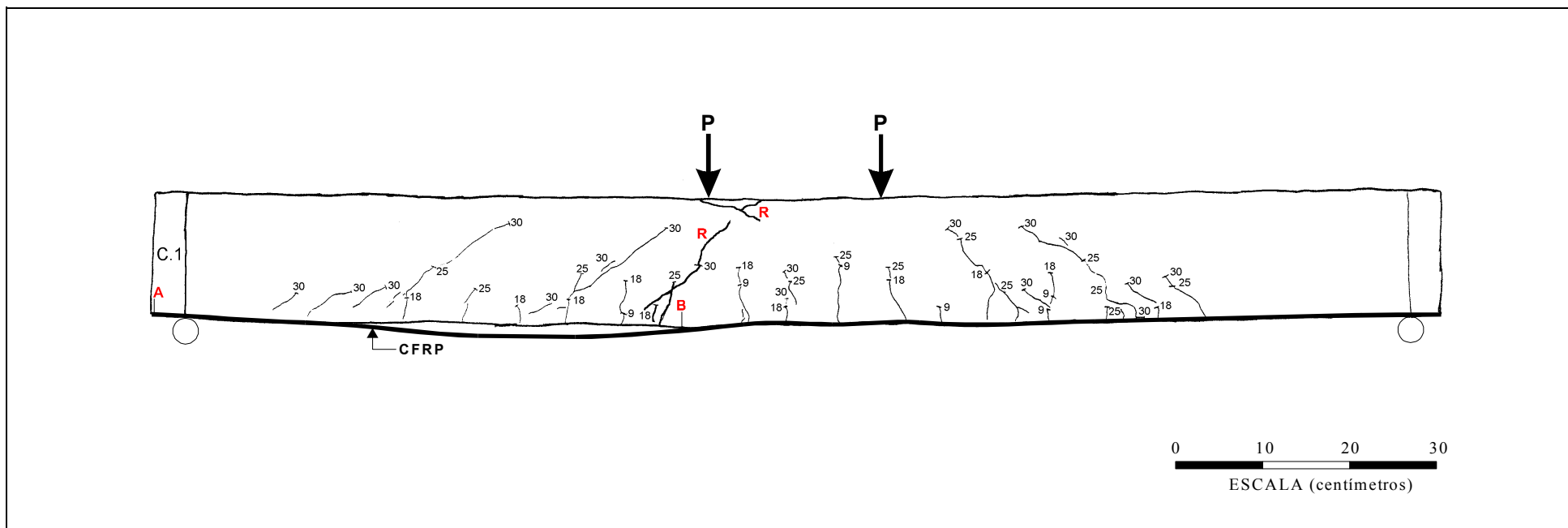
Viga	Com Reforço				Ruína			
	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu$ m/m)	Betão/adesivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu$ m/m)	Betão/adesivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)
B.12	-	-	sem extensómetros		29.51 (1º) 26.4 (2º)	15.3 27.0	sem extensómetros	
Observações	<p>A viga tem uma fendilhação regular típica de uma viga de betão armado.</p> <p>A ruína principiou com o desenvolvimento acentuado de duas fendas de flexão sobre a zona de uma das cargas (1º), estabelecendo-se de seguida a carga última, com o início do esmagamento do betão na zona central (2º).</p>							

Tabela C.15 – Resultados da viga B.13.



Viga	Com Reforço				Ruína			
	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu\text{ m/m}$ )	Betão/adesivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu\text{ m/m}$ )	Betão/adesivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)
B.13	20.83	6.7	3639.5	1839.5	18.85	7.0	3352.3	1702.6
Observações	<p>Observou-se uma fendilhação por flexão com fendas afastadas entre si semelhante ao afastamento e posição dos estribos.</p> <p>A rotura da viga ocorreu de uma forma gradual (não frágil) por escorregamento antecipado de duas partes, segundo uma fenda de corte orientada para a posição da carga. Este facto originou, seguidamente, o destacamento do CFRP (<math>\overline{AB} \approx 30\text{ cm}</math>) sem escorregamento deste no apoio (<math>\overline{BC} = 7\text{ cm}</math>), isto é, mantendo a colagem aderente.</p>							

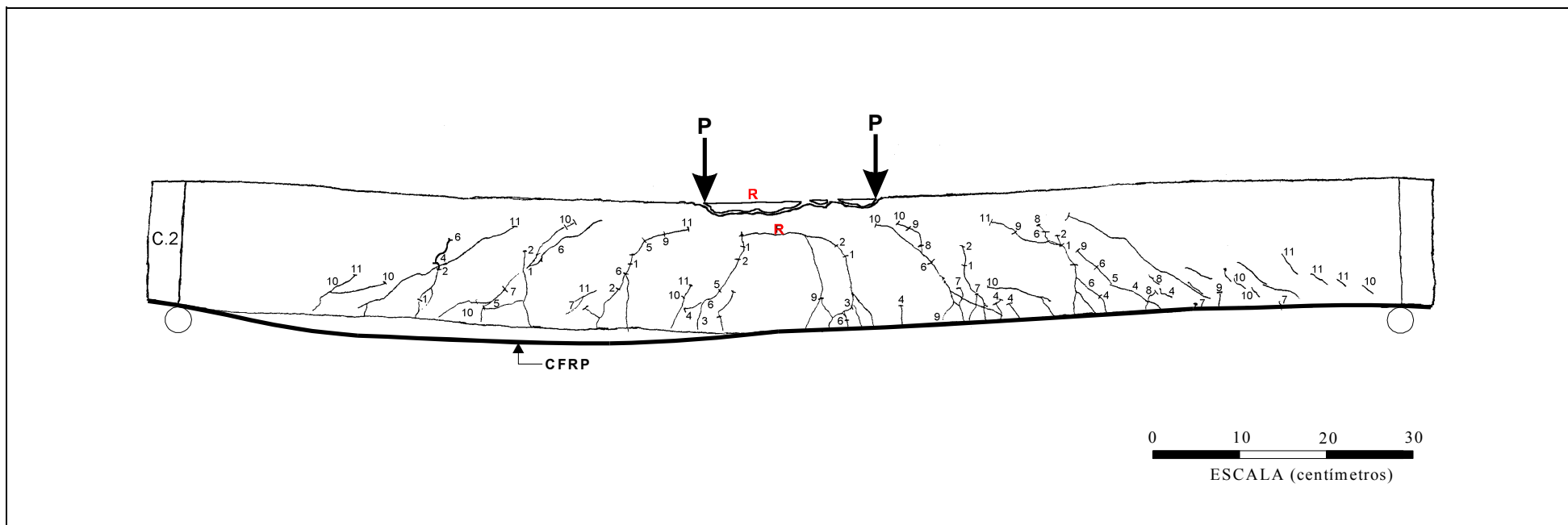
Tabela C.16 – Resultados da viga C.1.



Viga	Com Reforço				Ruína			
	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu$ m/m)	Betão/adeseivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu$ m/m)	Betão/adeseivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)
C.1	62.36	9.43	sem extensómetros		52.0	22.0	sem extensómetros	
Observações	O estado de fendilhação, próximo da ruína, apresentou fendas de corte bem vinculadas em relação às fendas surgidas por flexão. Comportamento regular até à força máxima iniciando-se, em seguida, o destacamento do laminado por corte longitudinal no betão ( $\overline{AB} = 59$ cm). A ruína surge depois com o escorregamento por corte de uma secção já fendilhada.							



Tabela C.17 – Resultados da viga C.2.



Viga	Com Reforço				Ruína			
	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu\text{ m/m}$ )	Betão/adesivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu\text{ m/m}$ )	Betão/adesivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)
C.2	42.0 (1ª Fase) 70.8 (3ª Fase)	6.97 10.80	sem extensómetros		não 50.0	- 26.0	sem extensómetros	
Observações	<p>1ª Fase: Proporcionou-se um estado de fendilhação acentuado para o nível de cargas a que se submeteu a viga.</p> <p>3ª Fase: O reforço com o CFRP reduziu a sua acção antecipadamente ao previsto, devido ao início do destacamento longitudinal do laminado por corte na interface adesivo/betão (<math>\overline{BC} = 7\text{ cm}</math>) e alguma ruína na interface adesivo/laminado sobre o apoio (<math>\overline{AB} = 7\text{ cm}</math>).</p> <p>A ruína ocorreu, depois, por esmagamento da secção do betão a meio vão.</p>							

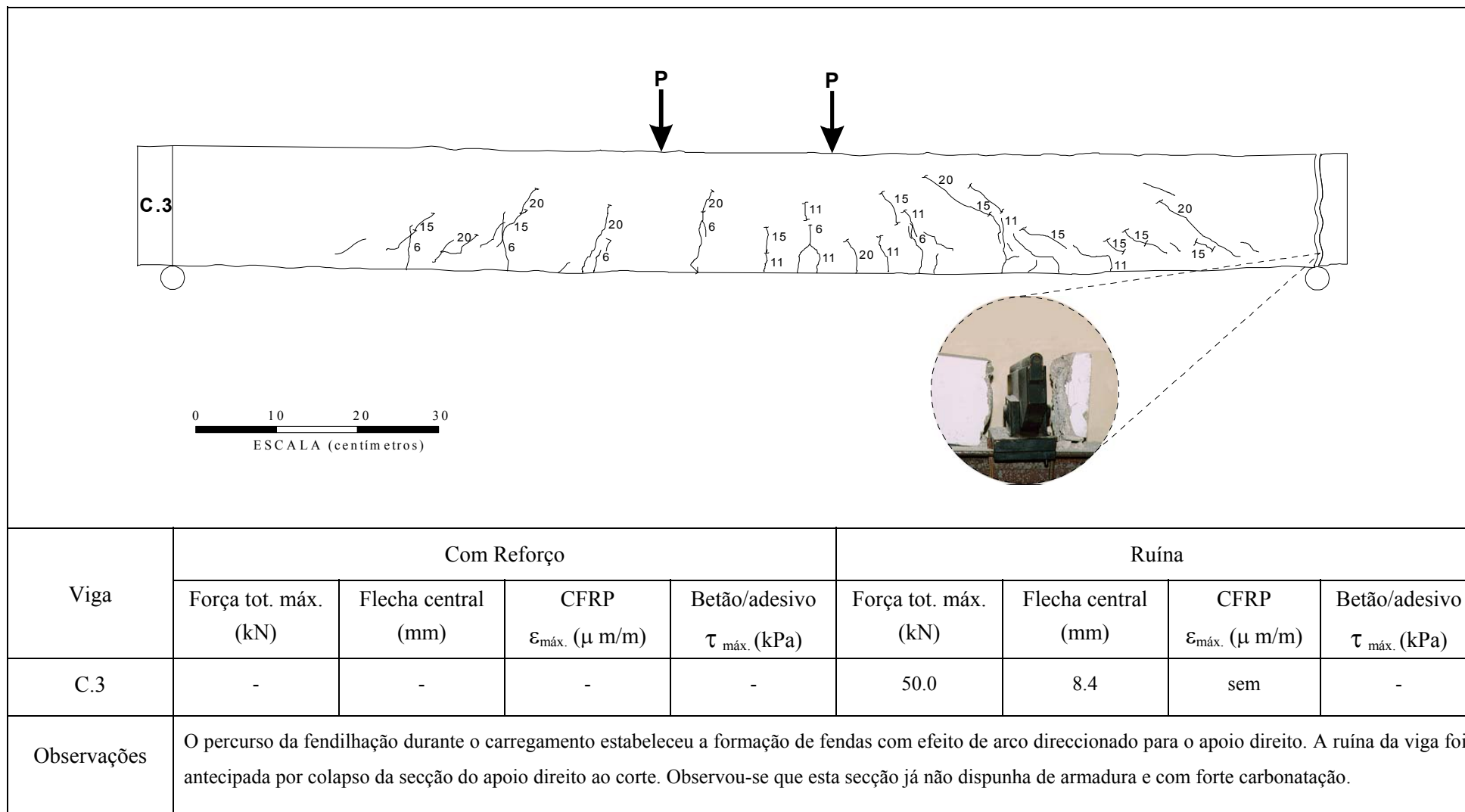
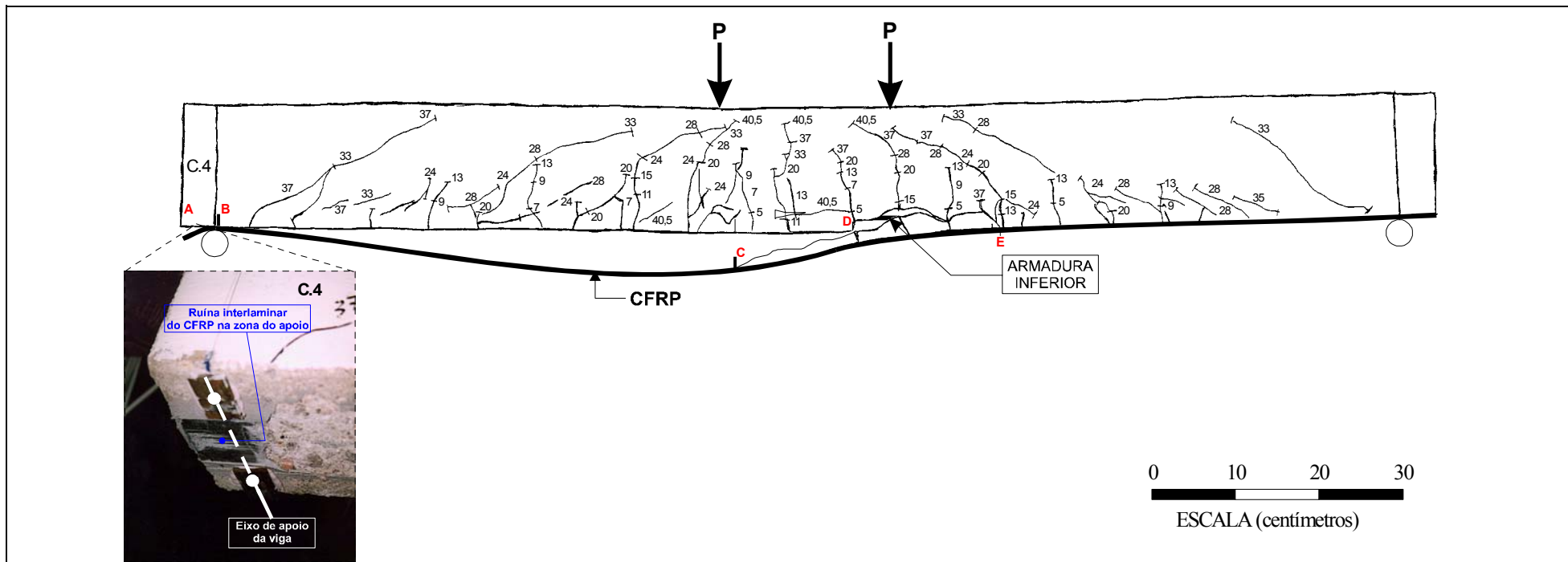
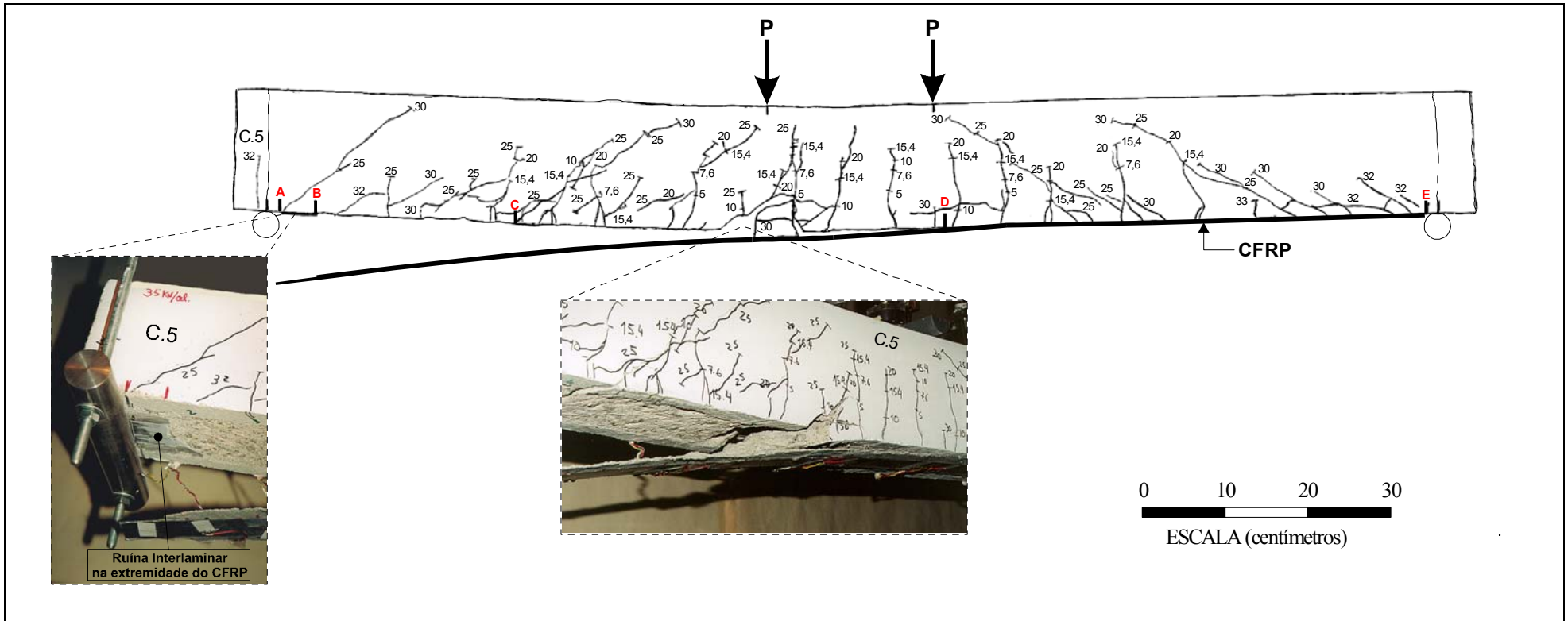
Tabela C.18 – Resultados da *viga C.3*.

Tabela C.19 – Resultados da viga C.4.



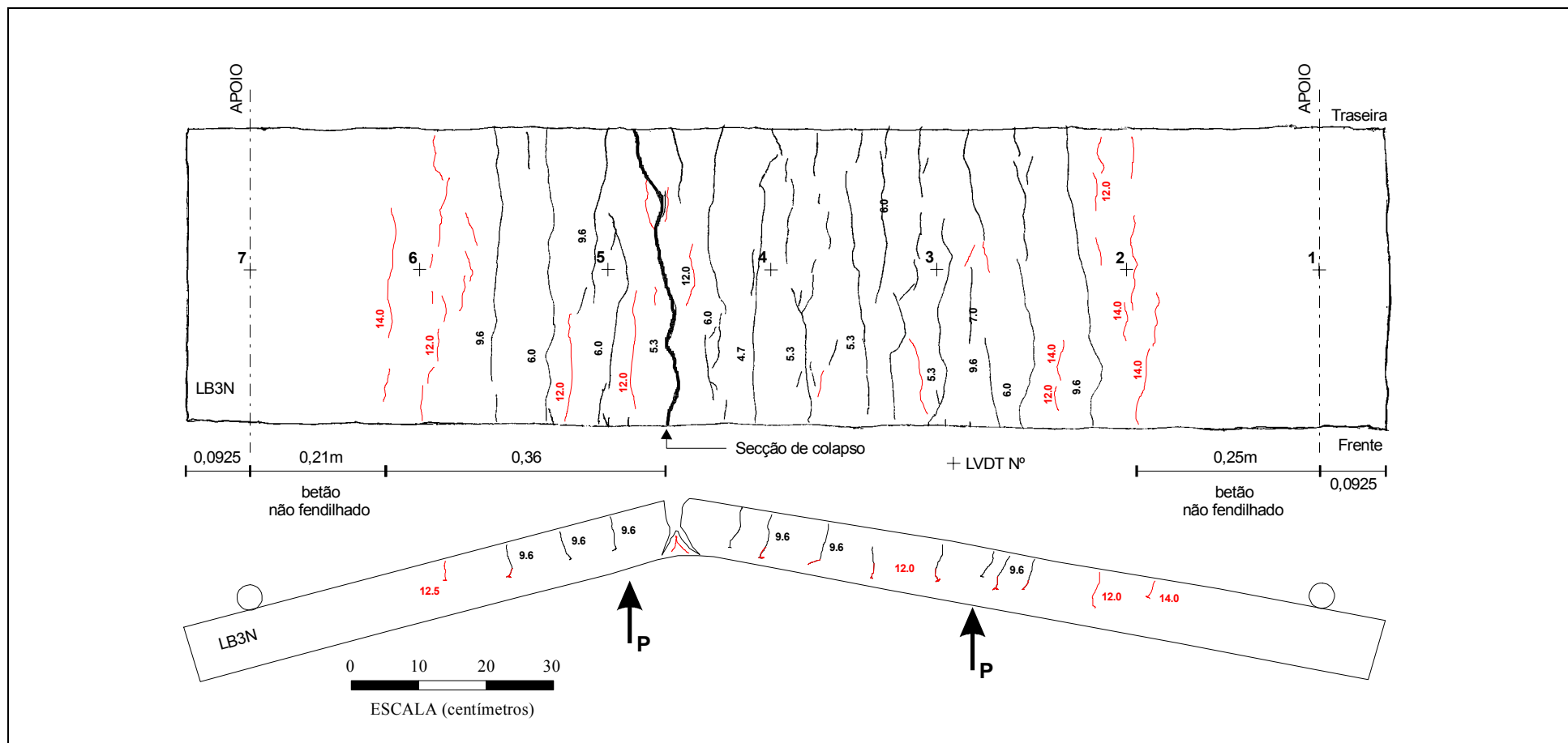
Viga	Com reforço				Ruína			
	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu\text{ m/m}$ )	Betão/adesivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx.}}$ ( $\mu\text{ m/m}$ )	Betão/adesivo $\tau_{\text{máx.}}$ (kPa)
C.4	81.6	16.9	Problemas com o sistema de aquisição		42.16	-	Problemas com o sistema de aquisição	
Observações	A viga apresentou um estado de fendilhação acentuado, agravando-se com a ocorrência do arrancamento do betão ao nível da armadura inferior, no troço central $\overline{DE} = 20\text{ cm}$ (início de cedência). A ruína da viga foi, imediatamente, acompanhada do destacamento da parte esquerda do laminado, na continuação da superfície de betão arrancada à viga. Da observação de toda a superfície de ruína detectam-se as zonas seguintes: $\overline{AB}$ (5 cm) com escorregamento no apoio por ruína interlaminar; $\overline{BC}$ (64.5 cm) com corte superficial no betão; $\overline{CD} + \overline{DE}$ (20 cm) de arrancamento do betão até ao nível das armaduras principais.							

Tabela C.20 – Resultados da viga C.5.



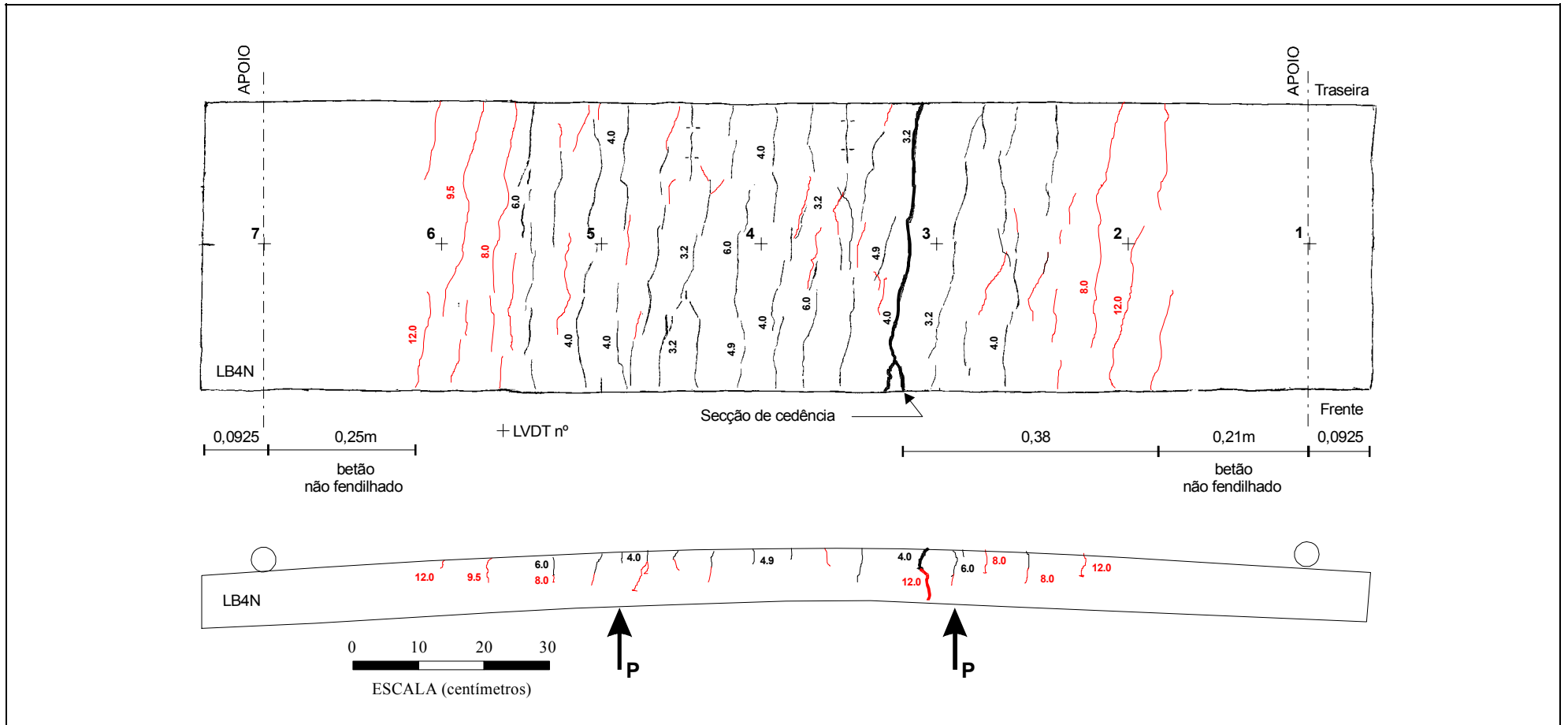
Viga	Com reforço				Ruína			
	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP $\epsilon_{\text{máx}}$ ( $\mu$ m/m)	Betão/adesivo $\tau_{\text{máx}}$ (kPa)	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	CFRP (aderente) $\epsilon_{\text{máx}}$ ( $\mu$ m/m)	Betão/adesivo $\tau_{\text{med}}$ (kPa)
C.5	68.0	10.74	5062.9	4340.1	45.4	23.0	18749.0	363.5
Observações	<p>As primeiras fendas visíveis manifestaram-se quando se registava, aproximadamente, 10 kN de força total aplicada na viga. A primeira fenda visível no adesivo, que resultou do desenvolvimento da fenda de corte no betão (posição “C”), surgiu para a força de 50 kN. A ruína do reforço veio a ocorrer, mais tarde, para um estado de fendilhação bastante acentuado e por destacamento brusco do laminado, da extremidade “A” até “D” (<math>\overline{AD} \cong 85</math> cm). Na zona destacada do CFRP observou-se um sector de ruína interlaminar na sua extremidade (<math>\overline{AB} \cong 4.5</math> cm) e outro de arrancamento do betão (<math>\overline{BD} \cong 76</math> cm). Na zona central da viga, o betão foi destacado até à zona da armadura.</p>							

Tabela C.21 – Resultados da laje LB3N.



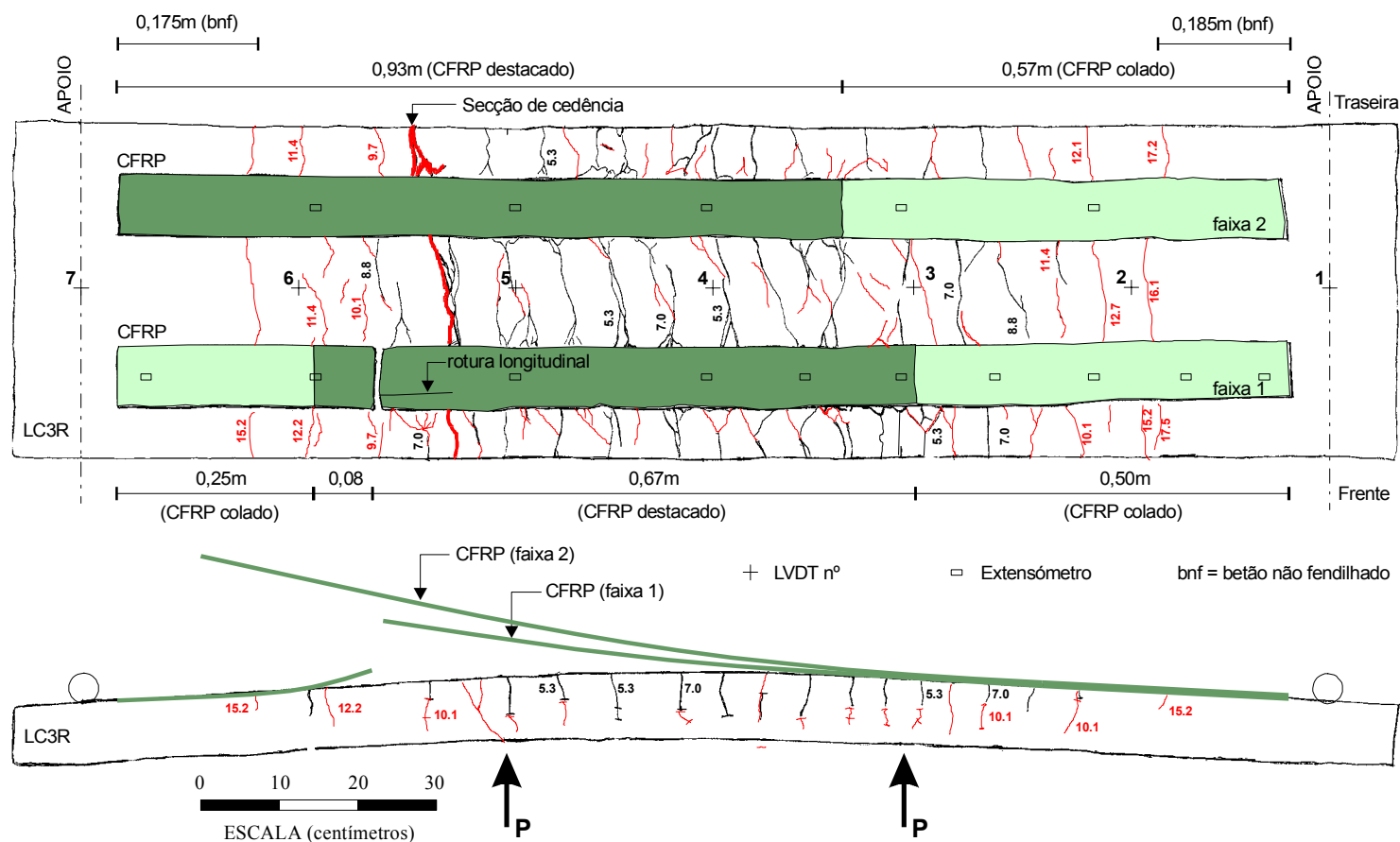
Laje	Betão Armado				Ruína			
	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	Betão $\epsilon_{cm}^{max}$ (‰)	Aço $\epsilon_{sm}$ (‰)	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	Betão $\epsilon_{cm}$ (‰)	Aço $\epsilon_{sm}$ (‰)
LB3N	29.2	22.7	0.9	-	21.5	33.0	0.7	-
Observações	A fendilhação iniciou-se com a carga total média de 7.3 kN. Depois, o modelo desenvolveu um padrão de fendilhação regular com o afastamento médio entre fendas de $s_{fm} \cong 6.8$ cm. A ruína ocorreu, mais tarde, por rotura da armadura de tracção e quando se registava a carga total de 21.5 kN.							

Tabela C.22 – Resultados da laje LB4N.



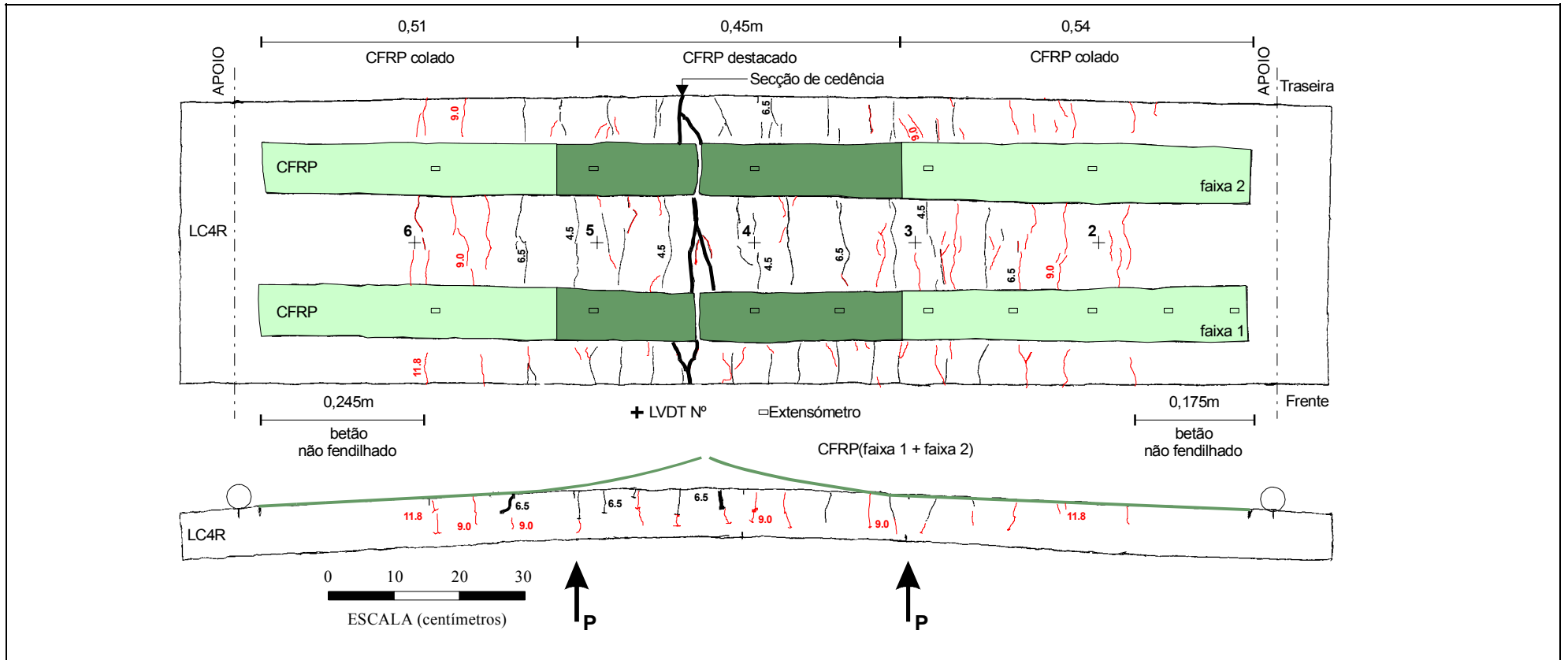
Laje	Betão Armado				Ruína			
	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	Betão $\epsilon_{cm}^{max}$ (‰)	Aço $\epsilon_{sm}$ (‰)	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	Betão $\epsilon_{cm}^{max}$ (‰)	Aço $\epsilon_{sm}$ (‰)
LB4N	28.6	22.6	-	-	23.8	29.7	-	-
Observações	A carga total média de 7.6 kN iniciou a fendilhação no modelo, vindo mais tarde a estabelecer-se um afastamento médio entre fendas de $s_{rm} \cong 6.2$ cm. O ensaio foi interrompido logo que se estabeleceu a secção de cedência da laje, próximo da força total de 23.8 kN.							

Tabela C.23 – Resultados da faixa de laje LC3R.



Laje	Com Reforço					Ruína do Reforço				
	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	Betão $\epsilon_{cm}^{máx.}$ (‰)	CFRP $\epsilon_{máx.}$ (μ m/m)	Betão/adeseivo $\tau_{máx.}$ (KPa)	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	Betão $\epsilon_{cm}^{máx.}$ (‰)	CFRP $\epsilon_{máx.}$ (μ m/m)	Betão/adeseivo $\tau_{máx.}$ (kPa)
LC3R	39.1	39.3	0.57	10883 (1) 10922 (2)	1796 (1) 1218 (2)	38.9	39.3	0.57	10839 (1) 10916 (2)	1803 (1) 1031 (2)
Observações	Apresenta um padrão de fendilhação bastante repartido, com afastamento médio entre fendas $s_m \cong 6.3$ cm. A ruína surgiu, primeiro, por rotura da faixa 1 e, depois, por destacamento da faixa 2 e por formação de uma secção de cedência. (1) – faixa 1; (2) – faixa 2.									

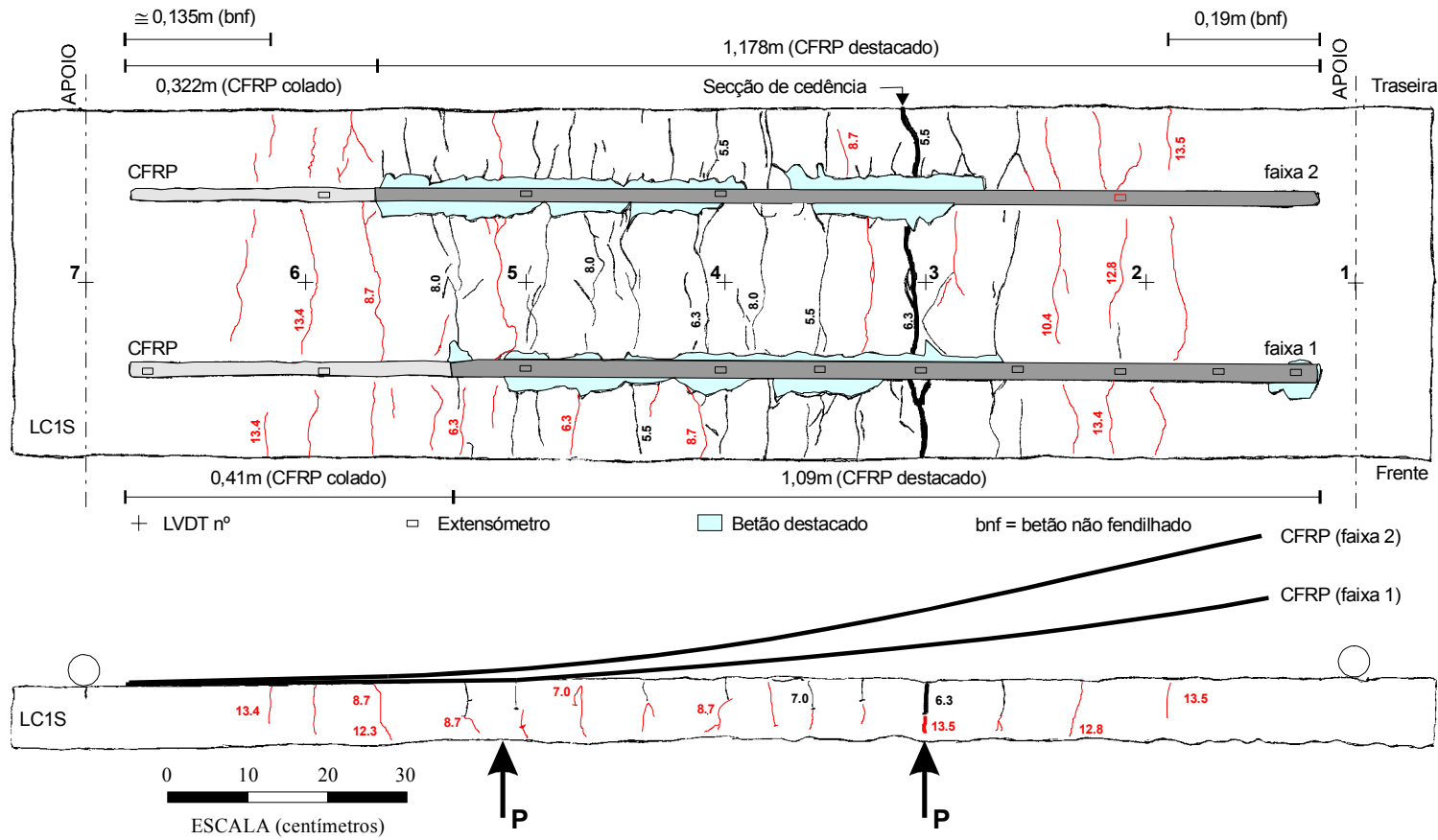
Tabela C.24 – Resultados da faixa de laje LC4R.



Laje	Com Reforço					Ruína do Reforço				
	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	Betão $\epsilon_{cm}^{máx.}$ (‰)	CFRP $\epsilon_{máx.}$ ( $\mu$ m/m)	Betão/adesivo $\tau_{máx.}$ (kPa)	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	Betão $\epsilon_{cm}^{máx.}$ (‰)	CFRP $\epsilon_{máx.}$ ( $\mu$ m/m)	Betão/adesivo $\tau_{máx.}$ (kPa)
LC4R	31.3	32.3	0.63	10300 (1) 8800 (2)	1819 (1) 834 (2)	31.3	32.3	0.63	10300 (1) 8800 (2)	1819 (1) 834 (2)
Observações	Apresenta um padrão de fendilhação regular, com afastamento entre fendas $s_{fm} \cong 6.4$ cm. A ruína ocorreu por colapso simultâneo das faixas 1 e 2 e por formação de uma fenda acentuada no betão. (1) – faixa 1; (2) faixa 2.									

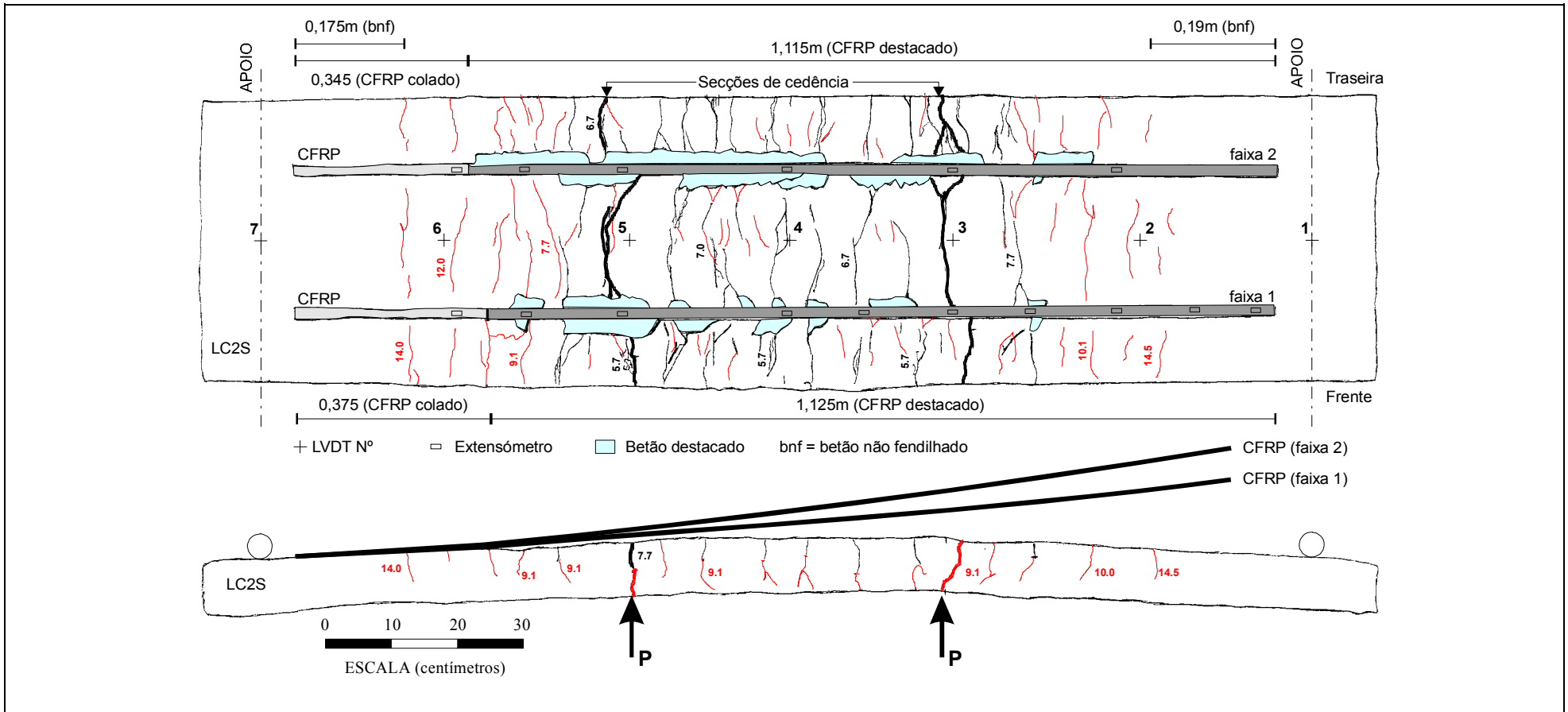


Tabela C.25 – Resultados da laje LC1S.



Laje	Com Reforço					Ruína do Reforço				
	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	Betão $\epsilon_{cm}^{máx.}$ (‰)	CFRP $\epsilon_{máx.}$ ( $\mu$ m/m)	Betão/adeseivo $\tau_{máx.}$ (kPa)	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	Betão $\epsilon_{cm}^{máx.}$ (‰)	CFRP $\epsilon_{máx.}$ ( $\mu$ m/m)	Betão/adeseivo $\tau_{máx.}$ (kPa)
LC1S	34.1	31.9	1.12	9890 (1) 10319 (2)	2704 (1) 2500 (2)	32.8	33.2	1.10	9595 (1) 10248 (2)	3460 (1) 2300 (2)
Observações	A fendilhação iniciou-se com a carga total média de 11 kN, vindo a progredir para uma distribuição de fendas regulares com afastamento médio de $s_m \approx 6.4$ cm. A ruína ocorreu mais tarde para a força total de 33.2 kN, por destacamento prematuro e simultâneo das duas faixas de laminado. (1) – faixa 1; (2) – faixa 2.									

Tabela C.26 – Resultados da laje LC2S.



Laje	Com Reforço					Ruína do Reforço				
	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	Betão $\epsilon_{cm}^{máx.}$ (‰)	CFRP $\epsilon_{máx.}$ ( $\mu$ m/m)	Betão/adesivo $\tau_{máx.}$ (kPa)	Força tot. máx. (kN)	Flecha central (mm)	Betão $\epsilon_{cm}^{máx.}$ (‰)	CFRP $\epsilon_{máx.}$ ( $\mu$ m/m)	Betão/adesivo $\tau_{máx.}$ (kPa)
LC2S	37.7	30.6	0.9	11242 (1) 11825 (2)	4471 (1) 2773 (2)	37.7	30.6	0.9	11242 (1) 11825 (2)	4971 (1) 2773 (2)
Observações	A fendilhação iniciou-se com a carga total de 11.4 kN e progrediu para um padrão de fendas bastante repartido. O afastamento médio entre as fendas principais é de $s_{fm} \cong 6.3$ cm. Próximo da força total de 37.7 kN ocorreu um descolamento prematuro, primeiro da faixa (1) e meio minuto depois da faixa (2), das tiras de CFRP.									



# Glossário

---

## Definição de Termos

Nesta secção, expõe-se uma lista dos termos mais comuns e seus significados, associados à área dos compósitos reforçados com fibras (FRP) e que são referidos ao longo deste trabalho de investigação. A presença desta lista, após os anexos, tem, sobretudo, dois objectivos. Primeiro, definir com clareza o significado dos novos vocábulos usados nos vários capítulos. Segundo, permitir alguma familiaridade nacional com a área dos novos materiais compósitos aplicáveis à engenharia civil e, em simultâneo, instituir alguns hábitos de normalização terminológica em consonância com o vocabulário internacional. Encontram-se listas mais detalhadas destes termos e suas definições, em várias publicações, como as do "American Concrete Institute" (ACI Committee 116, ACI 440R-96 e ACI-440F), do "American Society of Civil Engineers" (SPRC 1984) e do EUROCOMP (1996).

*Aderência* - envolve os conceitos de adesão e de coesão dos sistemas com ligações coladas. Traduz-se pela tensão máxima necessária para separar dois materiais colados, segundo uma junta. Como sinónimos apresentam-se os termos resistência de aderência e capacidade de aderência.

*Adesão* - representa a resistência, ao nível da superfície de contacto, dum ligação colada entre dois materiais diferentes com base num adesivo.

*Adesivo* - ou cola é a substância responsável pela colagem de dois materiais ao longo da superfície de ligação e pode apresentar-se sob a forma dum líquido, dum filme ou dum pasta. Os adesivos usados neste trabalho têm propriedades tixotrópica.

*AFRP* - sigla da família dos polímeros (ou compósitos) reforçados com fibras de aramida.

*Aramida* - fibras orgânicas bem direccionadas derivadas da poliamida aromática e de sigla (A).

*Armaduras não metálicas* - representam os sistemas constituídos por novos materiais compósitos, empregues no reforço de estruturas existentes na construção civil, com base na técnica de colagem através dum adesivo de epóxido.

*Camada* - lâmina individualizada (mantas, tecidos ou outros sistemas) de material impregnado com resina de saturação.

*Carbono* - fibra produzida por tratamento térmico das fibras de precursor orgânico, como as "PAN" (poliacrilonitrilo) e as "pitch" (derivado do petróleo destilado), numa atmosfera inerte. Em geral é representado pela sigla (C).

*Catalizador* - agente orgânico usado para activar a polimerização ou a cura dum sistema de resina.

*CFRP* - sigla da família dos polímeros (ou compósitos) reforçados com fibras de carbono.

“*Cloth*” - termo internacional para representar o sistema de fios contínuos tecidos por um processo têxtil convencional (uni, bi ou multidireccional) e cujo estado final pode apresentar-se seco ou pré-impregnado. Constitui um tipo de tecido.

*Coesão* - tendência de um material de ligar-se a si próprio, isto é, representa a força interna de atracção entre moléculas na ligação estrutural do material.

*Compósito* ou *material compósito* - combinação de dois ou mais materiais, diferentes na forma ou na composição a nível macroscópico. Os constituintes mantêm as suas identidades, isto é, não se dissolvem nem se transformam completamente noutros, apesar de actuarem em conjunto. Normalmente, os componentes têm identidade física e apresentam interfaces entre eles, como por exemplo os compósitos de FRP.

*Compósitos de FRP* - resultam, sobretudo, da conjugação de uma matriz polimérica, termoendurecível ou termoplástica, com uma elevada percentagem de fibras, contínuas ou não, de reforço, orgânicas ou inorgânicas, de modo a incrementarem resistência ou rigidez numa ou mais direcções (uni, bi e multidireccional).

*Comprimento de ancoragem* - ou de amarração, representa o comprimento efectivo de colagem da interface betão-compósito, necessário para a transferência de um dado esforço entre os dois materiais.

*Corte interlaminar* - mesmo significado que ruína interlaminar.

*Cura* - ou polimerização é o processo químico de alteração irreversível das propriedades de uma resina termoendurecível. Geralmente, a cura é proporcionada por adição de um agente de cura ou catalizador (endurecedor), com ou sem aquecimento (ou pressão).

*Delaminação* - separação segundo um plano paralelo à superfície, como o do corte interlaminar na espessura do sistema laminado pré-fabricado (pultrusão) ou o da ruína entre camadas sobrepostas de mantas (ou tecidos) curados "in situ".

*Descolar* - separação entre substratos ao longo da interface colada.

*Destacamento* - separação de um material pela interface de ligação ou por corte do outro material adjacente à junta de ligação. Consultar o termo "peeling".

*Endurecedor* - agente que proporciona a polimerização (ou cura) quando adicionado a uma resina termoendurecível (ou adesivo). É comum aplicar-se às resinas de epóxido.

*Ensaio de "pull-off"* - designação internacional para o ensaio de arrancamento por tracção, especificado na pré-norma prEN 1542 (1998).

*Fibra* - termo geral para designar os materiais filamentosos que representam a componente de resistência e de rigidez num compósito de FRP. A outra componente é a matriz.

*Fios* - representam sistema simples de feixe de fibras, dispostas paralelamente (unidireccional).

*Força de ancoragem* - força máxima de tracção no compósito, que conduz ao esgotamento de um dado comprimento de ancoragem.

*FRP* - sigla da família geral dos polímeros (ou compósitos) reforçados com fibras.

*GFRP* - sigla da família dos polímeros (ou compósitos) reforçados com fibras de vidro

*Impregnação* - processo de saturação dos interstícios dum sistema de reforço com fibras (laminados, mantas, tecidos) por uma resina.

*Interface* - define a fronteira, a junta ou a superfície entre dois materiais diferentes. Existem, como exemplo, os casos das juntas betão-adesivo, adesivo-compósito ou betão-adesivo-compósito.

*Kevlar*<sup>®</sup> - marca registada de uma fibra tipo de aramida e cuja sigla é (KFRP).

*Laminado pré-fabricado* - resulta da impregnação de um conjunto de feixes ou camadas contínuas de fibras (sistema unidireccional) por uma resina termoendurecível, consolidados por um processo de pultrusão, com controlo de forma (espessura e largura) do compósito.

*Ligação colada* - ou junta colada, traduz a aderência de uma superfície a outra por meio duma estrutura adesiva ou duma matriz polimérica (por exemplo uma resina de saturação).

*Manta flexível e pré-impregnada* - sistema de agrupamento de fibras num reforço, através da disposição de faixas contínuas e paralelas (unidireccionais) sobre uma rede simples de protecção e/ou com espalhamento de uma resina de pré-impregnação.

*"Mat"* - termo internacional para representar o tipo de tecido que resulta do espalhamento aleatório das fibras num tapete rolante e, posteriormente, da pulverização com resina para adquirir consistência. O seu estado final é do tipo pré-impregnado.

*Matriz* - representa a outra componente do compósito de FRP e é constituída à base de uma resina homogénea ou um material polimérico, de natureza dúctil, que envolve completamente as fibras de reforço.

*Pré-impregnado* - quando um sistema de fibras (fios, mantas ou tecidos) é semi-curado, em consequência do resultado da impregnação de uma resina, em pequena percentagem, para garantir a consistência mínima do produto até à sua aplicação "in situ".

*"Peeling"* - designação da literatura internacional, para o efeito conjunto da acção das tensões normais de tracção e das tensões de corte na interface betão-adesivo-FRP e que provocam as ruínas prematuras por destacamento, delaminação ou arrancamento nesta zona.

*Polimerização* - pode ser interpretado o mesmo que cura.

*Polímero* - define um material orgânico composto por moléculas caracterizadas pela repetição de um ou mais tipos de monómeros, de forma regular. Nesta fase, este sistema não integra fibras de reforço.

*Pós-cura* - elevação adicional da temperatura de cura de um sistema de FRP, para aumentar as ligações de polimerização.

*Primário* - apesar de não ser uma formulação do tipo adesivo, este produto destina-se a completar e melhorar o desempenho daquele. O *primário* aplica-se após a limpeza mecânica da superfície e apresenta a característica de penetrar no betão por capilaridade, de modo a melhorar a propriedade adesiva da superfície, para a recepção da resina de saturação ou do adesivo. Este produto é indispensável, principalmente, para as aplicações de sistemas de FRP curados "in situ" (fios, mantas e tecidos)

*Pultrusão* - processo contínuo que combina as acções de tração e extrusão para a produção de um compósito, com secção final constante. Os fios contínuos embebidos em resina são esticados e passados por uma fieira aquecida, para processar a cura e a forma do FRP. Apresenta-se como o processo mais utilizado na execução dos sistemas de FRP pré-fabricados.

*"Putty"* - ou produto de regularização duma superfície, cujo objectivo é a eliminação de pequenas irregularidades na superfície do betão, com vista a evitar a formação de bolhas de ar e a garantir uma superfície lisa para a colagem do FRP.

*Reforço* - termo utilizado nos compósitos, para se referir à componente (as fibras) a adicionar à matriz, de modo a transmitir as características desejadas de resistência e rigidez.

*Resina* - componente de um sistema polimérico, que requer a adição de um catalizador ou um endurecedor, para se iniciar o processo de polimerização (ou cura) num compósito. Pode ser referida, também, como a matriz dum FRP.

*Resina de epóxido* - resina formada por reacções químicas de grupos epóxidos com aminas, álcool, fenol e outros. É a matriz mais usada nos compósito de FRP e o tipo de adesivo empregue nas colagens a elementos da construção civil.

*Ruína interlaminar* - rotura por corte na espessura dum FRP, devido ao esgotamento da coesão entre camadas de fibras, proporcionando o escorregamento entre lâminas.

*Sistema de FRP curado "in situ"* - é um sistema constituído por fibras contínuas, com a forma de fios, mantas ou tecidos em estado seco ou pré-impregnado. Transforma-se num compósito de FRP, só após a execução do reforço no local, isto é, polimerizado ou endurecido "in situ" com a adição duma resina de saturação das fibras e, simultaneamente, é o agente adesivo de ligação ao material a reforçar.

*Sistema de FRP pré-fabricado* - é um produto finalizado de FRP (já curado), com características mecânicas e físicas garantidas pelos seus produtores e com a forma corrente de perfis ou laminados, entre outros casos.

*Tecidos* - representa a forma geral dos sistema de agrupamento de fibras num reforço, através da disposição em forma de "cloth" (uni, bi ou multidireccional), de "woven roving" (bidireccional) ou de "mat" (multidireccional). O estado final do sistema pode apresentar-se seco ou pré-impregnado.

*Temperatura crítica (T<sub>c</sub>)* - temperatura limite superior para a amplitude térmica esperada numa aplicação normal da construção civil, a partir da qual se inicia a redução acentuada das principais propriedades mecânicas dum polímero, como a resistência e a rigidez. O código de projecto EUROCOMP (1996) recomenda que esta temperatura seja inferior à temperatura de transição vítrea (T<sub>g</sub>) de 10 °C a 20 °C.

*Temperatura de transição vítrea (T<sub>g</sub>)* - temperatura limite nos polímeros (adesivos e resinas), acima da qual se proporciona a passagem dum estado vítreo frágil para um sólido elástico e dúctil. A aproximação da temperatura para este nível do valor, torna a componente polimérica muito macia e as principais propriedades mecânicas, como a resistência e a rigidez, diminuem acentuadamente. Pode ser determinada recorrendo a ensaios de DSC ou de DMTA.

*Tempo de contacto ("open time")* - é o intervalo de tempo que decorre entre o momento em que a mistura de resina é aplicada na superfície a colar e o instante em que esta principia a endurecer e deixa de ser possível efectuar a colagem.

*Tempo de cura* - tempo necessário para polimerizar um sistema termoendurecível ou pré-impregnado a uma dada temperatura.

*Tempo de utilização ("pot life")* - intervalo de tempo, após a mistura da resina base e restantes componentes, durante o qual o material líquido é utilizável sem dificuldade. Esgotado o tempo de utilização, qualquer mistura de resina perde drasticamente as suas características de aderência, pelo que não deve ser usada.

*Termoendurecível* - tipo de matriz do polímero que não pode ser fundida nem dissolvida, depois de curada, como por exemplo o poliéster insaturado, o epóxido, o vinilester e outras.

*Vidro-E* (ou "calcium aluminoborosilicate") - designação do tipo de fibras de vidro mais empregue no reforço de compósitos de GFRP. Em geral é representado pela sigla (G).

*Zona de ancoragem* - representa a região próxima da interrupção (extremidades) da interface betão-compósito.

*"Woven roving"* - termo internacional para representar o tipo de tecido que resulta do entrelaçamento direccionado (bidireccionais: 0/90° ou 0/±45°) de dois fios ou faixa de fibras e cujo estado final do sistema pode apresentar-se seco ou pré-impregnado.