



FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Reforço e reabilitação de vigas de madeira por pré-esforço com laminados FRP

Ana Maria Resende Balseiro

Licenciada em Engenharia Civil pela Universidade de Aveiro

Dissertação submetida para satisfação parcial dos
requisitos do grau de mestre em
Reabilitação do Património Edificado

Dissertação realizada sob a orientação do
Professor Doutor João Henrique Negrão,
do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e
Tecnologia
da Universidade de Coimbra
e co-orientação de Professor Doutor José Amorim Faria,
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Porto, Novembro de 2007

“Unicamente pode fazer justiça a uma obra do passado aquele para quem esta é presente vivo, que aprendeu a entender a sua linguagem e responde com o seu próprio trabalho. Para ele, um momento é um lugar no qual se instalou o espírito para ficar, para que se considere a sua mensagem e se a conteste”

Rudolf Schwarz.

Die Baukunst Der Gegenwart.

Immatrikulationsrede Düsseldorf, 1959.

RESUMO

O reforço ou reabilitação de vigas de madeira, mediante colagem simples de laminados de fibras de carbono, constitui uma não-solução, dado o baixo potencial de reforço que apresenta e os problemas que suscita. Destes, merece especial atenção o risco de delaminação no interface de colagem ou na sua vizinhança, por constituir o modo predominante de rotura de elementos reforçados desta forma. A incapacidade de explorar mais do que 15 a 20% da elevada resistência à tracção do laminado constitui outra desvantagem, sobretudo tendo em conta o seu elevado preço. Finalmente, o aumento de capacidade resistente conseguido situa-se, tipicamente, na casa dos 20% o que, não sendo despreciando, é modesto em face dos custos envolvidos.

A colagem em tensão dos laminados origina um estado de pré-esforço que pode mitigar parcialmente estes problemas, além de produzir uma contraflecha que reduza deformação em serviço, a qual é, com frequência, condicionante no dimensionamento de estruturas de madeira.

Esta comunicação descreve o estudo teórico e experimental de uma das técnicas de pré-esforço possíveis, consistindo na colagem do laminado contra a face inferior da viga, temporariamente sujeita, mediante a introdução de uma contraflecha, a um estado de coacção oposto ao de serviço.

O programa experimental foi dividido em duas fases. A primeira incidiu sobre o estudo da aderência entre a madeira e o laminado, tendo sido ensaiadas várias séries de provetes pequenos, produzidos sob distintas condições termo-higrométricas ou com diferentes agentes de ligação. A segunda fase investigou o comportamento de elementos de dimensão estrutural, previamente reforçados segundo a técnica mencionada ou, alternativamente, simplesmente reabilitados como laminado após a rotura das vigas simples.

O estudo permitiu concluir que a utilização de pré-esforço aumenta a eficiência do sistema de reforço, embora o problema da delaminação continue a constituir o seu ponto fraco, requerendo investigação adicional.

ABSTRACT

The reinforcement of timber beams with glued carbon fibre laminates is a non-solution, given the low strengthening potential and the inherent problems of such system. Among these, one must mention the delamination risk, either in the bond line or in the adjacent area, as this is the most common failure mode of elements reinforced with this technique. The impossibility of achieving more than 15% to 20% of the total tension strength of the laminate is another disadvantage, given the high cost of these materials. Finally, the strength increase achieved for the solution is usually around 20%, which is a modest yet not neglectable value.

Prestressing the laminates prior to gluing them to the timber might partially minimize these inconvenients, besides of originating an opposite deflection which could reduce the service deformation that is often conditioning in timber structures design.

This work describes the research and experimental study of one of the possible prestressing techniques, consisting of gluing a laminate to the bottom tensile face of a beam temporarily cambered upwards, and then released after the adhesive cure, resulting in a residual bending stress distribution opposite to that of the service condition.

The experimental program was split in two branches. In the first part, the bond between the wood and the laminate was studied, by testing several series of small-size specimens, produced under different hygro-thermal environmental conditions or with different adhesives. The second part focused on the behaviour of structural sized elements, either reinforced with the mentioned technique or, alternatively, rehabilitated by simply gluing the laminate after the structural collapse of the single beams.

With this experimental work, it is possible to conclude that the use of prestress increases the reinforcement effectiveness, although the delamination problem remains. This problem keeps on being the weak point of this solution, thus requiring further investigation.

AGRADECIMENTOS

A todos os que contribuíram para a concretização desta dissertação.

Em especial:

Aos meus orientadores o meu muito obrigado pelo tempo incansável de apoio, incentivo, motivação, e acompanhamento no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Doutor João Henrique Negrão do DEC – UC, orientador desta dissertação, por ter sido responsável pelo estabelecimento deste protocolo, por me disponibilizar todos os meios ao seu alcance para que o meu trabalho se desenvolvesse da melhor forma possível, pelos valiosos conceitos transmitidos e pela sua permanente preocupação e ajuda na resolução das diversas dificuldades com que me deparei.

Ao Professor Doutor José Amorim Faria, co-orientador desta dissertação, por me oferecer a oportunidade de trabalhar num tema pelo qual sempre tive um gosto particular, a madeira, e pela paciência tida ao longo do trabalho, com a minha sempre ausência.

A todas as pessoas com quem contactei e colaborei no DEC, as quais, pela sua proximidade e simplicidade, contribuíram para que a minha estadia em Coimbra se revelasse uma experiência extremamente rica. Entre muitos outros, uma palavra especial de gratidão aos senhores Olegário João, Miguel Clara, Luís Gaspar e David Rodrigues, técnicos do laboratório, pela preciosa ajuda prestada na realização do trabalho experimental, e ao Adérito, à Sandra e à Lurdes pela amizade e acolhimento.

À FCT (Fundação para a Ciência e Tecnologia), pelo apoio prestado na forma de equipamento e da Bolsa de Investigação atribuídos no âmbito do Projecto POCI/ECM/60089/2004, co-financiado pela FCT e pelo Programa Operacional Ciência e Inovação (POCI 2010), participado pelo fundo comunitário europeu FEDER.

A todas as empresas que disponibilizaram materiais e/ou meios necessários ao trabalho experimental, nomeadamente à SIKA, à STAP, à Flexilam, embora já não exista, e à Metalúrgica Ideal Mondego.

À minha família e amigos mais próximos, de quem frequentemente privei a minha companhia e dedicação para a realização deste trabalho, e que, apesar de tudo, sempre me apoiaram nos momentos mais delicados.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 – Introdução	1
1.1 Objecto, âmbito e justificação	1
1.2 Objectivos da Dissertação	6
1.3 Bases do trabalho desenvolvido	7
1.4 Organização da Dissertação	7
CAPÍTULO 2 – Estado de arte	9
2.1 Materiais	9
2.1.1 Madeira estrutural	9
2.1.1.1 Comportamento de um material natural	11
2.1.1.2 Derivados da madeira	13
2.1.1.3 Madeira lamelada colada	15
2.1.2 FRP: Polímeros Reforçados com Fibras	17
2.1.2.1 Introdução	17
2.1.2.2 Fibras de vidro, de carbono e de aramida	18
2.1.3 Ligação colada CFRP – Madeira	20
2.1.3.1 Aderência à madeira	20
2.1.3.2 Propriedades da superfície da madeira	21
2.1.3.3 Propriedades físicas da madeira	22
2.1.3.4 Colas	25
2.2 Madeira e Madeira Lamelada Colada Reforçada com FRP.	28
2.2.1 Introdução	28
2.2.2 Reforço passivo com laminados FRP	29
2.2.2.1 Reforço à flexão	30
2.2.2.2 Reforço ao corte	33
2.2.2.3 Reforço à flexão e ao corte	33
2.2.2.4 Síntese	34
2.2.3 Pré-esforço com laminados FRP	34
2.2.3.1 Reforço à flexão	35
2.2.3.2 Ancoragem dos laminados FRP e o problema da delaminação	39
2.2.3.3 Deformação e Ductilidade	40
2.2.3.4 Exemplos de aplicação – Casos de estudo	41

2.2.4 Conclusão – Notas finais	42
CAPÍTULO 3 – Ensaio de provetes pequenos	43
3.1 Introdução	43
3.2 Materiais	44
3.3 Configuração dos provetes	46
3.4 Preparação dos provetes	50
3.5 Sistema de ensaio e equipamento	51
3.6 Programa de ensaios	52
3.7 Estudo analítico – Pré-avaliação dos resultados esperados	56
3.8 Resultados e Discussão dos Resultados	58
CAPÍTULO 4 – Ensaio de vigas de dimensão real	67
4.1 Materiais	67
4.1.1. Caracterização dos materiais – Determinação do Módulo de Elasticidade das vigas de madeira.	70
4.2 Programa de ensaios	74
4.3 Preparação das vigas	76
4.3.1 Vigas pré-esforçadas	76
4.3.2 Vigas reabilitadas após cedência	82
4.3.3 Vigas reabilitadas após corte a meio vão	83
4.4 Sistema de ensaio e equipamento	84
4.5 Estudo analítico – Pré-avaliação dos resultados esperados	86
4.5.1 Cálculo do momento resistente de uma viga de madeira sem reforço	86
4.5.2 Cálculo do momento resistente de uma viga de madeira com pré-esforço	87
4.5.3 Cálculo do momento resistente de uma viga de madeira reforçada em boas condições	95
4.5.4 Cálculo do momento resistente de uma viga de madeira reabilitada depois de ter sido ensaiada	98
4.5.5 Cálculo do momento resistente de uma viga de madeira reabilitada depois de ter sido cortada	99
4.5.6 Momentos resistentes estimados	102
4.6 Resultados e Discussão dos Resultados	103
4.6.1 Resultados da série 1	104
4.6.2 Resultados da série 2	105
4.6.3 Resultados da série 3	108
4.6.4 Resultados da série 4	110

4.6.5 Resultados da série 5	111
4.6.6 Resultados gerais	113
CAPÍTULO 5 – Conclusão	117
5.1 Principais resultados obtidos	118
5.2 Desenvolvimentos futuros – Propostas de novos estudos	120
CAPÍTULO 6 – Referências	123
Anexos	127
Anexo A – Resultados dos ensaios das séries dos provetes pequenos	127

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2 –		
Figura 2. 1 - Templos Budistas em Horyu-ji, no Japão. [6]		9
Figura 2. 2 - Kintai Bridge, Japão, 1673. [5]		9
Figura 2. 3 - Ponte rodoviária em Vihantasalmi, Finlândia, 1999 [5]		10
Figura 2. 4 - Direcções principais da madeira [7]		12
Figura 2. 5 - Distribuição normal dos resultados de madeira ensaiada à flexão. [5]		13
Figura 2. 6 - Laminated veneer lumber (LVL) (“Madeira folheada-colada”) LVL [11]		14
Figura 2. 7 - Vigas I [11]		14
Figura 2. 8 - Aglomerado de partículas de madeira longas e orientadas OSB [11]		14
Figura 2. 9 - Aglomerado de partículas de madeira [11]		14
Figura 2. 10 - Aglomerado de fibras (MDF) [11]		14
Figura 2. 11 – Folheado (“veneer plywood”) [11]		14
Figura 2. 12 – Fasquiado (“blockboard”) [11]		14
Figura 2. 13 –Lamelado (“laminboard”) [11]		14
Figura 2. 14 - Stockholm railroad station, Sweden [12]		16
Figura 2. 15 – Pilares em MLC – Sunderby Hospital, Suécia [13 e5]		16
Figura 2. 16 - Finger joint numa peça de MLC [5]		16
Figura 2. 17 - Remoção de defeitos da madeira numa lâmina. [5]		17
Figura 2. 18 - Comparação das características da madeira com a MLC. [5]		17
Figura 2. 19 – Tecido de fibra de vidro. [15]		19
Figura 2. 20 - Tecido de fibra de carbono. [15]		19
Figura 2. 21 - Tecido de fibra de aramida. [16]		19
Figura 2. 22 – Peças de madeira descoladas devido a variações dimensionais.		24
Figura 2. 23 - Características da madeira (3), da Madeira Lamelada Colada (2) e de Madeira Lamelada Colada reforçada com fibras FRP (1). [5]		30
Figura 2. 24 - Soluções possíveis de reforço de vigas com FRP. [5]		31

Figura 2. 25 - Modos de ruína em elementos reforçados à flexão com FRP[18].	32
Figura 2. 26 - Diferentes modos de reforço investigados para o aumento da resistência ao corte da madeira [5].	33
Figura 2. 27 - Diferentes maneiras de reforço da madeira à flexão e ao corte [5]	34
Figura 2. 28 - Exemplo de aplicação do sistema de pré-esforço por indução de uma contraflecha. a) aplicação de uma força vertical de baixo para cima, através de macacos hidráulicos. b) Posicionamento e colagem dos laminados. c) Remoção dos macacos hidráulicos [21].	36
Figura 2. 29 - Aplicação de pré-esforço ao laminado por um equipamento independente à viga. a) Amarração e tracção do laminado no aparelho de pré-esforço. b) Colagem do laminado traccionado. Cura da cola epoxídica. c) Corte do laminado nas ancoragens e transferência do esforço ao compósito. [21]	37
Figura 2. 30 – Aplicação de pré-esforço ao FRP pelo sistema de pós-tensão. Realização de uma ancoragem e aplicação de tensão ao laminado. [21]	38
Figura 2. 31 – Delaminação: a fibra pré-esforçada é separada da viga de betão [23]	40
Figura 2. 32 – Aparelho de aplicação de pré-esforço, desenvolvido pelo EMPA, através da técnica de ancoragem gradual [23].	40
Figura 2. 33 – Detalhe do aparelho durante o processo de pré-esforço de uma viga de madeira [23].	40
CAPÍTULO 3 – Figura 3. 1 – Lamelas usadas para a execução dos provetes pequenos.	44
Figura 3. 2 - Componentes do sistema de reforço estrutural da empresa Sika: A resina epoxídica Sikadur® 30 e o laminado CFRP Sika® CarboDur.	45
Figura 3. 3 – Provelte pequeno.	46
Figura 3. 4 – Primeiro protótipo do provete.	47
Figura 3. 5 – Corte irregular na execução do primeiro provete.	47
Figura 3. 6 – Segundo protótipo do provete.	48
Figura 3. 7 – Excentricidades observadas no provete antes do ensaio.	48
Figura 3. 8 – Pares de peças de madeira para execução dos provetes.	48
Figura 3. 9 – Provelte escolhido.	49
Figura 3. 10 – Elementos para a composição do provetes.	49
Figura 3. 11 – Marcação do comprimento de colagem.	50
Figura 3. 12 – Peças de madeira coladas pela marcação.	50
Figura 3. 13 – Elaboração e aplicação da resina.	50

Figura 3. 14 – Colagem do laminado: aplicação de pressão e remoção da resina em excesso.	51
Figura 3. 15 - Prensa universal de 600kN.	51
Figura 3. 16 – Diagrama F- δ de um ensaio de aderência.	51
Figura 3. 17 – Armazenamento dos provetes em ambiente condicionado.	53
Figura 3. 18 – Condições higrométricas na câmara de cura.	54
Figura 3. 19 – Curva de carregamento indicada pela norma EN 26 891 [27]	55
Figura 3. 20 – Curva de carregamento aplicada aos provetes da série 5.	55
Figura 3. 21 – Curva de carregamento aplicada aos provetes da série 8.	56
Figura 3. 22 – Frequências absolutas da força de rotura [kN] das séries dos provetes pequenos.	60
Figura 3. 23 – Valores estimados e valores experimentais médios das séries dos provetes pequenos.	60
Figura 3. 24 - Valores esperados e valores médios obtidos das séries 1 a 4.	61
Figura 3. 25 – Provetes da série 2.	62
Figura 3. 26 – Provetes da série 3.	62
Figura 3. 27 – Medição da humidade sob a fibra, depois do ensaio, nos provetes da série 4.	62
Figura 3. 28 – Fibras levantadas nos provetes da série 4.	62
Figura 3. 29 - Valores esperados e valores médios obtidos das séries 1, 5 e 8.	63
Figura 3. 30 - Valores esperados e valores médios obtidos das séries 1, 6 e 7.	63
Figura 3. 31 – Tensão de corte nas séries 1, 6 e 7.	64
Figura 3. 32 - Distribuição da tensão de corte para diferentes comprimentos de colagem em elementos colados de igual rigidez E.A. [6]	64
Figura 3. 33 - Tensão de corte em função do comprimento de colagem.	65
Figura 3. 34 - Provede da série 6. Rotura por corte em bloco da madeira.	65
Figura 3. 35 – Provede da série 6. Rotura por corte em bloco da madeira, originada pela presença de nós e pela zona da medula.	65
Figura 3. 36 - Provede da série 7 e da série 6. Rotura dos anéis da madeira na direcção tangencial e transversal.	65
Figura 3. 37 - Provede da série 7. Rotura da madeira, originada pela presença de nós.	66
Figura 3. 38 - Provede da série 7. Rotura por corte em bloco da madeira, originada pela presença de nós.	66

CAPÍTULO 4 –		
Figura 4. 1 -	Constituição dos elementos de viga e pormenor da altura igual a 2,5 lamelas.	68
Figura 4. 2 –	Incremento de resistência em função da largura do laminado CFRP.	70
Figura 4. 3 –	Laminados Sika®, colados em vigas de glulam.	70
Figura 4. 4 –	Esquema de ensaio para a determinação do Módulo de Elasticidade Global à Flexão.	71
Figura 4. 5 –	Equipamento utilizado nos ensaios de determinação do ME à flexão.	72
Figura 4. 6 –	Gráfico força-deslocamento na fase de deformação elástica. [26]	72
Figura 4. 7 –	Gráfico carga-deslocamento da viga 15 do ensaio do Módulo de Elasticidade. Secção considerada do gráfico carga-deslocamento da viga 15 para o cálculo do Módulo de Elasticidade.	73
Figura 4. 8 –	Frequências absolutas dos valores obtidos do Módulo de Elasticidade.	73
Figura 4. 9 –	Esquema de carregamento aplicado à viga para a colagem do laminado CFRP.	76
Figura 4. 10 –	Esquema do sistema de alavanca.	77
Figura 4. 11 –	Pórtico utilizado para a colagem dos laminados.	77
Figura 4. 12 –	Esquema da estrutura usada para a colagem dos laminados.	77
Figura 4. 13 -	Pré montagem da estrutura.	78
Figura 4. 14 –	Estrutura utilizada para a colagem dos laminados.	79
Figura 4. 15 –	Apoios móveis.	80
Figura 4. 16–	Disposição dos dispositivos LVDT.	80
Figura 4. 17 –	Deformação das vigas, a meio vão, ao longo do tempo.	81
Figura 4. 18 –	Elementos adicionados para permitir o escorregamento do laminado. Apoio que permite o escorregamento e apoio que não permite o escorregamento.	81
Figura 4. 19 –	Vigas após cedência (série referência).	82
Figura 4. 20 –	Aplicação da cola genérica.	82
Figura 4. 21 –	Colagem da viga, sujeita à aplicação de carga para eliminação da deformação.	82
Figura 4. 22 -	Icosit® K 101	83
Figura 4. 23 –	Preenchimento dos vazios com Icosit e posterior colagem dos laminados.	83
Figura 4. 24 –	Colagens dos laminados nas vigas cortadas a meio vão.	83
Figura 4. 25 -	Corte da face inferior até ao eixo neutro, a meio vão.	83
Figura 4. 26 –	Disposição dos transdutores de deslocamento LVDTs.	84

Figura 4. 27 – Pórtico onde foram feitos os ensaios.	85
Figura 4. 28 - Transdutores de deslocamento tipo CDP [30]	85
Figura 4. 29 - Transdutores de deslocamento tipo SDP [31]	85
Figura 4. 30 – Diagrama da aplicação da carga e do momento flector aplicado na viga.	87
Figura 4. 31 – Estado de tensão da viga para a colagem do laminado.	88
Figura 4. 32 - Diagrama da aplicação da carga e do momento flector aplicado à viga.	88
Figura 4. 33 – Transformação da secção em secção homogeneizada	89
Figura 4. 34 – Diagrama da aplicação da carga e do momento flector aplicado para a rotura da viga.	89
Figura 4. 35 – Estado de tensão para uma viga sujeita a um carregamento contrário.	90
Figura 4. 36 – Estado de tensão resultante, na secção a meio vão.	90
Figura 4. 37 – Forças internas provocadas pelo estado de tensão.	90
Figura 4. 38 – Forças internas a actuar na secção, a meio vão.	91
Figura 4. 39 – Definição da localização do ponto de aplicação das forças internas.	94
Figura 4. 40 – Transformação da secção em secção homogeneizada	95
Figura 4. 41 - Forças internas a actuar na secção, a meio vão.	96
Figura 4. 42 – Definição da localização do ponto de aplicação das forças internas.	97
Figura 4. 43 – Diagrama da aplicação da carga e do momento flector aplicado na viga.	98
Figura 4. 44 – Transformação da secção em secção homogeneizada.	99
Figura 4. 45 - Forças internas a actuar na secção, a meio vão.	100
Figura 4. 46 – Diagrama da aplicação da carga e do momento flector aplicado na viga.	101
Figura 4. 47 – Rotura da viga V10.	104
Figura 4. 48 – Rotura da viga V11.	104
Figura 4. 49 – Gráfico força-deslocamento das vigas da série de referência do ensaio de flexão, à rotura.	105
Figura 4. 50 – Compressão das fibras, na face superior da viga V03, depois de ensaiada.	106
Figura 4. 51 – Rotura da viga V06.	106
Figura 4. 52 – Rotura da viga V05. Pormenor da separação por corte do laminado.	106
Figura 4. 53 – Rotura da viga V12, por uma ligação tipo finger joint entre lamelas.	107
Figura 4. 54 – Rotura da viga V13, por separação do laminado por corte.	107

Figura 4. 55 – Gráfico força-deslocamento das vigas da série 2, do ensaio de flexão, à rotura.	107
Figura 4. 56 – Rotura da viga V08.	108
Figura 4. 57 – Rotura da viga V01, numa ligação finger joint.	109
Figura 4. 58 – Gráfico força-deslocamento das vigas da série 3, do ensaio de flexão, à rotura.	109
Figura 4. 59 – Rotura da viga V07.	110
Figura 4. 60 – Rotura da viga V10.	110
Figura 4. 61 – Rotura da viga V11.	110
Figura 4. 62 - Gráfico força-deslocamento das vigas da série 4, do ensaio de flexão, à rotura.	111
Figura 4. 63 – Rotura da viga V14.	112
Figura 4. 64 – Rotura da viga V16.	112
Figura 4. 65 – Gráfico força-deslocamento das vigas da série 5, do ensaio de flexão, à rotura.	113
Figura 4. 66 – Gráfico força-deslocamento geral do ensaio de flexão, à rotura.	113
Figura 4. 67 – Comparação da carga de rotura obtida experimentalmente e analiticamente.	114
Figura 4. 68 – Incremento da carga de rotura, relativamente à série referência, em %.	115

ÍNDICE DE QUADROS

CAPÍTULO 2 –	Quadro 2.1: Propriedades mecânicas de algumas madeiras portuguesas para estruturas. [8]	12
	Quadro 2.2 – Valores das propriedades mecânicas dos compósitos FRP [14].	18
	Quadro 2.3 – Colas estruturais para madeira distribuídas de acordo com o seu comportamento estrutural em serviço sob várias condições atmosféricas. [17]	27
	Quadro 2.4 – Características dos sistemas de pré-esforço com FRP para aplicação in situ [21]	39
CAPÍTULO 3 –	Quadro 3.1 – Valores característicos das propriedades mecânicas Glulam homogéneo – GL24h [24]	45
	Quadro 3.2 – Valores das propriedades mecânicas e dimensionais do laminado [25]	46
	Quadro 3.3 – Programa de ensaios dos provetes pequenos	52
	Quadro 3.4 – Valores estimados da carga de rotura dos provetes	57
	Quadro 3.5 – Força máxima de tracção, em kN, registada nos ensaios dos provetes pequenos.	59
CAPÍTULO 4 –	Quadro 4.1 – Valores das propriedades mecânicas e dimensionais dos laminados	69
	Quadro 4.2 – Determinação do Módulo de Elasticidade das vigas de glulam	74
	Quadro 4.3 – Programa de ensaios das vigas	75
	Quadro 4.4 – Deformações verificadas na colagem dos laminados	80
	Quadro 4.5 – Resultados esperados para os ensaios das vigas	102
	Quadro 4.6 - Parâmetros registados nos ensaios das vigas da série 1	105
	Quadro 4.7 - Parâmetros registados nos ensaios das vigas da série 2	107
	Quadro 4.8 - Parâmetros registados nos ensaios das vigas da série 3	109
	Quadro 4.9 - Parâmetros registados nos ensaios das vigas da série 4	111
	Quadro 4.10 - Parâmetros registados nos ensaios das vigas da série 5	112
	Quadro 4.11 – Resultados obtidos nos ensaios às vigas.	114

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Objecto, âmbito e justificação

Até ao início do Século XX, a madeira ocupou o lugar de principal material estrutural de construção juntamente com a pedra.

A partir de então, com o evoluir dos tempos, outros materiais (aço e betão armado) foram gradualmente substituindo a madeira nas estruturas, e isto deveu-se essencialmente aos seguintes factores:

- Inferior desenvolvimento tecnológico da madeira comparativamente ao aço e betão;
- Desconhecimento dos profissionais do ramo das boas características da madeira e da sua correcta utilização;
- A limitação das secções comerciais disponíveis para a madeira que não permitia a utilização em grandes vãos;
- Custo superior do material comparativamente com o aço e betão armado, dimensionados para os mesmos usos.

Actualmente a situação tende a inverter-se em alguns países mais desenvolvidos. Institutos e outros Organismos de Investigação preocupam-se constantemente em criar novas linhas de investigação que estudam a madeira e as suas aplicações possíveis de modo a tornar este material competitivo comparativamente às alternativas existentes.

É assim que surge a madeira lamelada colada na construção, possibilitando a sua utilização como elemento estrutural, com o que esse facto originou pelas enormes novas possibilidades arquitectónicas que esse novo material oferece. [1]

Os novos produtos estruturais derivados de madeira, entre eles a madeira lamelada colada, vieram assim dar um enorme impulso à utilização da madeira, abrindo novos campos de aplicação e estabelecendo padrões de produção e utilização compatíveis com as modernas exigências das construções. Esse fenómeno conduziu também à redescoberta da madeira maciça como material estrutural.

Conjuntamente com as modernas preocupações de desenvolvimento sustentável, esse facto constituiu a principal causa do rejuvenescimento do interesse na construção de estruturas novas de madeira e derivados e na reabilitação das estruturas existentes em estado recuperável.

No entanto, a procura crescente destes produtos, a redução progressiva de stocks de madeira de elevada qualidade e a necessidade de racionalizar o uso de um recurso escasso e valioso, vêm incentivando o desenvolvimento de novas soluções estruturais que, preservando no produto final a beleza do material primário, permitam aumentar o seu desempenho e, conseqüentemente, reduzir o consumo de material lenhoso. [2]

As estruturas de madeira degradam-se ao longo do tempo, em virtude das acções mecânicas, que actuam sobre a estrutura, e das acções físicas, químicas e biológicas, que actuam sobre os materiais. Verifica-se assim a necessidade de executar regularmente operações de conservação, reforço e reabilitação dessas estruturas.

A madeira é um material com vasta aplicação na construção, cumprindo um papel essencial nas estruturas, pavimentos e coberturas de muitos dos edificios existentes. No entanto, as condições ambientais às quais a madeira é exposta, a diferente durabilidade natural das várias espécies de madeira, as condições de aplicação a nível estrutural e o modo de execução de alguns pormenores construtivos, influem na durabilidade dos diversos elementos estruturais de madeira. Estes factores conduzem a degradações, quer estruturais quer biológicas, que originam diversos tipos de anomalias.

As anomalias em elementos e estruturas de madeira traduzem-se genericamente em deformações excessivas e deteriorações localizadas que conduzem a reduções mais ou menos significativas das secções úteis das peças. As deformações excessivas podem ser atribuídas a deficiências de projecto e de execução, ao desconhecimento das características de resistência e deformabilidade da madeira, à aplicação de cargas excessivas não previstas e ao efeito de fluência, associado ao envelhecimento da madeira. A deterioração da madeira pode ser causada por falta de protecção ou protecção insuficiente dos elementos de madeira contra os agentes agressivos, sobretudo contra a humidade. A humidade da madeira e a temperatura influenciam o desenvolvimento e o crescimento de xilófagos, bem como a conseqüente degradação biológica da madeira. Após o diagnóstico e a análise das anomalias e das causas que lhes deram origem, é necessário escolher a técnica de intervenção mais adequada para proceder à reparação dos elementos em madeira. Para esse efeito, é necessário conhecer os materiais e as técnicas disponíveis para intervir neste tipo de estruturas. [3]

Através do resultado do diagnóstico de uma estrutura podem ser deduzidas medidas de carácter estrutural, que deverão adoptar-se para recuperar a segurança e estabilidade da construção.

Podemos dividir as causas da perda de capacidade resistente das peças estruturais em madeira em três famílias de fenómenos:

- agravamento dos defeitos naturais das peças como resultado de variações termo-higrométricas, fenómenos de secagem ou outros;
- perda de integridade por acção de agentes xilófagos (fungos e insectos);
- anomalias de carácter estrutural associadas a uso ou manutenção não adequadas.

Nesse contexto, podemos admitir que, em geral, os defeitos originais existentes em peças estruturais de madeira com uma certa idade e os que resultaram do respectivo processo natural de envelhecimento têm uma importância relativamente reduzida face aos outros dois fenómenos de perda de capacidade resistente das peças: a perda de integridade por acção de agentes xilófagos e as anomalias associadas a mau uso estrutural.

Poderá ainda ser necessário proceder ao reforço das estruturas como consequência da aplicação dos códigos estruturais modernos que apontam para capacidades resistentes mais elevadas, normalmente causadas por sobrecargas regulamentares relativamente elevadas ou por uma maior limitação da deformação ou vibrações em serviço.

Deve assim ser eleita a técnica de reabilitação mais adequada. Uma das opções possíveis consiste na simples substituição das peças cujo estado seja irreversível ou na aplicação em paralelo ou em apoio adicional de novos elementos estruturais. Outra opção possível consiste no reforço das peças existentes com materiais adicionais o que permite aumentar a capacidade resistente existente ou restituir parte da capacidade inicial perdida pelos motivos atrás expostos (agentes xilófagos, mau uso estrutural ou outros).

Qualquer que seja o objectivo que se pretenda, existem diferentes técnicas de intervenção. A escolha da técnica correcta para cada situação dependerá do tipo de material que se pretenda aplicar e do tipo de degradação a eliminar. [3]

O desempenho de estruturas de madeira e de madeira lamelada colada à flexão é condicionado pela resistência à tracção da madeira e das lamelas, o que tem motivado a busca de novas soluções baseadas no reforço da zona traccionada. Assim, nos últimos anos tem sido investigado o potencial de reforço associado a uma variedade de materiais, como o aço, o alumínio e os polímeros reforçados com fibras de alta resistência, como as de vidro (GFRP), de carbono (CFRP) e de aramida (AFRP). [2]

A reparação e o reforço de estruturas de madeira tem um impacto económico e social crescente. Com efeito, devido à necessidade, cada vez maior, de reabilitar e reforçar as estruturas existentes tornou-se imperativo que surgissem técnicas que recorram a materiais duráveis e de elevada resistência mecânica, que minimizem os efeitos em termos estéticos e que sejam de rápida e simples execução. Diversos estudos já realizados demonstraram que a utilização de compósitos de CFRP é uma técnica de reforço eficaz e que garante os requisitos atrás referidos.

Os polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP) têm sido utilizados, com muito sucesso, em diversas áreas tais como a indústria aeronáutica, automobilística e naval. Nos finais dos anos setenta e inícios dos anos oitenta, iniciou-se a investigação destes materiais aplicados às estruturas de engenharia civil, nomeadamente no reforço de estruturas de betão.

A utilização de colas epoxídicas associadas a varões de aço ou perfis compósitos (FRPs) constitui uma das técnicas de reforço ou consolidação mais interessantes e promissoras, dada a rapidez e o carácter pouco intrusivo do processo, que permite a manutenção das estruturas em serviço com o mínimo de substituição da estrutura original. [4]

No entanto, a grande diversidade de produtos disponíveis no mercado (colas e FRPs), com diferentes características e exigências de aplicação, levanta frequentemente reservas à adopção desta técnica e dificuldades à sua implementação. Além da adequada selecção dos produtos e cuidada pormenorização face aos objectivos e especificidade do trabalho, deve prever-se mão-de-obra especializada e ser implementado um adequado plano de qualidade, tanto mais que a eficácia da intervenção depende em grande medida do cuidado posto na sua realização.

Dados os condicionamentos do trabalho em obra, com prazos de trabalho desejavelmente curtos e em que frequentemente se procura causar o mínimo de perturbação ao edifício e seus utilizadores, importa controlar a par e passo a qualidade do trabalho executado. [4]

Este projecto respeita à reparação ou reforço de elementos estruturais de madeira, por métodos reduzidamente invasivos, recorrendo a resinas epoxídicas e materiais compósitos.

Materiais de reforço como os laminados de fibras de vidro ou de carbono (G/CFRP) apresentam elevada performance mecânica, pelo que a sua aplicação como armadura passiva resulta num subaproveitamento de material. Dado o seu elevado preço e a mão-de-obra especializada requerida, considera-se que os benefícios são

modestos, em comparação com os custos associados.

A introdução de pré-esforço oferece diversas vantagens adicionais, como a da redução de deformações, por efeito da contra flecha induzida pelo pré-esforço excêntrico. Este aspecto é da maior importância, uma vez que a verificação do estado limite de deformação constitui frequentemente a condição determinante no dimensionamento de vigas de madeira.

O pré-esforço permite também modificar o modo de rotura da viga, transferindo o esgotamento da capacidade resistente para o lado comprimido da viga o que, dada a não-linearidade do ramo de compressão da curva tensão-extensão da madeira, resulta num tipo de rotura mais dúctil do que o habitual. Por outro lado, a armadura de reforço oferece um percurso alternativo às tensões de tração, limitando a propagação descontrolada de fracturas originadas em nós ou outros pontos fracos.

O atrás referido serve de justificação a esta dissertação.

Pretendeu-se demonstrar que o uso de tiras de CFRP coladas com resinas epoxídicas com e sem pré-esforço sobre elementos estruturais em madeira em estado mais ou menos crítico de degradação constitui um processo simples de reabilitação que permite devolver a essas vigas danificadas uma parte importante da sua capacidade resistente inicial.

Paralelamente, procurou avaliar-se numericamente o valor relativo do aumento de resistência resultante da utilização dessa técnica em vigas novas de lamelado colado.

A escolha do lamelado colado resultou da necessidade de restringir ao mínimo possível a variação associada à capacidade resistente inicial das peças de madeira já que essa capacidade é bem menos variável nas vigas de lamelado colado que nas vigas correspondentes da madeira maciça usada nas lamelas.

O trabalho desenvolvido utilizou provetes de pequena dimensão e vigas com dimensões estruturais de lamelado colado de pinho silvestre de origem nórdica fabricados em Portugal pela empresa Flexilam de Mortágua, que entretanto encerrou a laboração. As conclusões obtidas têm assim um âmbito que, no limite, se confina aos materiais utilizados embora, com alguma confiança, possam ser extrapolados para usos semelhantes sobretudo ao nível das espécies de madeira maciça ou lamelada colada sujeitas ao reforço com CFRP com ou sem aplicação de pré-esforço.

1.2 Objectivos da Dissertação

As estruturas de madeira em edifícios antigos, sobretudo residenciais, estão dimensionadas para cargas de serviço baixas, relativamente ao que está normalizado actualmente, e podem assim beneficiar do uso de tecnologias modernas para aumentar a respectiva capacidade resistente.

O reforço de estruturas para suportarem cargas mais elevadas ou para restituir a capacidade de carga inicial constitui assim uma área de investigação bastante actual e com interesse prático imediato.

O trabalho aqui apresentado centra-se na reparação e reforço de vigas carregadas à flexão, que eventualmente apresentem rotura por fendas de flexão, que envolvam colagem do reforço na face traccionada.

Tentou-se desenvolver uma técnica de reforço, que consumisse o mínimo de tempo e de recursos, e para esse efeito usaram-se polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP) que foram colados, com e sem pré-esforço, a vigas de madeira lamelada colada com resina epoxídica.

O sistema de reabilitação com pré-esforço proposto consiste na imposição de uma contra-flecha à viga recorrendo a escoras induzindo deformações nas vigas eventualmente com recurso a macacos hidráulicos e, enquanto escorada, na colagem de um laminado de CFRP, sendo retiradas as escoras após a cura da cola. O sistema de reabilitação sem pré-esforço consiste na colagem simples do laminado.

Os estudos de carácter experimental realizados assentaram num programa com algum significado. Foram realizados também diversos cálculos de pré-avaliação dos valores dos esforços e deformações que se poderiam esperar obter nos ensaios.

O programa experimental foi dividido em duas fases. A primeira incidiu sobre o estudo da aderência entre a madeira e o laminado, tendo sido ensaiadas várias séries de provetes pequenos, produzidos sob distintas condições termo-higrométricas ou com diferentes agentes de ligação. A segunda fase investigou o comportamento de elementos de dimensão estrutural, previamente reforçados pela técnica acima mencionada ou simplesmente reabilitados com o laminado após a rotura das vigas simples.

Foram assim ensaiadas vigas em bom estado reforçadas, com e sem pré-esforço, com o intuito de se determinar o grau de eficiência desta técnica como reforço de

estruturas novas. Foram também ensaiadas vigas, com danos e/ou deformações prévias importantes, reforçadas com a mesma técnica. Neste caso não foi possível aplicar o pré-esforço por existir o risco de ocorrer a rotura das vigas. O objectivo neste caso foi determinar a capacidade resistente que se poderia restituir a vigas danificadas que, numa situação real concreta, teriam de ser removidas e substituídas.

Foram ainda feitos ensaios de arrancamento, em provetes pequenos com o intuito de se determinar a influência de determinados parâmetros na ligação colada, sendo estes a humidade, o comprimento de colagem e o tipo de carregamento.

1.3 Bases do trabalho desenvolvido

O trabalho de investigação desenvolvido apoiou-se em trabalhos recentes de investigação relacionados com o reforço de estruturas de madeira com materiais compósitos, efectuados na Universidade de Coimbra, sobre a orientação de João Negrão.

Desses trabalhos surgiram algumas dissertações de Mestrado e Doutoramento das quais se destacam a de Ruivo Duarte, que numa das variantes que estudou, usou varões pultrudidos de fibra de vidro, para reabilitação de vigas com placas epoxídicas armadas [5], e a de Daniel Barroso, que iniciou o estudo de vigas pré-esforçadas com fio de pré-esforço mas, por razões várias, o estudo não foi concluído [6].

Esses trabalhos constituíram a base inicial que esteve na origem da investigação que suporta esta dissertação. Este trabalho foi, no entanto, o primeiro a utilizar laminados de fibras de carbono.

Foi feita também uma pesquisa exaustiva de publicações recentes, essencialmente de origem europeia, de carácter científico directamente relacionadas com o tema estudado e de que se destacam as actas dos vários congressos WCTE – WorldConference on Timber Engineering, e as actas das Acções COST, especialmente a Acção COST E34 - Bonding of Timber.

Esta dissertação apoia-se num trabalho de pesquisa de base essencialmente experimental. A pesquisa foi realizada no contexto do Projecto POCI/ECM/60089/2004 com o tema “Caracterização de Ligações Coladas e Comportamento de Elementos Estruturais Compósitos de Madeira baseados em Colagem”, co-financiado pela FCT e pelo POCI e com a participação parcial do Programa FEDER da União Europeia.

1.4 Organização da Dissertação

A dissertação está estruturada em cinco capítulos, incluindo a introdução e a conclusão.

Após este capítulo introdutório, aborda-se no Capítulo 2 a descrição genérica dos materiais utilizados neste trabalho e as técnicas de reforço possíveis com os mesmos. A pesquisa bibliográfica efectuada inclui a caracterização dos materiais mais frequentemente utilizados no fabrico de compósitos e aborda a questão da interacção entre os materiais num processo corrente de colagem de tiras de CFRP.

No Capítulo 3 descrevem-se os ensaios de arrancamento realizados aos provetes pequenos e apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos.

No Capítulo 4 descrevem-se os ensaios à flexão efectuados sobre vigas com dimensões estruturais (90x110x2250 mm), reforçadas ou não com laminados de CFRP e apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos.

As principais conclusões que foi possível retirar dos estudos experimentais e numéricos efectuados constam do Capítulo 5, onde se incluem também algumas reflexões sobre diversas novas linhas de pesquisa que este trabalho permitiu abrir.

A Dissertação completa-se com as referências bibliográficas e mediográficas consultadas.

CAPÍTULO 2 - ESTADO DE ARTE

O grande objectivo deste capítulo é dar uma visão geral do que até à data se conhece como madeira estrutural reforçada com FRP (Fibre Reinforced Polymer). É feita a caracterização dos materiais utilizados e as técnicas de reforço possíveis com os mesmos, dando-se especial importância às que incluem pré-esforço. A pesquisa bibliográfica efectuada inclui a caracterização dos materiais mais frequentemente utilizados no fabrico de compósitos e aborda a questão da interacção entre os materiais associada ao processo de colagem.

2.1 Materiais

2.1.1 Madeira estrutural

A madeira é um dos primeiros materiais que o homem começou a utilizar na construção, e ainda hoje continua a ser utilizado. Pontes, habitações, catedrais, barcos e até mesmo aviões, a partir do final do Século XX, têm sido construídos com madeira.

Algumas das grandes estruturas de edificios construídas no passado, foram feitas com madeira como, por exemplo, os monumentos Budistas em Horyu-ji, no Japão (Figura 2.1), construídos no Século VIII, que são os edificios de madeira mais antigos do mundo, ou a ponte Kintai, no mesmo país (Figura 2.2), de 1673, com uma estrutura impressionante de 200m de vão em cuja construção não se usou um único prego. [7]



Figura 2. 1 - Templos Budistas em Horyu-ji, no Japão. [8]

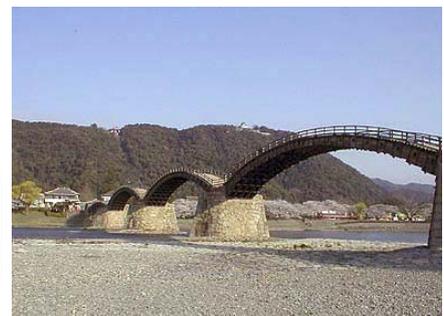


Figura 2. 2 - Kintai Bridge, Japão, 1673. [7]

Nos países do Norte da Europa, como a Suécia, a Noruega ou a Finlândia, a madeira é utilizada como matéria-prima na construção há muito tempo. Muitos edifícios antigos ainda estão de pé, mesmo não sendo habitados. A madeira foi muito utilizada, em particular em Engenharia Civil, até ao aparecimento do betão e do aço, no Século XIX. Desde então, os edifícios tornaram-se mais altos e as pontes têm de suportar maiores cargas, devido aos aumentos do tráfego e do tamanho/peso dos veículos. Além disso, estes novos materiais apresentavam uma maior resistência, durabilidade e, ao contrário da madeira, ausência de descontinuidades naturais. Todas estas “vantagens” levaram à diminuição da utilização da madeira nas grandes estruturas, até ao final dos anos 80, continuando, no entanto, um dos materiais mais utilizados na construção ligeira. [7]

Como resposta a esta tendência, surgiram os produtos derivados da madeira (Engineered Wood Products – EWP), como a madeira lamelada colada, que apresentam propriedades mecânicas, como a resistência e a rigidez, superiores às da madeira de que são constituídos. Realmente, a influência dos defeitos naturais, como os nós, o fio torcido e a heterogeneidade, que definiam os limites mecânicos da madeira maciça, é consideravelmente reduzida na madeira lamelada colada.

Com melhores e mais uniformes propriedades mecânicas, a madeira lamelada colada tornou-se uma alternativa interessante aos materiais mais correntemente usados em estruturas, nomeadamente betão e aço, para estruturas sujeitas a um alto nível de carga. Além disto, a madeira é um material renovável, amigo do ambiente e disponível em grandes quantidades em quase todo o mundo. [7]

Uma recente aplicação onde os engenheiros preferiram a madeira ao aço, pode ser vista em Mäntyharju, na Finlândia. A ponte Vihantasalmi, construída entre 1997 e 1999 (Figura 2.3), é uma das mais largas pontes rodoviárias em madeira do mundo. Tem 168 metros de comprimento e 14 de largura. A estrutura de suporte foi construída em madeira lamelada colada. Estes melhoramentos das propriedades mecânicas contribuíram para expandir o leque de aplicações da madeira estrutural. [7]



Figura 2. 3 - Ponte rodoviária em Vihantasalmi, Finlândia, 1999 [7]

2.1.1.1 Comportamento de um material natural

A madeira é um material celular, produzido por um mecanismo de crescimento contínuo, próprio das plantas. Existem milhares de espécies de árvores espalhadas por todo o mundo, cada uma com propriedades únicas, mas com características comuns, tais como uma estrutura celular com um arranjo em forma de anéis concêntricos, que confere propriedades mecânicas e físicas ortotrópicas (resistência, rigidez, retratibilidade) directamente relacionadas com a sua orientação, relativa aos eixos ortogonais principais. Outras características comuns à maioria das espécies de madeira são as relativas ao crescimento, como os anéis de crescimento (que têm origem no ciclo de crescimento anual das células), nós, restrições e fendas (separação das células da madeira causada pelo crescimento, secagem ou por esforços mecânicos em zonas mais frágeis), orientação das fibras ou fio (orientação da direcção longitudinal das células relativamente aos eixos geométricos do elemento). Nos elementos de madeira maciça, as propriedades mecânicas são afectadas por estas características relacionadas com o crescimento da árvore.

As espécies das árvores são agrupadas em duas grandes categorias que são as resinosas, Gimnospérmicas ou de folha persistente, e as folhosas, Angiospérmicas ou de folha caduca. Esta diferenciação é feita não só com base no modo de reprodução, mas também na sua estrutura microscópica.

As propriedades químicas e mecânicas da madeira de uma dada espécie variam comparativamente à de outras árvores da mesma espécie e até à de zonas distintas da mesma árvore.

Muitos parâmetros (como a localização geográfica, o clima, as condições do solo, etc.) afectam o crescimento de uma árvore e, conseqüentemente, as suas propriedades. [7]

Muitos outros parâmetros, como os nós, as fendas (aberturas ao longo das fibras que ocorrem quando a madeira seca), a inclinação do fio, as diferenças anatómicas entre o cerne e o borne, as condições anuais que condicionam a formação dos anéis de crescimento, etc., fazem com que a resistência e a qualidade da madeira apresente grandes variações. A madeira estrutural ideal será a que tiver as fibras rectas, sem nós, sem fendas de secagem e com uma estrutura anatómica homogénea. [7]

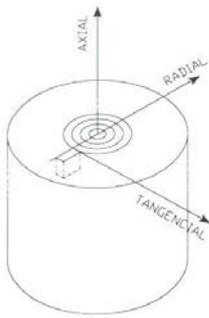


Figura 2. 4 - Direcções principais da madeira. [9]

Anisotropia

A madeira é um material anisotrópico, sendo as três direcções principais a radial (perpendicular às fibras e aos anéis de crescimento), tangencial (perpendicular às fibras e tangente aos anéis de crescimento) e longitudinal (paralela às fibras), como ilustra a Figura 2.4. Por simplificação, pode ser considerado ortotrópico, só com as direcções longitudinal e transversal. [7]

Devido à anisotropia, a madeira não apresenta propriedades mecânicas homogêneas. Algumas propriedades, como a resistência à tracção ou à compressão, podem variar de uma ordem de grandeza, consoante a direcção considerada. Os valores das propriedades mecânicas são mais altas na direcção paralela às fibras. [7]

Para efeitos de cálculo, muitas vezes, o modelo adoptado é o transversal isotrópico em que se consideram duas direcções apenas – a das fibras e a perpendicular às fibras – considerando-se assim que as propriedades nas direcções radial e tangencial são as mesmas.

Propriedades mecânicas

O estudo das características mecânicas das madeiras pode considerar-se inserido no domínio da Resistência de Materiais.

A grande variedade de espécies fornece uma panóplia de madeiras com diferentes propriedades.

É fácil concluir que o conhecimento destas características é da maior importância, pois permite um emprego mais adequado das diversas espécies de madeira, seleccionando-as de acordo com as suas aptidões naturais. [7]

O Quadro 2.1 apresenta as propriedades mecânicas das principais madeiras portuguesas com interesse para estruturas.

Quadro 2.1 – Propriedades mecânicas de algumas madeiras portuguesas para estruturas. [10]				
Designação	Nome latino	Resistência flexão $f_{m,k}$ [MPa]	Módulo de elasticidade médio $E_{o,m}$ [GPa]	Massa volumica ρ_k [kg/m ³]
Castanho	Castanea Sativa Mill	97	10	540
Carvalho	Quercus faginea Lam.	122	11	800
Eucalipto	Eucalyptus Globulus Labill	137	12	765
Choupo branco	Populus Alba L.	80	11	450
Pinheiro bravo	Pinus Pinaster Ait	18	12	460

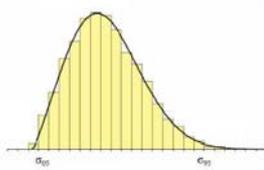


Figura 2. 5 - Distribuição normal dos resultados de madeira ensaiada à flexão. [7]

Mesmo entre elementos da mesma espécie e da mesma qualidade, a variabilidade dos valores de resistência é grande (Figura 2.5). Este facto traduz-se numa grande dispersão das propriedades mecânicas em torno dos seus valores médios, o que se reflecte conservadoramente nos valores característicos, utilizados como valores básicos para dimensionamento, à luz dos métodos actualmente utilizados, na Europa, em projecto de estruturas de madeira ou de outros materiais.

Resistência ao fogo

O bom desempenho da madeira perante a acção do fogo é do conhecimento da comunidade técnica. Contudo, a sua combustibilidade pode, ainda hoje, gerar alguma desconfiança. Na verdade, a madeira apresenta uma excelente *performance* perante tal solicitação, podendo manter, desde que devidamente dimensionada, a sua capacidade mecânica durante um largo período de tempo.

Esta situação é justificada pelo facto de a madeira ter baixa condutibilidade térmica e, em combustão, formar uma envolvente carbonizada que assegura uma protecção da zona central, mantendo-a intacta nas suas propriedades.

Assim, o factor preponderante no cálculo será a velocidade de carbonização, a qual depende de múltiplos factores (espécie, densidade, forma, estado higrométrico, tratamento intumescente e solução tecnológica – lamelado-colado ou madeira maciça).

Do ponto de vista estrutural, a perda de capacidade mecânica da madeira em combustão é em grande medida explicada pela perda de secção eficaz e não por uma modificação fisicomecânica da matéria restante.

Em resumo, a redução de resistência que resulta da diminuição da secção exposta ao fogo é atenuada pela conservação das propriedades mecânicas do núcleo. [11]

2.1.1.2 Derivados da madeira

Os produtos derivados da madeira (EWP) são materiais compósitos que têm tido sucesso na indústria da construção. As propriedades mecânicas e físicas destes materiais dependem da relação interactiva entre a qualidade da matéria-prima, o processo de fabrico e a aplicação. No geral as suas propriedades mecânicas têm uma menor variação quando comparadas com as da madeira maciça. Alguns dos mais importantes destes produtos usados em estruturas são:

- madeira lamelada colada (Glued laminated timber – GLT),
- madeira folhada colada (Laminated veneer lumber - LVL) (Figura 2.6),
- Parallel strand lumber (PSL),

- Laminated strand lumber (LSL),
- Vigas prefabricadas em I (I-joist) (Figura 2.7), e
- placas OSB (oriented strand board/rimboard). [12]

Outros EWP usados na construção como elementos não estruturais são: os aglomerados de partículas de madeira (Figura 2.8 e 2.9), os aglomerados de fibras de madeira (Figura 2.10) e os contraplacados (Figura 2.11 a 2.13), que podem ser folheados, fasquiados ou lamelados.

EWP usados em estruturas



Figura 2. 6 - Laminated veneer lumber (LVL) ("Madeira folheada-colada") LVL [13]



Figura 2. 7 - Vigas I [13]

Aglomerados



Figura 2. 8 - Aglomerado de partículas de madeira longas e orientadas OSB [13]



Figura 2. 9 - Aglomerado de partículas de madeira [13]



Figura 2. 10 - Aglomerado de fibras (MDF) [13]

Contraplacados ("plywood"):



Figura 2. 11 - Folheado ("veneer plywood") [13]



Figura 2. 12 - Fasquiado ("blockboard") [13]

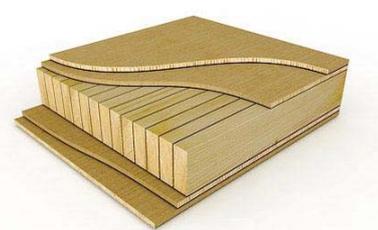


Figura 2. 13 -Lamelado ("laminboard") [13]

Os produtos derivados da madeira diferem da madeira serrada dos toros, da qual se obtêm elementos individuais. Em vez disso, estes produtos são feitos a partir de folhas, fibras e lâminas. Estas pequenas partículas são emparelhadas ou arranjadas

para fins estruturais e ligadas entre si com colas e resinas sob altas pressões e temperaturas para formar placas ou secções estruturais. [12]

Uma das mais valias dos derivados da madeira é a possibilidade de constituir grandes peças estruturais a partir de pequenos elementos. Este processo tende a dispersar os defeitos naturais da madeira, resultando em elementos com propriedades físicas e mecânicas mais precisas e constantes, relativamente às da madeira maciça. O facto de os resultados serem mais constantes pode levar a um aproveitamento mais eficiente do material. [12]

No futuro, com a reduzida oferta de elementos estruturais de madeira de grande dimensão e uma crescente tecnologia de reciclagem, os derivados da madeira irão desempenhar um papel ainda mais importante como elementos estruturais.

2.1.1.3 Madeira lamelada colada

A madeira lamelada colada – MLC – é feita de pranchas de madeira coladas umas às outras para formar uma peça de maiores dimensões. Esta tecnologia permite diminuir a variabilidade do material e torná-lo menos vulnerável às descontinuidades resultantes do crescimento natural, como os nós. Na verdade, é possível eliminar estes defeitos e obter um material mais homogéneo.

Além disto, a MLC permite a execução quase ilimitada de formas e estruturas, desde vigas simples de grande vão até vigas complexas em forma de arco, e é muito utilizada em estruturas de habitações, armazéns, pontes pedonais, etc. O seu uso em estruturas sujeitas a cargas elevadas é, no entanto, limitado, devido à resistência e à rigidez à flexão baixas, custo elevado, desvantagens na durabilidade e manutenção comparativamente às estruturas de aço e de betão. No entanto, outros aspectos de peso jogam a favor (ecologia e aspecto estético) e fazem com que a madeira e a MLC tenham um futuro prometedo.

Nos países em que a madeira é uma matéria-prima comum, como a Suécia, Finlândia, Noruega, Canadá, etc., a MLC também já é muito utilizada. Algumas grandes obras, como a estação ferroviária de Estocolmo (Figura 2.14), na Suécia em 1920 ou a mais recente ponte Vihantasalmi, na Finlândia (ver Figura 2.3 atrás), são feitas em MLC. [7]



Figura 2. 14 - Stockholm railroad station, Sweden [14]

Um dos mais modernos hospitais da Europa, situados no Norte da Suécia (Sunderby Hospital), levou para a frente o uso de materiais amigos do ambiente e o cuidado com o meio ambiente. Os pilares em MLC foram escolhidos para preencher estes requisitos (Figura 2.15). [7]



Figura 2. 15 – Pilares em MLC – Sunderby Hospital, Suécia [15 e7]

Produção

As tábuas usadas para produzir a MLC são, em primeiro lugar, classificadas quanto à sua resistência (classificação visual) e quanto à sua rigidez (classificação mecânica).

Depois da classificação, pranchas da mesma classe são coladas topo a topo para produzir uma lamela comprida. As tábuas são normalmente unidas por ligações de entalhes múltiplos, designadas por *finger joints* na terminologia anglo-saxónica (Figura 2.16). A lâmina obtida é então justaposta juntamente com outras, para se

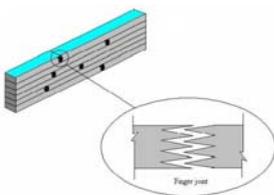


Figura 2. 16 - Finger joint numa peça de MLC [7]

obter a secção de MLC desejada. [7]

Características

A madeira lamelada colada apresenta características semelhantes às da madeira maciça. No entanto, a MLC tem valores maiores e mais constantes das propriedades mecânicas, já que é mais fácil controlar e remover quaisquer defeitos naturais presentes na madeira, como os nós, as fendas de secagem e a inclinação do fio, entre outros (Figura 2.17). [7]

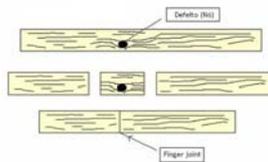


Figura 2. 17 - Remoção de defeitos da madeira numa lâmina. [7]

Assim, as propriedades deste produto são mais fiáveis e melhores do que as da madeira maciça. O valor característico da resistência, usado no dimensionamento de estruturas, é maior, assim como o valor médio (Figura 2.18). Isto significa que uma peça de madeira (com as mesmas dimensões), e feita com a mesma espécie de madeira, é capaz de suportar cargas mais elevadas do que a correspondente em madeira maciça; ou seja, para a mesma carga, é necessária menor quantidade de madeira, se for usada MLC.

As vigas de MLC ensaiadas à flexão rompem usualmente na face tracionada, por defeitos ou pelas ligações de entalhes múltiplos. [7]

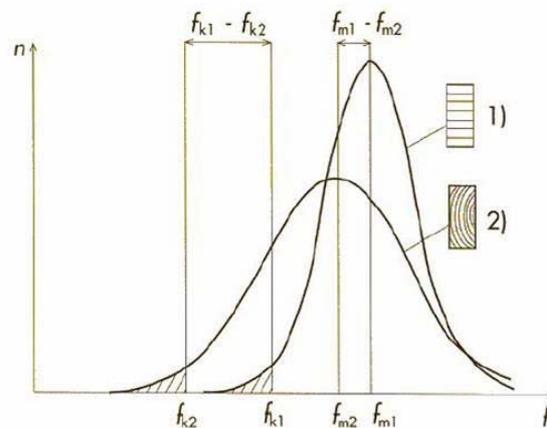


Figura 2. 18 - Comparação das características da madeira com a MLC. [7]

2.1.2 FRP: Polímeros Reforçados com Fibras

2.1.2.1 Introdução

As fibras são o componente resistente do material compósito. Geralmente, são caracterizadas pelo pequeníssimo diâmetro e pela alta relação comprimento/diâmetro. As fibras apresentam comportamentos tensão-extensão lineares, e roturas muito frágeis com pequenas extensões. As fibras podem ser

orgânicas, inorgânicas, sintéticas ou metálicas. [16]

Os materiais compósitos de reforço existem sob a forma de fibras contínuas ou fibras não contínuas (fibras cortadas ou filamentos). Os filamentos contínuos, como as fibras de vidro, carbono e aramida, são usados quase exclusivamente em estruturas. A matriz é usada para unir as fibras, protegê-las e transferir a carga entre as fibras através de esforços de corte. Uma característica comum em matrizes é a sua baixa densidade, que proporciona ao compósito uma ótima relação resistência/peso. As matrizes podem ser orgânicas, metálicas ou cerâmicas. Para os FRPs usados em soluções estruturais as matrizes são orgânicas e da subclasse termoendurecíveis. As mais conhecidas desta subclasse são o poliéster, o vinilester e as resinas epoxy. [16]

Os materiais FRP podem ser elaborados sob a forma de varões, lisos ou rugosos, fios ou cabos. A superfície pode ter várias texturas, entre elas: lisa, entrançada, rugosa, areada, ondulada, nervurada, etc.

Estes materiais podem ser feitos com fibras de aramida (AFRP), de carbono (CFRP) e de vidro (GFRP), e os valores indicativos das suas propriedades mecânicas são apresentadas no Quadro 2.2. [16]

Quadro 2.2 – Valores das propriedades mecânicas dos compósitos FRP [16].						
Tipo de FRP	Resistência à tracção [MPa]	Tensão de cedência [MPa]	Módulo de elasticidade [GPa]	Extensão na rotura (mm/mm)	Coefficiente de dilatação térmica [10 ⁻⁴ /C]	Densidade específica
GFRP	1379 - 1724	-	48 - 62	0.03 - 0.045	9,9	2,40
CFRP	1650 - 2610	-	152 - 165	0.01 - 0.015	0,0	1,55
AFRP	1200 - 2068	-	50 - 74	0.02 - 0.026	-1,0	1,25
Aço	1379 - 1862	1034 - 1396	186 - 200	>0.04	11,7	7,90

2.1.2.2 Fibras de vidro, de carbono e de aramida

Fibras de vidro

As fibras de vidro (GF) são o reforço mais usado dos compósitos e também o mais económico (Figura 2.19). Esta fibra resulta da mistura de areia, caulino, calcário e



Figura 2.19 – Tecido de fibra de vidro. [17]

colemanite. A variação da proporção de cada componente é o que determina os vários tipos de fibras de vidro (E, C, R, S e T). Cada uma tem aplicações diferentes e, conseqüentemente, propriedades diferentes.

Em estruturas são usadas apenas os tipos E e S. As fibras de vidro de tipo E são as normalmente usadas, já que têm boas propriedades mecânicas e um preço reduzido. As fibras tipo S apresentam uma resistência à tracção superior.

As fibras de vidro não são normalmente utilizadas para reforços com pré-esforço.

Fibras de carbono

As fibras de carbono, de todos os materiais FRP, são as que apresentam a maior resistência à tracção e o maior Módulo de Elasticidade. No entanto, são também as que apresentam uma deformação à rotura (de 1,2 a 2%) mais baixa.

Estão disponíveis em laminados, mantas e varões (Figura 2.20).

São obtidas por oxidação, carbonização e grafitização a altas temperaturas, a partir de materiais com alto teor de carbono, que são normalmente resinas, celulose ou poliácridonitrilo (PAN). Este último é mais utilizado, e é o que proporciona melhores propriedades mecânicas às fibras de carbono. Têm entre 5 a 15 μm de diâmetro.

Estas fibras são as mais dispendiosas de todas. No entanto, têm propriedades mecânicas muito melhores. O seu uso foi, por isso, restrito a áreas como a aeroespacial durante muito tempo, tendo sido estendido a outras aplicações nos últimos anos, como em material desportivo, devido ao abaixamento do seu custo.

O processo actual de produção de fibras de carbono conduz a propriedades mecânicas, térmicas, químicas, etc., muito melhores do que as das fibras de vidro.



Figura 2.20 - Tecido de fibra de carbono. [17]

Fibras de aramida

As fibras de aramida são um polímero orgânico (poliamida aromática), produzido por mistura e reacção de diaminas aromáticas e cloretos diácidos aromáticos. As fibras de aramida, de cor dourada brilhante, têm um diâmetro entre 12 e 15 μm (Figura 2.21). Podem citar-se dois importantes tipos de fibras de aramida: as fibras para-aramida e as meta-aramida. Têm elevada resistência à tracção, alto módulo de elasticidade e boa resistência ao impacto (muito usadas em aplicações balísticas). São fibras com muito boa resistência ao fogo, ao calor e aos químicos, não apresentam fadiga mas, no entanto, a rotura por fluência pode ser um ponto crítico, assim como a sensibilidade que apresentam à radiação ultravioleta. Um nome comercial muito utilizado para as fibras de aramida é “Kevlar” (Dupont). As fibras de aramida são normalmente produzidas em cabo.



Figura 2.21 - Tecido de fibra de aramida. [18]

O desenvolvimento de materiais compósitos, particularmente de polímeros reforçados com fibras (FRP), aumentou rapidamente nas últimas décadas, devido em primeiro lugar às necessidades da indústria aeroespacial, que substituiu os metais e ligas metálicas caras por materiais mais resistentes e mais ligeiros, e mais recentemente devido à aplicação de FRPs na indústria da construção e da sua decorrente investigação. Este interesse na tecnologia dos compósitos é um resultado do aumento da exigência, cada vez maior, imposta às infra-estruturas degradadas.

2.1.3 Ligação colada CFRP - Madeira

A resistência de uma ligação colada na madeira depende do mais fraco dos seguintes planos de rotura: interior da madeira (adesão), camada superficial da madeira, interface e interior do produto ligante. A rotura pelo interior da madeira é determinada pela resistência ao corte da madeira. Pela camada superficial da madeira, pode ter tido origem na danificação, e conseqüente fragilização desta, por ferramentas mal afiadas ou grosseiras. A resistência do produto ligante depende do tipo e da formulação do mesmo, da sua correcta aplicação e da temperatura. [19]

2.1.3.1 Aderência à madeira

Aderência entre duas superfícies pode definir-se como uma condição em estas são ligadas por forças na sua interface, que podem ser forças de valência, de acção mecânica ou ambas. As forças de valência são forças de atracção produzidas por interacção dos átomos, iões ou moléculas que existem no interior e à superfície, quer dos materiais a colar quer do elemento ligante. A acção mecânica, ou ligação mecânica, é a ligação entre as superfícies por uma cola que penetrou nos poros da superfície em estado líquido, e aí se agarrou e solidificou.

A ligação mecânica é provavelmente o mecanismo base, através do qual uma cola adere a superfícies porosas, como a madeira. Esta ligação acontece quando a cola penetra na madeira sã, numa profundidade de duas a seis células, para além dos detritos da superfície e das fibras danificadas. A penetração mais profunda na microestrutura aumenta a área de contacto entre a madeira e a cola produzindo-se uma ligação mecânica mais efectiva. Crê-se que as ligações mais duráveis à madeira se formam não só quando uma cola penetra profundamente nas cavidades celulares, mas também quando uma cola se difunde pelas paredes celulares para estabelecer ligações moleculares com a celulose da madeira.

Se uma cola penetra o suficiente em madeira sã e se torna rígida após a cura,

espera-se que a resistência da ligação seja maior do que a da madeira isolada [19]

A cola em estado líquido deve apresentar uma alta molhabilidade e uma viscosidade tal que permita uma boa fluência através dos capilares e uma exsudação do ar, da água e dos detritos até à superfície. Normalmente, para melhorar a molhabilidade é usada pressão, forçando a cola líquida a fluir, eliminando o ar armazenado e penetrando em madeira sã. [19]

2.1.3.2 Propriedades da superfície da madeira

Uma vez que o funcionamento das colas é baseado na ligação entre superfícies, as propriedades físicas e químicas das superfícies a ligar são extremamente importantes para um comportamento satisfatório da ligação.

As superfícies a ligar devem ser lisas, planas e sem qualquer tipo de marcas ou irregularidades. A superfície deve apresentar-se não carbonizada, sem exsudações de seiva, gorduras, poeiras e outras sujidades. [19]

O aquecimento e a secagem excessivos deterioram a condição física da superfície da madeira, por forçarem a difusão dos depósitos minerais até à superfície, por reorientarem as moléculas superficiais e por fecharem irreversivelmente os maiores microporos das paredes celulares.

A superfície da madeira pode ser quimicamente inerte, relativamente à adesão por contaminantes transportados pelo ar, extractivos hidrofóbicos e quimicamente activos da madeira, oxidação e pirólise de linhas de colagem por secagem excessiva, e ainda por impregnação com preservantes, com produtos retardadores da combustão e inibidores de chama ou outros químicos. Infelizmente, algumas destas condições da superfície da madeira são difíceis de analisar e detectar. A deterioração física e a contaminação química interferem com a fluência, com a quantidade de água necessária da cola e com a penetração desta, e podem interferir também com a cura da cola e com a resistência coesiva resultante. [19]

Superfícies de folheados

As propriedades da madeira cortada são essencialmente as mesmas das pranchas de madeira. No entanto, os processos de fabrico, que incluem o corte, a secagem e a laminação até chegar à lamela, podem alterar drasticamente as propriedades superficiais químicas e físicas das lamelas. São necessários conhecimentos e cuidados especializados para garantir uma boa molhagem, fluência e penetração da cola. [19]

Superfícies da madeira de materiais compósitos de outros materiais

As superfícies de produtos derivados da madeira geralmente têm pouca molhabilidade relativamente à da madeira acabada de cortar. As superfícies destes materiais têm uma aparência vidrada brilhante que indica que se tornaram inactivas por acção de altas pressões e temperaturas, o que as impede de absorver água e colas aquosas. Além disso, a resistência de ligações às superfícies destes produtos é limitada pela resistência a que as partículas superficiais foram coladas às interiores.

É expectável ainda uma ligação muito menos resistente a produtos constituídos por partículas do que a madeira natural.

A aderência a painéis compósitos que apresentem pouca molhabilidade pode ser melhorada por uma ligeira passagem com uma lixa. Não convém que seja excessiva pois nesse caso a superfície pode deixar de ser plana e gerar poeiras que dificultem a colagem. [19]

Se uma ligação de grande importância estrutural necessitasse de uma ligação colada da madeira a um elemento metálico ou plástico, então apenas as colas com base em epoxy, poliuretano e isocianeto, poderiam ser suficientemente compatíveis com o metal ou plástico. Mesmo assim, pode ser necessária preparação especial e limpeza para a remoção de químicos activos das superfícies. O tratamento químico da madeira com preservantes, ignífugos e estabilizadores dimensionais interfere com a capacidade de aderência desta. [19]

2.1.3.3 Propriedades físicas da madeira

Densidade e Porosidade

A aderência da madeira não é só afectada pelas propriedades da sua superfície, mas também pelas suas propriedades físicas, como a densidade, porosidade, teor em água e variações dimensionais.

A madeira sem o volume de vazios tem uma densidade aproximada de 1.5, independentemente da espécie de madeira. Mas a densidade varia muito entre as várias espécies de madeira, e mesmo entre madeiras da mesma espécie, porque de espécie para espécie varia o volume de vazios e a espessura das paredes celulares. Madeiras com alta densidade têm paredes celulares mais espessas e menores volumes de lúmen, enquanto que as de baixa densidade têm paredes celulares mais finas e volumes de lúmen maiores. A resistência da madeira está directamente

relacionada com a sua densidade, uma vez que paredes celulares espessas são capazes de suportar cargas mais altas do que outras de menor espessura. As células da madeira são uma parte integrante da região de interface madeira-resina e por isso, a ligação colada deverá ser no mínimo tão resistente como a madeira, no caso de se querer utilizar a capacidade adesiva máxima da madeira. [19]

A resistência das ligações coladas à madeira aumenta com a densidade desta, até valores da ordem de 0.7 a 0.8 (teor em água 12%). Acima destes valores, a resistência da ligação diminui. Dado que a resistência aumenta com a densidade da madeira, a rotura pela madeira decresce gradualmente até uma gama de densidades de 0.7 a 0.8, e decresce rapidamente para densidades acima de 0.8. À medida que a densidade da madeira aumenta, torna-se mais difícil e menos frequente conseguir ligações de alta resistência com rotura pela madeira. [19]

As madeiras de alta densidade são difíceis de colar por várias razões. As paredes celulares mais espessas e menor volume de lúmen não permitem que as resinas se infiltrem tão facilmente, e assim a tão importante interligação mecânica da resina limita-se à profundidade de uma ou duas células. É preciso uma pressão muito maior para comprimir madeira de alta densidade, duras e fortes, para que se verifique o contacto entre a madeira e a resina. As altas concentrações de depósitos minerais que podem interferir com a cura das resinas são comuns em espécies com densidades altas, em particular em carvalhos e madeiras duras tropicais. As tensões altas a que estão sujeitas as espécies de elevada densidade aquando das alterações dimensionais, devidas a alterações no teor em água, também contribuem fortemente para dificultar as colagens.

O volume de vazios da madeira, que se situa na gama dos 46 % a 80 % do volume total, tem um forte efeito na profundidade e na direcção para onde a resina reflui. Para atingir a máxima resistência da ligação, a resina tem de penetrar e interligar mecanicamente várias células em profundidade, na estrutura celular sã que não foi danificada. Na madeira, a porosidade varia consoante a orientação das fibras. É mais porosa em superfícies cortadas perpendicularmente às fibras, sendo várias vezes superior à porosidade das superfícies tangenciais e radiais. As resinas infiltram-se em profundidade em fibras cortadas e vasos ao longo das fibras, tão profundamente que ocorre excesso de penetração quando é aplicada pressão em superfícies perpendiculares às fibras. Esta é uma primeira explicação de como são difíceis de realizar linhas de colagem fortes, estruturais em ligações de topo. Ao longo das fibras, a porosidade é limitada pelas poucas passagens pelas quais a resina pode fluir. [19]

Teor em água e variações dimensionais

A água está presente naturalmente nas árvores vivas – como água livre, nas células do lúmen, e como água de impregnação, nos espaços entre as paredes das células. O teor em água total da madeira pode chegar a 200 %, mas quando a água livre se evapora, ainda se verifica um teor de aproximadamente 30 %, correspondente à água de impregnação. A água tem ligações moleculares fortes à madeira, principalmente pela ligação do hidrogénio aos grupos hidróxido das células celulósicas. Por isso, as paredes das células continuam saturadas até o teor em água do ar envolvente ser inferior ao das paredes das células. [19]

Quando as paredes das células se apresentam completamente saturadas de água de impregnação, sem contudo ocupar os espaços vazios intercelulares, diz-se que a madeira atingiu o ponto de saturação das fibras.

O teor em água no ponto de saturação (cerca de 30%) varia, dependendo da espécie da árvore, da temperatura e da pressão. Este é o ponto crítico em que a madeira começa a retrair.

Estas variações dimensionais diferem nas direcções dos três eixos principais, ou nas direcções das fibras da madeira, que são: longitudinal, radial e tangencial. [19]

As variações dimensionais devidas à alteração do teor em água têm consequências significativas no comportamento das ligações coladas. Uma vez que a madeira incha e retrai, desenvolve tensões internas que podem ser suficientemente grandes para provocar a rotura da ligação ou da madeira. A rotura pode surgir quando duas peças de madeira são coladas com orientação das fibras diferente e retracções diferentes (Figura 2.22) como, por exemplo, se se colarem fibras na direcção radial com fibras na direcção tangencial, ou na pior das hipóteses, se se colarem fibras na direcção longitudinal com fibras na direcção radial ou tangencial.



Figura 2. 22 – Peças de madeira descoladas devido a variações dimensionais.

Mesmo que o teor em água em peças adjacentes possa ser praticamente o mesmo, a sua alteração pode gerar tensões altas. Ainda mais, se o teor em água numa das peças estiver em equilíbrio com o ar e a outra peça, com uma orientação do fio diferente, estiver a retrair à medida que se aproxima desse mesmo equilíbrio. Nesse caso, as tensões resultantes seriam complexas e com certeza a rotura se daria, quer fosse pela ligação quer pela madeira. Algumas colas da madeira são suficientemente elásticas para absorver tensões, de modo a que não haja rotura. As colas estruturais têm um módulo de elasticidade maior do que o da madeira e podem transferir essas tensões de uma peça para outra sem qualquer dano. No entanto se estas tensões forem muito altas e provocadas por retracções diferenciais das peças de madeira, a rotura é inevitável.

As tensões elevadas nas ligações coladas podem ser minimizadas pela ligação de peças com a mesma orientação das fibras, com retractilidades semelhantes, preferencialmente baixas, e com teores em água equivalentes aos que as mesmas vão ter em serviço. [19]

Quando a madeira apresenta excesso de humidade, menor será a quantidade de água e de cola absorvida por ela. Este facto leva a uma instabilidade da cola, já que quando é aplicada pressão esta reflui completamente. O controlo do teor em água é especialmente importante na ligação colada a quente pois o excesso de humidade aumenta a instabilidade e favorece a penetração da cola. [19]

2.1.3.4 Colas

Composição

Os polímeros orgânicos de origem natural ou sintética são os ingredientes principais em todas as formulações de colas para madeira. Um polímero é uma molécula composta por outras mais simples, com um grupo funcional, e que se juntaram para formar uma molécula de maior massa molar. Os polissacarídeos e as proteínas são polímeros de massas molares elevadas produzidos pelas plantas e pelos animais.

Os polímeros sintéticos são formulados quimicamente em colas para desempenhar um sem número de funções ligantes. Seja a base do polímero termoplástica ou termoendurecível, tem sempre uma grande influência no comportamento da cola em serviço. [19]

Os polímeros termoendurecíveis são excelentes colas estruturais porque não se alteram quimicamente, nem quando sujeitos a temperaturas elevadas, e não

perdem a sua rigidez.

Fenólicas, resorcinólicas, melamina, isocianato, ureia e epoxy são exemplos de colas com base em polímeros termoendurecíveis.

A formulação das colas consiste na mistura de várias substâncias activas e inertes que podem variar em proporção com o polímero base, e assim alterar as características da cola consoante a sua aplicação, como o seu comportamento em serviço, a resistência, o tempo de armazenamento, ou a durabilidade. [19]

Saúde e segurança

As colas contêm químicos tóxicos para as pessoas se estas forem expostas a concentrações consideráveis durante períodos prolongados de tempo. Geralmente, aceita-se que as colas depois de curadas não apresentam problemas de toxicidade.

Os regulamentos de saúde e segurança exigem que os químicos tóxicos e corrosivos sejam identificados e enunciados, de uma forma bem visível, nos rótulos para alertar para os respectivos seus perigos. As fichas de segurança ou as instruções são fornecidas com os produtos para informar sobre os procedimentos de segurança, protecções necessárias, e procedimentos de primeiros socorros. O utilizador deve sempre consultar a ficha de segurança e seguir as instruções do fabricante antes de utilizar qualquer cola.

Resistência e durabilidade

O que determina a escolha de uma cola para uma determinada aplicação é a capacidade que esta tem de transferir carga de um elemento para outro e manter a integridade da ligação, quando sujeito às condições ambientais esperadas.

Na construção de edifícios, as colas que contribuem com resistência e rigidez durante toda a vida dos edifícios são consideradas estruturais. São geralmente mais resistentes e rígidas que os próprios elementos de madeira. As ligações estruturais são essenciais pois a sua falha pode resultar em graves danos para a estrutura, ou mesmo no seu colapso. São exemplos de aplicações de colas em estruturas as vigas de MLC e as vigas prefabricadas em I. [19]

As colas mais resistentes, mais rígidas e menos sujeitas à deterioração em serviço são, infelizmente, as menos tolerantes às variações da madeira, como as propriedades da sua superfície, o teor em água, e às condições de montagem como a pressão, temperatura e cura. As colas estruturais rígidas incluem o fenol, o resorcinol, a melamina, a ureia e a caseína. No quadro 2.3 é apresentada uma distribuição de colas estruturais consoante o ambiente da sua aplicação. [19]

As colas estruturais que mantêm as suas propriedades sob as piores condições cíclicas de saturação e secagem de água são consideradas colas de exterior. As

colas que perdem a sua capacidade de transferir carga mais rapidamente que a madeira à medida que as condições pioram, nomeadamente em relação à humidade, são consideradas colas de interior. Entre as colas de exterior e de interior, existem as intermédias que mantêm a resistência e rigidez em curtos períodos de excesso de humidade mas que se deterioram rapidamente quando sujeitas a longos períodos de exposição ao calor e humidade.

As colas menos resistentes, de menor rigidez e menos tolerantes aos agentes atmosféricos são as mais tolerantes às várias variações na superfície da madeira, à montagem e à cura. [19]

Quadro 2.3 – Colas estruturais para madeira distribuídas de acordo com o seu comportamento estrutural em serviço sob várias condições atmosféricas. [19]	
Ambiente em serviço	Tipo de cola
Exterior	Fenol-formaldeído
	Resorcinol-formaldeído
	Fenol-resorcinol-formaldeído
	Emulsão polímero-isocianato
	Melamina-formaldeído
Limitadamente exterior	Melamina-ureia-formaldeído
	Isocianato
	Epoxy
Interior	Ureia-formaldeído
	Caseína

2.2 Madeira e Madeira Lamelada Colada Reforçada com FRP.

2.2.1 Introdução

Os laminados feitos de polímeros reforçados com fibras (FRP) de alta resistência estão a ser usados cada vez mais para reforçar vigas de madeira lamelada colada (MLC), criando-se um novo material compósito significativamente mais forte e rígido do que as convencionais vigas de MLC não reforçada.

Estes materiais FRP são muito mais resistentes que a madeira e até que o aço, e são normalmente usados como reforço à tracção, num conceito semelhante aos varões de aço usados nas vidas de betão armado.

Além disso, os compósitos FRP-madeira conseguiram ultrapassar os problemas de compatibilidade que os compósitos madeira-aço tinham, e apresentam ainda uma menor variação na resistência à flexão. De um ponto de vista estrutural o material MLC-FRP tem numerosas vantagens em relação ao material convencional, ou seja, à madeira lamelada colada não reforçada [20].

Utilização de vigas de MLC reforçadas com FRP

As vigas de MLC reforçadas com FRP podem ser aplicadas em muitas soluções estruturais, tais como edifícios residenciais, comerciais, infraestruturas, e são especialmente indicadas para estruturas em que o peso próprio é uma fracção muito alta da carga de dimensionamento, tais como as pontes e as abóbadas. Outra capacidade em desenvolvimento da aplicação do reforço com FRP é a de aumentar ou devolver a capacidade resistente a estruturas sub-dimensionadas ou danificadas [20].

Melhor utilização de recursos

O fornecimento de madeira para lamelas de classe alta usadas no fabrico de MLC diminuiu significativamente nos últimos anos devido ao aumento de custo das mesmas.

Com o reforço com FRP utiliza-se cerca de 25 a 40 % menos madeira e madeira de classes inferiores, sendo considerável a poupança. Uma viga reforçada com FRP suporta as mesmas cargas, que uma não reforçada, com uma secção menor, com

menos recursos e com material de classe menos resistente. Efectivamente, a produtividade, o comportamento e a viabilidade desta solução é melhor.

O reforço de vigas de MLC com FRP tem potencial para promover o uso de materiais tradicionais através da melhoria do seu comportamento.

Vantagens

O reforço de madeira com FRPs tem as seguintes vantagens:

- Reduz os custos quando usado convenientemente;
- Repara e reabilita elementos de madeira estruturais danificados ou deteriorados;
- Aumenta a durabilidade e reduz as necessidades de manutenção de elementos e juntas de madeira.
- Aumenta a rigidez e resistência à flexão de elementos de madeira novos ou existentes. Em particular podem melhorar as propriedades mecânicas de madeira de classe baixa e/ou de madeiras de crescimento rápido.
- Permite a utilização de vigas com secções menores para se conseguir a mesma resistência e rigidez de vigas com secções maiores, não reforçadas;
- Melhora a ductilidade dos membros estruturais de madeira [21].

2.2.2 Reforço passivo com laminados FRP

Os projectos de investigação, que têm por objectivo verificar a possibilidade de reforçar vigas de madeira lamelada colada, com o intuito de aumentar as propriedades mecânicas, começaram a ser realizados há mais de 40 anos.

Inicialmente, eram usados materiais tradicionais de reforço, como o alumínio e o aço, sendo o objectivo o mesmo: aumentar as propriedades mecânicas da madeira para suportar maiores solicitações. No entanto, o decréscimo do preço das fibras tornou viável o uso de FRPs como reforço. Comparadas com o aço, a vantagem mais interessante é provavelmente a sua baixa densidade ($\rho_{\text{fibras de carbono}} = 0.25 \rho_{\text{aço}}$).

Existe, actualmente, a necessidade de aumentar, manter e melhorar as antigas estruturas de madeira existentes e permitir o uso deste nobre material em novas construções, quer como madeira maciça quer como lamelada colada.

Existem muitos e variados tipos de reforço, e cada um pode levar a comportamentos diferentes, por isso deve ser levada a cabo uma investigação para

a sua distinção de modo a evitar intervenções ineficazes.

O papel dos reforços de FRP, que apresentam propriedades mecânicas altas, é muitas vezes uniformizar zonas com defeitos, confinar roturas locais e impedir a abertura de fendas; além de aumentar as propriedades da madeira. Além disto, a aplicação de vigas de madeira ou lamelados colados reforçadas com FRP permite utilizar elementos de madeira de menor secção ou de classe de resistência inferior.

Deste modo, o reforço pode apresentar mais vantagens:

- Aumentar as propriedades mecânicas,
- Diminuir a secção dos elementos de madeira e conseqüentemente o seu peso,
- Usar madeira de classe de resistência inferior e claro
- Diminuir o custo total da estrutura se comparado com uma executada exclusivamente com material tradicional não reforçado.

Os efeitos esperados do reforço de vigas de MLC com FRP estão representados na figura 2.23 (estes resultados não foram confirmados experimentalmente). Comparando as características da madeira maciça, da MLC e da MLC reforçada, podemos dizer que a aplicação das fibras concede, relativamente às propriedades da MLC reforçada, menores variações e melhores propriedades mecânicas. A tensão de rotura aumenta, o que indica que será possível construir estruturas de MLC reforçada com FRP que aguentam cargas mais altas [7].

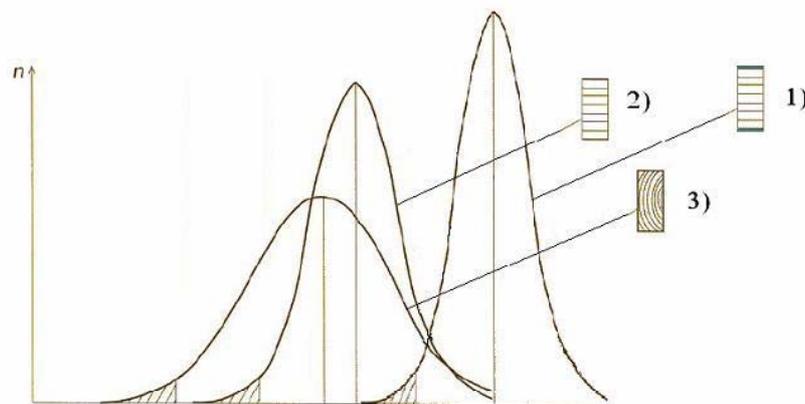


Figura 2. 23 - Características da madeira (3), da Madeira Lamelada Colada (2) e de Madeira Lamelada Colada reforçada com fibras FRP (1). [7]

2.2.2.1 Reforço à flexão

Nos ensaios à flexão das vigas de MLC, a rotura acontecia no lado traccionado por

zonas que apresentassem defeitos, nós ou juntas de lamelas. Por isto, estas vigas são quase sempre reforçadas no lado traccionado, com o objectivo de aumentar a resistência à tracção e alterar o modo de ruína para uma rotura por compressão, que é mais dúctil.

O reforço de um elemento de madeira com uma manta ou um laminado FRP consiste em ligar o sistema de reforço à madeira, através de colagem, para que este complemente a madeira na resistência a determinadas solicitações. A colagem pode ser efectuada na face traccionada da viga, ou ainda nas faces traccionada e comprimida (Figura 2.24a e 2.24c). É possível aplicar esta técnica a estruturas já existentes. Em alternativa, a manta ou o laminado podem ser intercalados entre as lamelas de uma viga de MLC, com a vantagem de, por um lado, resultar numa solução mais estética, já que deixa praticamente de ser visível o reforço, e por outro lado, porque a madeira protege o reforço e torna-se numa solução mais resistente à acção do fogo (Figura 2.24b). É ainda possível recorrer aos laminados para reforçar as vigas de madeira, realizando entalhes na madeira onde são colocadas finas tiras de FRP. Esta solução requer um trabalho de preparação minucioso e logo mais moroso, apresentando, no entanto, a vantagem de ser discreta e dar uma protecção adicional relativamente ao fogo (Figura 2.24e e 2.24f) [22].

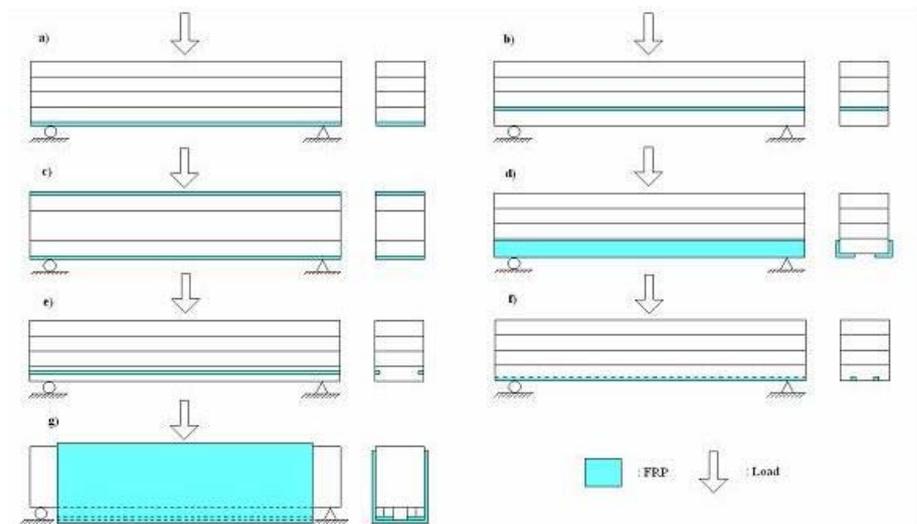


Figura 2. 24 - Soluções possíveis de reforço de vigas com FRP. [7]

Uma viga de madeira reforçada com fibras apresentará comportamentos diferentes em função da configuração escolhida para o reforço. No entanto, de um modo geral, os benefícios conseguidos são semelhantes.

A utilização de reforço FRP, cuja tensão última e o módulo de elasticidade são muito superiores aos da madeira, permite obter uma secção composta com uma resistência global significativamente superior à de um elemento não reforçado [22].

Modos de ruína

Essencial para a análise e dimensionamento de elementos reforçados com FRP é a distinção de todos os tipos possíveis de ruína, como se descreve a seguir:

- Rotura do FRP (Figura 2.25a)
- Rotura por compressão da madeira (Figura 2.25b)
- Rotura por corte da madeira na zona de ancoragem do FRP (Figura 2.25c);
- Descolamento da fibra originado por fendas inclinadas na madeira (Figura 2.25d); pode ter origem na abertura vertical e horizontal associada às fendas inclinadas (de esforço transversal)
- Descolamento na interface madeira-FRP devido a fendas de flexão (Figura 2.25e), ou nas áreas com superfície irregular, ou devido a uma colagem mal feita (Figura 2.25f) [20].

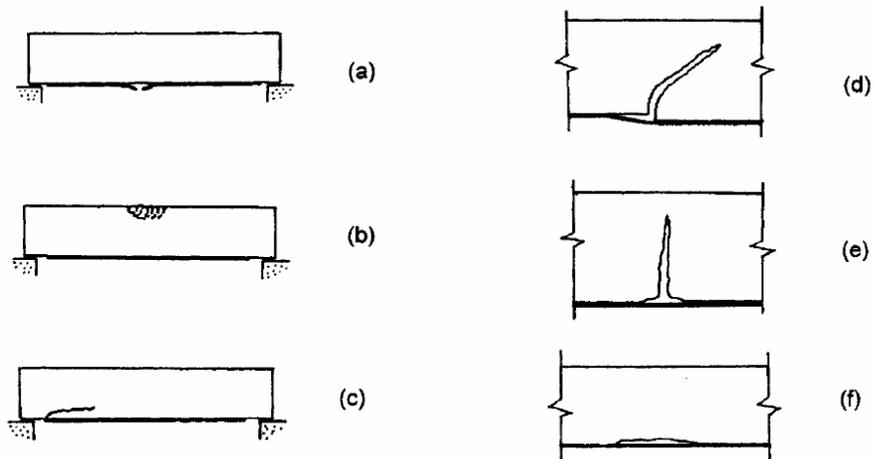


Figura 2. 25 - Modos de ruína em elementos reforçados à flexão com FRP [20].

O primeiro modo nomeado acima é o que tem menor probabilidade de acontecer. Uma vez que o laminado tem uma resistência altíssima comparativamente à madeira, a rotura esperada será sempre a do tipo b ou c, e só quando as percentagens de reforço são baixas numa secção é que poderá apresentar uma rotura do tipo a.

O segundo tipo de rotura acontece para percentagens de reforço elevadas, e o terceiro verifica-se quando ocorre rotura por delaminação. Este é o mecanismo mais crítico no dimensionamento de reforço com FRP.

Deve ser enfatizado que o óptimo dimensionamento do reforço com FRP acontece quando a rotura se dá pela rotura das fibras comprimidas seguida da rotura das fibras traccionadas, ficando a fibra FRP intacta.

2.2.2.2 Reforço ao corte

A madeira tem relativamente pouca resistência na direcção perpendicular às fibras. Como resultado, a resistência ao corte na direcção paralela às fibras pode ser crítica em alguns casos. O uso de FRP para o reforço da madeira ao corte tem vindo a ser investigado, sendo no entanto estes estudos de certo modo limitados, uma vez que a rotura ao corte é rara em vigas de madeira [7].

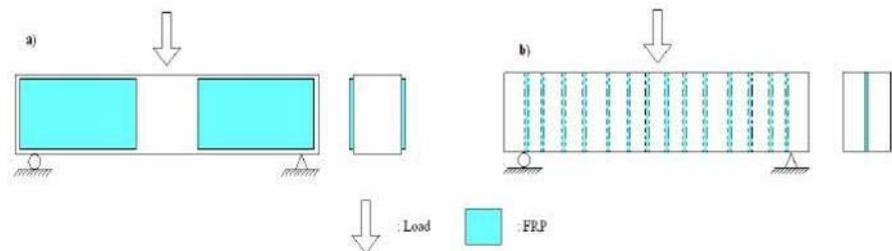


Figura 2. 26 - Diferentes modos de reforço investigados para o aumento da resistência ao corte da madeira [7].

Na Figura 2.26 estão representados vários tipos de reforço ao corte. As dimensões do reforço (comprimento, ângulo, espessura, etc.) não são quantitativas. A seta representa a carga aplicada.

No primeiro modo de rotura, a madeira ou MLC é reforçada com FRP onde a tensão de corte é mais alta, quando sujeita a esforços de flexão.

No primeiro modo, a viga de madeira é reforçada no interior com varões FRP desde a face traccionada até à face comprimida. O número de varões pode variar em espaçamento e espessura, assim como o seu posicionamento e a sua dimensão [7].

2.2.2.3 Reforço à flexão e ao corte

São apresentadas na Figura 2.27 diferentes maneiras para reforçar as propriedades mecânicas da madeira à flexão e ao corte. As dimensões do reforço FRP não são quantitativas [7].

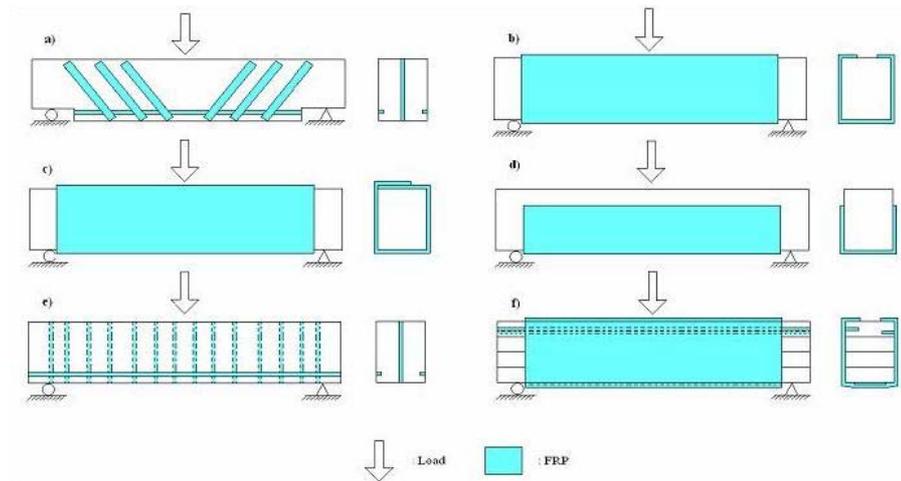


Figura 2. 27 - Diferentes maneiras de reforço da madeira à flexão e ao corte [7]

2.2.2.4 Síntese

As necessidades definem o tipo de reforço a empregar quando a madeira ou a MLC assim o exigem. Fibra de vidro, de carbono ou de aramida têm sido usadas em muitos estudos e têm sido obtidos bons resultados. Mostrou-se que é possível aumentar as propriedades à flexão, ao corte e a ambas simultaneamente, dependendo da configuração do reforço. Alguns produtos são concebidos para o reforço da viga in-situ, i.e. para aumentar as propriedades mecânicas de uma estrutura existente. Outros produtos fazem parte integrante da viga, originando um composto madeira-FRP ou MLC-FRP, com melhores propriedades mecânicas do que a madeira ou a MLC por si só [7].

2.2.3 Pré-esforço com laminados FRP

Como já referido, a capacidade resistente das vigas de madeira pode ser substancialmente aumentada com a adição de sistemas de FRP. Contudo, constata-se que só raramente a rotura de uma viga de madeira reforçada será devida à falha do sistema de FRP, o que sugere que ele não é convenientemente aproveitado. De facto, quando as fibras são apenas coladas sobre a madeira, a resistência do elemento reforçado continua a ser dependente da capacidade da madeira, sendo que o FRP é solicitado para níveis de tensão bastante inferiores às suas capacidades últimas.

Vários investigadores sugerem a aplicação de pré-esforço ao FRP com o fim de reduzir as deformações e riscos de rotura por tracção nas fibras de madeira mais solicitadas. De facto, ao ser aplicado pré-esforço na zona traccionada das vigas de MLC, geram-se tensões de compressão que irão contrabalançar parte das tensões,

de sinal contrário, desenvolvidas pelo carregamento externo.

As questões levantadas em torno desta solução são: o desenvolvimento do processo de aplicação do pré-esforço, a força de pré-esforço a aplicar, os benefícios em termos de resistência e rigidez conseguidos comparando com o reforço não pré-esforçado e finalmente as questões relacionadas com os efeitos diferidos a que ambos os materiais, madeira e FRP, são sensíveis.

Alguns estudos levados a cabo em vigas de madeira maciça ou de MLC revelaram que o comportamento das vigas de madeira reforçada com FRP pré-esforçado é muito semelhante ao de vigas reforçadas não pré-esforçadas. De facto, constatou-se um aumento da resistência e uma redução da variabilidade das cargas de rotura das vigas quando comparadas com vigas de madeira não reforçada, mas não foram assinalados aumentos significativos das performances das vigas por aplicação do pré-esforço, no que se refere à resistência e à rigidez, quando comparadas com vigas reforçadas não pré-esforçadas.

Na realidade, o benefício conseguido pelo pré-esforço resumiu-se à redução das deformações devidas às acções permanentes, o que poderá ser relevante em determinadas circunstâncias.

O processo de introdução do pré-esforço nas vigas reforçadas comparado com as vigas reforçadas não pré-esforçadas é, de um modo geral, mais complexo requerendo um tempo de execução superior, um controlo de produção mais apertado e uma linha de produção adaptada para o efeito. Conclui-se que a aplicação de pré-esforço, pelo menos para os níveis de força de pré-esforço usados, não é compensatória [22].

2.2.3.1 Reforço à flexão

Geralmente, só uma pequena parte da resistência dos laminados FRP é aproveitada em aplicações de reforço sem pré-esforço. A indução de um pré-esforço ao laminado faz com que estes sejam usados com um melhor aproveitamento, utilizando uma parcela maior da sua resistência.

Os laminados FRP pré-esforçados, quando aplicados na face traccionada de uma viga, podem melhorar o comportamento em serviço e garantir um controlo excelente de fendilhação, já que fecham completamente as fendas existentes e retardam a formação de novas fendas.

Podem ainda aumentar a resistência à rotura por evitar modos de rotura prematuros.

Existem várias técnicas que permitem induzir pré-esforço aos laminados no reforço à flexão, e estas geralmente são divididas em três categorias que incluem o pré-

esforço por inposição de uma contra-flecha, o pré-esforço por pós-tensão e o pré-esforço por pré-tensão [23].

Sistema de Imposição de Contraflecha

No sistema de imposição de uma contraflecha, ilustrado na Figura 2.28, os laminados FRP são indirectamente pré-esforçados por imposição de uma flecha contrária ao carregamento. São colocados macacos hidráulicos a meio vão, mantendo a viga deformada, e cola-se o laminado à face inferior da viga, retirando os macacos após a cura completa da cola. Só determinado nível de pré-esforço é induzido aos laminados depois da remoção dos macacos hidráulicos [23].

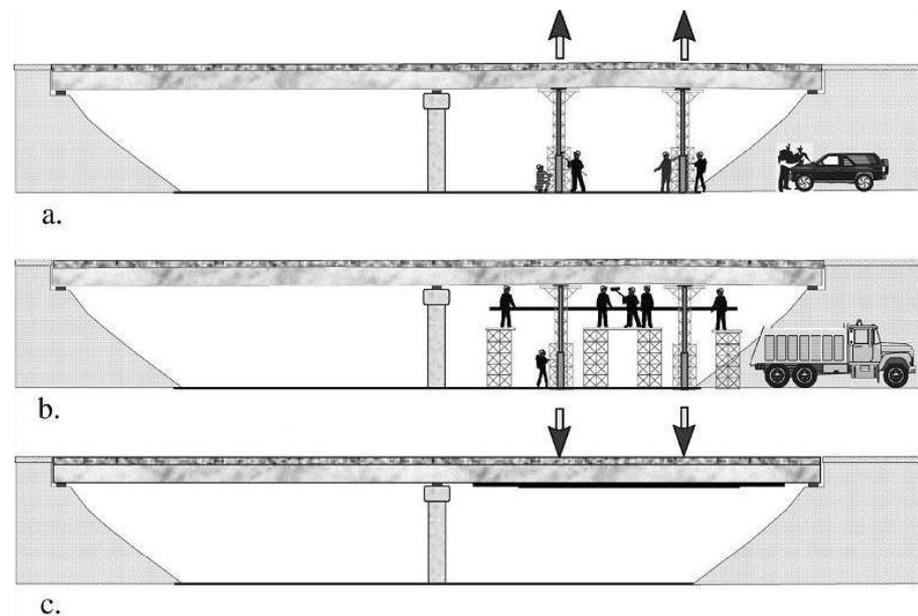


Figura 2. 28 - Exemplo de aplicação do sistema de pré-esforço por indução de uma contraflecha. a) aplicação de uma força vertical de baixo para cima, através de macacos hidráulicos. b) Posicionamento e colagem dos laminados. c) Remoção dos macacos hidráulicos [23].

Este método tem um aproveitamento pouco eficiente do material e pode danificar e provocar a cedência da viga. Num caso prático, o esforço a meio vão requerido para encurvar a estrutura é alto relativamente ao baixo pré-esforço induzido no laminado FRP [23].

A essência desta técnica é a de que a viga de madeira é deformada antes da colagem do laminado FRP e esta deformação é feita com escoras posicionadas a meio vão (Figura 2.28a). O pré-esforço é assim bastante simples *in-situ* e resolve o problema da delaminação, já que o diagrama de momentos introduzido na viga tem forma triangular e o esforço de corte na linha de cola é constante e não muito alto. A tensão imposta ao laminado não é constante ao longo do comprimento e está

relacionada com a força imposta pelas escoras, que é por sua vez limitada pela resistência à flexão da viga de madeira e pela possibilidade de manter os apoios nas suas posições iniciais. A literatura disponível sobre esta técnica é muito escassa, mas assume-se que esta é usada na prática sem se considerar o efeito do pré-esforço [23].

Sistema de Pré-tensão

Uma segunda técnica, ilustrada na Figura 2.29, para induzir pré-esforço ao laminado passa por traccionar o laminado por um equipamento independente da estrutura, sendo depois colado sob tensão. Uma vez traccionado, a face inferior da viga e a face superior do laminado são coladas com cola epoxídica. Após a cura da cola, o equipamento de pré-esforço é removido, e o esforço é transmitido à viga gradualmente até que os topos amarrados do laminado são cortados. Este método é particularmente adequado para pequenas vigas testadas em laboratório, no entanto, é necessário equipamento especializado para vigas de grande dimensão ou aplicação em obra [23].

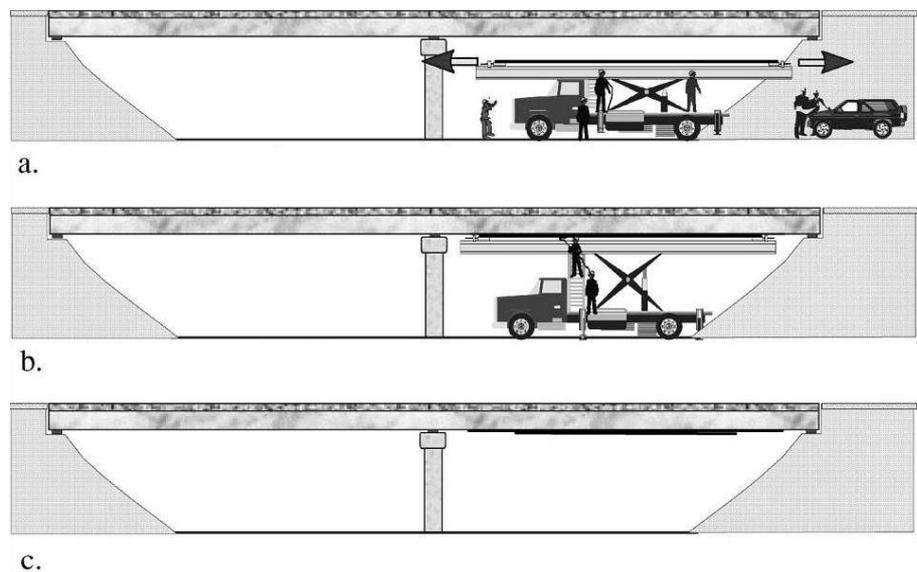


Figura 2. 29 - Aplicação de pré-esforço ao laminado por um equipamento independente à viga. a) Amarração e tração do laminado no aparelho de pré-esforço. b) Colagem do laminado traccionado. Cura da cola epoxídica. c) Corte do laminado nas ancoragens e transferência do esforço ao composto. [23]

Sistema de pós-tensão

O terceiro método referido na literatura está representado na Figura 2.30. No geral, o sistema consiste em ancorar as fibras numa extremidade da peça a reforçar, sendo depois traccionadas na outra extremidade e coladas [23].

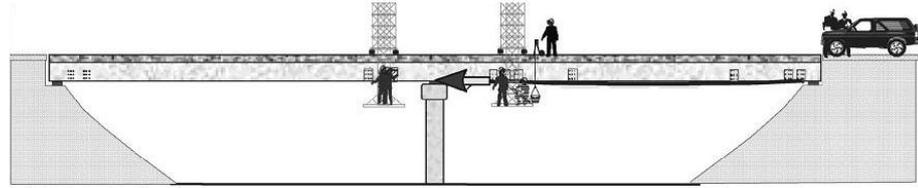


Figura 2. 30 – Aplicação de pré-esforço ao FRP pelo sistema de pós-tensão. Realização de uma ancoragem e aplicação de tensão ao laminado. [23]

Comparação dos diferentes sistemas de pré-esforço

Foram propostas três técnicas para o reforço com laminados FRP. O procedimento recomendado para a aplicação em obra está ilustrado nas Figuras 2.28 a 2.30. As diferenças entre as referidas técnicas estão resumidas no Quadro 2.4. Cada método tem as suas vantagens e desvantagens. Quando o laminado é pré ou pós-tensionado, é verdadeiramente obtido um nível de eficácia de pré-esforço, no entanto a possibilidade de ocorrer rotura por delaminação é maior. As vantagens de pós-traccionar são apenas o facto de ser necessário equipamento ligeiro para a sua realização e poder ser aplicada na maior parte das situações, incluindo locais onde o acesso à estrutura a reforçar é limitado. A vantagem da técnica de pré-tensão é que as amarrações para a indução do esforço são independentes da viga a reforçar e por isso a economiza-se mão-de-obra. Esta economia é limitada se for aplicado pré-esforço transversal para o confinamento do betão na zona de ancoragem das fibras. Qualquer um dos métodos, no entanto, requer mais mão-de-obra do que a aplicação de laminados não pré-esforçados, e por isso, os benefícios associados ao pré-esforço têm de ser pesados com os custos adicionais [23].

Quadro 2.4 – Características dos sistemas de pré-esforço com FRP para aplicação in situ [23]			
Características	Sistema de Imposição de Contraflecha	Sistema de pré-tensão	Sistema de pós-tensão
Equipamento especializado	Macacos hidráulicos de grande dimensão	Veículo do sistema de reforço	Pouco equipamento especializado
Flexibilidade	Pode ser aplicado a vigas de qualquer comprimento	Limitado pelo comprimento do sistema de reforço	Pode ser aplicado a vigas de qualquer comprimento
Acessibilidade	Requer espaço para os macacos.	Requer acesso ao mecanismo externo e ao veículo.	Requer acesso a equipamento ligeiro. É exequível pela parte superior.
Nível de pré-esforço	Baixo	Alto, dependendo da ancoragem. Pode ser controlado.	
Quantidade de reforço	Usados mais materiais do que nos outros sistemas	O reforço pode ser usado com eficiência	
Ancoragem	Nenhuma	Pré-esforço lateral	Parte intrínseca do sistema
Trabalhos in situ	Moderados	Moderados, altos se for usado pré-esforço lateral	

2.2.3.2 Ancoragem dos laminados FRP e o problema da delaminação

A aceitação de laminados FRP pré-esforçados em aplicações na prática tem sido dificultada principalmente pela falta de um sistema de ancoragem adequado.

Deve ter-se em atenção algumas considerações na ancoragem, tal como a eficiência, os efeitos no material FRP e a resistência à corrosão. Uma ancoragem bem concebida é a que consegue segurar um laminado na sua máxima resistência de tal maneira que a força de tracção verificada no laminado não é significativamente reduzida pelos efeitos da ancoragem. Até à data, cada tipo de reforço FRP existente no mercado tem características únicas e não existe um sistema de ancoragem, que assegure um comportamento eficiente, para todos eles [16].

Delaminação

As vigas de MLC, carregadas à flexão, apresentam uma alta resistência. Teoricamente, deveria ser possível aplicar forças de pré-esforço muito elevadas em secções relativamente pequenas. Porém, na prática, só pode ser aplicada uma pequena força de pré-esforço, porque existe o perigo de ocorrer delaminação. Este fenómeno é causado pela transmissão da força das fibras à madeira, e o facto de as



Figura 2. 31 – Delaminação: a fibra pré-esforçada é separada da viga de betão [25]



Figura 2. 32 – Aparelho de aplicação de pré-esforço, desenvolvido pelo EMPA, através da técnica de ancoragem gradual [25].



Figura 2. 33 – Detalhe do aparelho durante o processo de pré-esforço de uma viga de madeira [25].

vigas serem mais frágeis nos topos, na zona de amarração das fibras, faz com seja aí que ela ocorra.

O laminado colado transmite uma força de compressão à viga, que é ancorada num comprimento limitado nos topos da viga. Esta força concentrada no topo da viga vai originar tensões altas na direcção perpendicular às fibras, onde a resistência da madeira é baixa. Como se pode ver na Figura 2.31, o perigo de delaminação ao longo da linha de colagem é algo bem conhecido quando as vigas de betão são reforçadas do mesmo modo [24].

Técnica de ancoragem gradual

Na Suíça, o EMPA (Materials Science and Technology) desenvolveu um dispositivo especial de pré-esforço, o sistema de ancoragem gradual, para aplicar a força de pré-esforço por etapas. A dificuldade em aplicar uma força de pré-esforço elevada nas extremidades frágeis da fibra é resolvida facilmente enrolando o laminado em duas roldanas com superfície rugosa (Figuras 2.32 e 2.33) [24].

O próximo passo é ligar o laminado pré-esforçado à viga. Como já foi referido anteriormente, quando se usam métodos tradicionais para a colagem, a indução de esforços elevados pode levar à rotura por delaminação. Este aparelho, controlado electronicamente resolve o problema da delaminação do seguinte modo: numa primeira fase de colagem, as secções a meio vão da viga e do laminado são coladas a quente com resina epoxy. A força de pré-esforço é então ligeiramente reduzida e é colada mais uma porção de laminado à viga. Assim, a força de pré-esforço terá uma ancoragem ao longo de um determinado comprimento da viga. Verifica-se que o esforço transversal entre a viga e o laminado é atenuado num comprimento de 500mm nos topos da viga: na zona do meio vão da viga, a deformação – e consequentemente os esforços – no laminado, mantém-se constantes [25].

Esta transferência ocorre gradualmente, começando em zero nos topos do elemento e aumentando gradualmente durante o comprimento de amarração até atingir um valor do pré-esforço efectivamente desejado, e a partir daí mantendo-se constante.

2.2.3.3 Deformação e Ductilidade

O reforço com FRP é caracterizado por comportamento linear elástico à rotura sem patamar de cedência, como acontece com o reforço com aço. Devido a esta diferença fundamental, a definição tradicional de ductilidade, com base na

capacidade do elemento se deformar e plastificar, não pode ser usada. O conceito de ductilidade (com base na deformação de cedência) de um elemento reforçado com FRP é o de uma ductilidade pobre, quer a nível do elemento no seu todo quer a nível da secção.

Para elementos reforçados com FRP é essencial que se tenha consciência que grandes deformações até à rotura não correspondem necessariamente a uma ductilidade desejada.

A parte plástica da deformação é uma característica essencial da ductilidade e deveria, de algum modo, mostrar a capacidade de absorção de energia da deformação plástica. É, portanto, evidente que se deve atribuir uma nova definição de ductilidade aos elementos reforçados com FRP.

Muitas definições já foram propostas no sentido de quantificar a deformação ou ductilidade de vigas reforçadas com FRP. Uma delas declara a deformabilidade como a razão entre a deformação na rotura e a deformação da carga última, para uma secção não fendilhada.

A ductilidade de elementos pré-esforçados com FRP pode ser melhorada de múltiplas formas: pré-esforço parcial, cintagem do reforço com estribos, várias camadas de reforço, ou cabos de reforço não pré-esforçados.

Conceptualmente, a última configuração, com cabos FRP não pré-esforçados, é muito interessante, já que as suas tensões não iriam atingir o estado limite último aquando da rotura.

Por outro lado, o uso de cabos FRP não tensionados requer ancoragens perfeitas que aguentem cargas elevadas e que não sejam susceptíveis a vandalismo. Até à data, essas ancoragens não estão disponíveis no mercado. Outro meio de melhorar a ductilidade de vigas pré-esforçadas com FRP passa pelo uso de um varão FRP híbrido dúctil [16].

2.2.3.4 Exemplos de aplicação - Casos de estudo

A aplicação de FRPs para reforço de estruturas tem crescido desde os meados dos anos 80. Mais de 50 estruturas compósitas com FRP foram construídas por todo o mundo, sendo a maior parte pontes pedonais ou viárias em acessos privados. Muitas destas estruturas foram construídas como projectos de demonstração para acreditar esta tecnologia, como experiência e para estudar o comportamento e a durabilidade a longo prazo [16].

A primeira ponte pré-esforçada com CFRP foi inaugurada no Japão, em 1988, enquanto que no Canadá, a Beddington Trail Bridge é a primeira ponte rodoviária do

mundo com recurso a reforço CFRP e a tecnologia de monitorização em fibra óptica, construída em 1993. A primeira ponte experimental nos Estados Unidos, com cabos CFRP e GFRP, foi construída em Rapid City, South Dakota, em 1992. O uso de reforço AFRP pré-esforçado em estruturas de betão tem sido predominante no Japão desde 1990. Claramente, será muito difícil enumerar todos os projectos realizados com recurso ao reforço com FRP.

Várias pontes rodoviárias construídas estão preparadas, desde a sua concepção, para serem reforçadas enquanto a experiência com os FRP aumenta. Nestas estruturas, os projectistas seguiram uma série de guias para evitar um possível colapso, no caso do FRP falhar. O projectista pode munir a estrutura de:

- Ductos feitos para futuros cabos de pré-esforço adicionais ou instalação para aplicar pré-esforço pós-tensionado.
- Reforço suplementar com capacidade para suportar um carregamento tipo catenária estático e
- Uma concepção que permita uma redistribuição alternativa das cargas, que evite o colapso da estrutura [16].

2.2.4 Conclusão - Notas finais

Os laminados FRP não pré-esforçados foram intensivamente investigados, aplicados numa série de estruturas existentes, e foram motivo de elaboração de normas e regulamentos. Quando estes laminados são ligados à face traccionada de um elemento à flexão, a resistência deste aumenta e a deformação diminui, embora só possam suportar as sobrecargas adicionais aplicadas à estrutura e não as cargas permanentes. Os laminados pré-esforçados FRP podem suportar tanto uma parte das cargas permanentes como as sobrecargas adicionais a que a estrutura está sujeita. O nível de serviço das vigas e lajes de betão reforçadas com laminados FRP é melhorado quando o laminado é pré-esforçado. As vigas reforçadas com laminados FRP pré-esforçados são mais resistentes, e a tensão de cedência é maior relativamente a elementos reforçados sem pré-esforço. É necessário um especial cuidado para as zonas de amarração do laminado de modo a evitar o problema da delaminação.

O reforço com laminados pré-esforçados FRP é muito interessante, já que combina a vantagem de ser um material leve e não corrosivo, com a alta eficiência que o pré-esforço exterior proporciona [23].

CAPÍTULO 3 - ENSAIO DE PROVETES PEQUENOS

3.1 Introdução

A técnica de reforço que se propõe baseia-se essencialmente na colagem de laminados de fibras de carbono contra a face inferior de vigas de madeira quando a estas é imposta uma flecha contrária ao carregamento.

Este modo de colagem dos laminados origina um estado de pré-esforço que pode produzir uma contraflecha que reduz a deformação em serviço, a qual é, com frequência, condicionante no dimensionamento de estruturas de madeira.

Comparativamente com as técnicas de pré-esforço convencionais, a que se propõe no presente trabalho é de mais simples execução *in situ*, uma vez que exige menor quantidade de mão-de-obra e é uma solução mais ligeira, pelo que se julga ser uma alternativa técnica viável.

O programa experimental foi dividido em duas fases. A primeira incidiu sobre o estudo da aderência entre a madeira e o laminado, tendo sido ensaiadas várias séries de provetes pequenos, produzidos sob distintas condições termo-higrométricas ou com diferentes agentes de ligação. A segunda fase teve como objecto de investigação o comportamento de elementos de dimensão estrutural, previamente reforçados segundo a técnica mencionada ou, alternativamente, simplesmente reabilitados com o laminado após a rotura das vigas simples. Com estes ensaios pretendeu-se avaliar a eficiência da técnica de reforço, proposta no âmbito do presente trabalho, quando estes elementos são submetidos à flexão.

Os ensaios com provetes pequenos destinavam-se a avaliar a resistência ao corte na interface, para um melhor conhecimento do comportamento do material compósito madeira-laminado e do modo de rotura da ligação, quando sujeito a condições diferentes.

Os procedimentos relativos à preparação e realização dos ensaios desenvolvidos em provetes pequenos são descritos neste capítulo.

3.2 Materiais



Figura 3.1 – Lamelas usadas para a execução dos provetes pequenos.

Na programação da parte experimental, estabeleceu-se usar o mesmo tipo de material para todos os ensaios realizados, reduzindo assim essa variável.

Foram usadas lamelas soltas (Figura 3.1), de madeira lamelada colada, para a execução dos provetes pequenos. Estas lamelas estiveram armazenadas num ambiente condicionado, com uma humidade relativa de $65\pm 5\%$ e uma temperatura de $20\pm 2^\circ\text{C}$.

As lamelas, antes de constituírem uma peça de madeira lamelada colada, são madeira maciça. Uma vez que o programa experimental chave deste trabalho foi feito com vigas de MLC e as lamelas usadas eram a matéria prima das mesmas, considerou-se que seria mais apropriado, para os cálculos dos provetes pequenos, utilizar os valores das propriedades mecânicas da MLC. Assim seria mais fácil estabelecer comparações entre os resultados obtidos da primeira e da segunda fase de ensaios.

A madeira lamelada colada utilizada, proveniente da empresa Flexilam, era designada comercialmente por GL24h, apresentando-se as suas propriedades mecânicas no Quadro 3.1. Uma viga GL24h apresenta uma resistência característica de 24 MPa e é homogénea ao longo da altura porque, na sua secção transversal, todas as lamelas pertencem à mesma classe (de resistência) e à mesma espécie (ou combinação de espécies). [26]

Neste caso, as vigas eram feitas com madeira de espruce europeu (spruce – whitewood), da espécie *Picea Abies*, oriunda da Finlândia.

Importa referir que este material, embora classificado com esta graduação, podia apresentar propriedades mecânicas superiores, porque a empresa fornecedora pode ter atendido o pedido do material com uma visão mais comercial, em que o material tem de apresentar, no mínimo, as propriedades requeridas.

Quadro 3.1 – Valores característicos das propriedades mecânicas			
Glulam homogéneo – GL24h [26]			
Resistência característica à flexão [N/mm ²]		$f_{m,g,k}$	24
Resistência característica à tracção [N/mm ²]	Paralela ao fio	$f_{t,0,g,k}$	16,5
	Perpendicular ao fio	$f_{t,90,g,k}$	0,4
Resistência característica à compressão [N/mm ²]	Paralela ao fio	$f_{c,0,g,k}$	24
	Perpendicular ao fio	$f_{c,90,g,k}$	2,7
Resistência característica ao corte [N/mm ²]		$f_{v,g,k}$	2,7
Módulo de elasticidade [N/mm ²]	Paralelo médio	$E_{0,g,mean}$	11600
	Paralelo característico	$E_{0,g,05}$	9400
	Perpendicular médio	$E_{90,g,mean}$	390
Módulo de distorção [N/mm ²]		$G_{g,mean}$	720
Densidade [N/mm ³]		$\rho_{g,k}$	380
Coefficiente parcial de segurança		$\gamma_{e,M}$	1.25

O reforço baseou-se num sistema da Sika AG, indicado para estruturas, composto por um laminado compósito de fibras de carbono (CFRP), de designação comercial Sika® CarboDur, e pela resina epoxidica para a colagem, indicada pelo fabricante e designada comercialmente por Sikadur® 30 (Figura 3.2).

As propriedades mecânicas e dimensionais dos laminados utilizados são apresentadas no Quadro 3.2.



Figura 3. 2 - Componentes do sistema de reforço estrutural da empresa Sika: A resina epoxidica Sikadur® 30 e o laminado CFRP Sika® CarboDur.

Quadro 3.2 – Valores das propriedades mecânicas e dimensionais do laminado [27]							
Sistemas de CFRP		Dimensões			Principais Propriedades		
Tipo	Materiais	Largura mm	Espessura mm	Secção transversal mm ²	Resistência à tracção (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)	Extensão na rotura (%)
Sika® CarboDur S614	Resina	-	-	-	Rotura pelo suporte	12 800	-
	Laminado	60	1,4	84	$f_{g,k} > 2.800$ $f_{g,m} = 3.100$	165 000	> 1,7
Sika® CarboDur S914	Resina	-	-	-	Rotura pelo suporte	12 800	-
	Resina	90	1,4	126	$f_{g,k} > 2.800$ $f_{g,m} = 3.100$	165 000	> 1,7

3.3 Configuração dos provetes

Como primeiro passo de uma investigação experimental, realizaram-se ensaios de aderência para caracterizar a ligação colada madeira-laminado CFRP e esta caracterização da ligação foi feita por intermédio de provetes pequenos ensaiados à tracção. Ou seja, embora os provetes tivessem sido sujeitos à tracção, a ligação entre os materiais (que era o objecto de estudo) esteve sujeita a esforços de corte, permitindo uma melhor análise do comportamento entre estes dois materiais. O tipo de provete utilizado nos ensaios de caracterização da ligação colada está representado na Figura 3.3.



Figura 3.3 – Provetes pequeno.

As extremidades do provete eram as respectivas zonas onde o provete foi amarrado pela prensa, para ser traccionado. As dimensões destas partes foram determinadas facilmente, uma vez que estavam condicionadas pela abertura das garras da prensa. Assim, o comprimento que ficou dentro das garras da prensa foi de 8 cm e a espessura 1,5 cm. A largura, que já tinha sido determinada, foi de 4,5 cm, o correspondente à espessura de uma lamela.

A parte central do provete seria determinada pelo comprimento de amarração que se quisesse ensaiar. O corte de todas as peças de madeira e para os diversos tipos de provetes foi feito de modo a que a direcção do fio da madeira fosse paralelo à direcção da tracção aplicada no mesmo.

Este provete foi o resultado final de uma evolução de outros provetes, que foram testados e não se mostraram eficazes.

Inicialmente ensaiaram-se dois provetes, como protótipos, para testar a viabilidade e para identificar eventuais dificuldades. Apresentavam uma morfologia simétrica e, por isso, sem influência de excentricidades (Figura 3.4).



Figura 3. 4 – Primeiro protótipo do provete.

Primeiramente cortaram-se as dimensões principais dos elementos de madeira e da fibra de carbono, seguindo-se a abertura do rasgo nas peças de madeira, o espalhamento da resina epoxidica e finalmente a montagem do provete.

No entanto verificou-se, na execução deste provete, que era difícil obter-se uma ranhura central e recta nas peças de madeira. O corte foi feito com uma serra de fita e esta, durante o corte, facilmente bambeava, originando esses defeitos.

Além disso, a fita utilizada apresentava uma espessura reduzida e, por esta razão, os cortes obtidos tinham espessura insuficiente para inserir o laminado, pelo que era necessária uma abrasão da abertura, que era feita por várias passagens na serra, destruindo a superfície da madeira (Figura 3.5).

Como seria de esperar, não se conseguiu o espalhamento uniforme da cola, que foi dificultado pela inacessibilidade das superfícies da madeira e pela viscosidade, e consequentemente a rotura observada mostrava evidências da falta de cola nalgumas zonas. O resultado do ensaio, destinado a caracterizar a aderência, foi influenciado pela compressão que a estreita abertura causava ao laminado, ficando este imediatamente “preso” quando era colocado e quando a resina ainda se apresentava no seu período de tempo aberto.

Por tudo isto, decidiu-se reformular a morfologia do provete de uma forma que contornasse estes problemas. Ensaaiaram-se provetes com o formato esquematizado na Figura 3.6, cuja diferença do modelo anterior foi a de tornar a superfície da madeira acessível, com a contrapartida de o tornar não simétrico. Esta opção foi tomada porque se ponderou que essa falta de simetria, devido às dimensões do



Figura 3. 5 – Corte irregular na execução do primeiro provete.

proвете, não gerava tensões significativas que pudessem alterar os resultados.



Figura 3.6 – Segundo protótipo do provete.



Figura 3.7 – Excentricidades observadas no provete antes do ensaio.

Este provete mostrou-se de muito mais fácil execução, e não se verificaram os problemas do anterior. Verificaram-se, sim, outros problemas novos. No ensaio destes segundos provetes, e devido à falta de precisão da serra, observaram-se diferenças nas peças de madeira, quer de espessura quer de direcção, que geraram excentricidades na colocação do provete na máquina de ensaio, antes da realização do ensaio. Estas excentricidades originaram a flexão do laminado, causando tracções perpendiculares ao plano de colagem (Figura 3.7). Estas resultaram na fragilização dessa zona, pois em alguns provetes a fibra chegou a descolar parcialmente e conseqüentemente os resultados não foram considerados válidos.



Figura 3.8 – Pares de peças de madeira para execução dos provetes.

Decidiu-se reformular novamente o provete. O novo provete, face ao acontecido anteriormente, foi feito com duas peças provenientes de troços consecutivos da madeira original, para eliminar quaisquer diferenças entre elas na colagem do laminado. Depois de cortadas, estas peças foram marcadas com o número do provete e a respectiva indicação direita-esquerda, para se conhecer posteriormente o modo de as justapor de modo a ter continuidade (Figura 3.8).

A estas foram coladas mais duas peças de madeira que perfaziam a espessura necessária do provete na zona da garra e minimizavam a influência da excentricidade, tal como no provete anterior.

Este provete apresentou uma maior distância entre peças de madeira, para que a influência dos defeitos dimensionais (torção, tracção) pudesse ser minimizada pela flexibilidade do laminado, não danificando a linha de cola.

Este foi eleito o provete tipo (Figura 3.9).

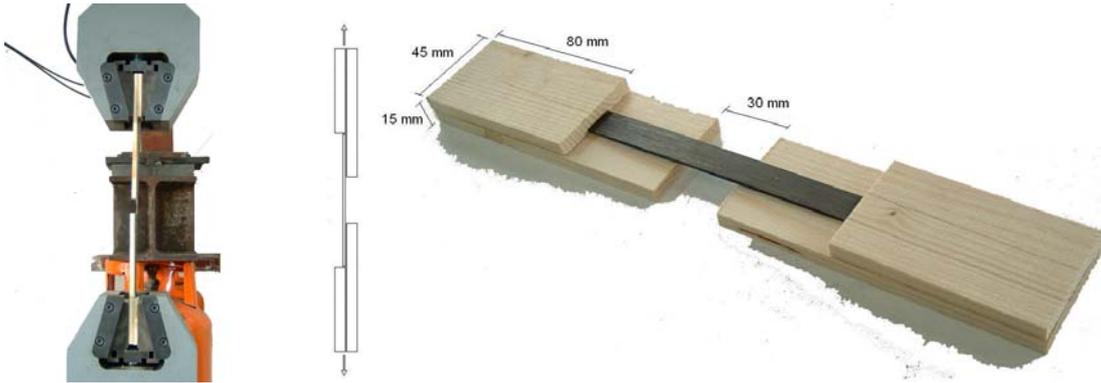


Figura 3. 9 – Provete escolhido.

Procedeu-se então à produção dos elementos necessários à realização dos provetes. Como já foi referido, as peças de madeira foram cortadas com uma serra de fita. Porém, relativamente aos laminados, surgiram algumas dificuldades iniciais aquando do seu corte. Como se tratava de um material fibroso de elevada resistência longitudinal, tentou-se o corte transversal através de uma rebarbadora de disco e o longitudinal com um chizato. O corte longitudinal tinha como objectivo um maior aproveitamento do laminado, já que a largura do laminado era maior do que o necessário e este era um material escasso. Facilmente se percebeu que esta opção não resultaria: a rebarbadora, porque desfazia a fibra, emanando para o ar imensas partículas prejudiciais para a saúde, e o chizato porque o seu corte não era recto e desfiava as fibras. Depois de mais algumas alternativas encontrou-se a ideal, que permitia um corte limpo e preciso deste material. Os laminados foram cortados numa guilhotina de corte de aço, quer na direcção transversal quer longitudinal.

Os pequenos elementos de laminado tinham de espessura 1,4 mm, a espessura do laminado original, 12 mm de largura e o comprimento variava entre 50, 100 e 150 mm.



Figura 3. 10 – Elementos para a composição do provetes.

3.4 Preparação dos provetes

A superfície da madeira, na zona de colagem, não foi sujeita a nenhum tratamento especial, excepto a limpeza de sujidade e poeiras com um pano. A colagem dos laminados à madeira foi realizada com a resina epoxi Sikadur® 30, e compreendeu os seguintes passos:

Em primeiro lugar, em cada provete de madeira era marcado o comprimento de colagem, eliminando assim erros da execução em série, desvios da serra, etc (Figura 3.11 e 3.12).

De seguida marcava-se o meio do provete, na direcção transversal, para a fibra ficar centrada e alinhada longitudinalmente.

O passo seguinte era fazer a resina, misturando os seus dois componentes, e aplicá-la em ambos os lados da zona a colar, na madeira e no laminado (Figura 3.13).

Depois do laminado alinhado com as referências, era aplicada uma pressão sobre este e a resina em excesso era removida (Figura 3.14).

O tempo aberto da resina era de cerca de 40 minutos, e o tempo de cura era de cerca de 24 horas.

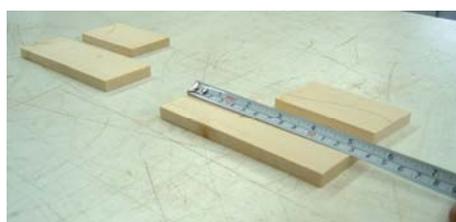


Figura 3.11 – Marcação do comprimento de colagem.



Figura 3.12 – Peças de madeira coladas pela marcação.



Figura 3.13 – Elaboração e aplicação da resina.



Figura 3. 14 – Colagem do laminado: aplicação de pressão e remoção da resina em excesso.

3.5 Sistema de ensaio e equipamento

Os ensaios foram realizados numa prensa universal de 600kN, à tracção (Figura 3.15). Com este equipamento é possível controlar o ensaio de uma forma computadorizada, estabelecendo velocidades quer com uma taxa constante de força ou de deslocamento quer por programação de curvas de carregamentos.

Este sistema registou os valores da força e da deformação ao longo do tempo. A deformação medida foi a referente à deformação total do provete na direcção longitudinal, isto é, ao deslocamento relativo entre as garras.

Como a ligação é muito rígida, não se achou necessário medir qualquer deformação intermédia. Pode verificar-se no gráfico da Figura 3.16, que representa o diagrama genérico da força em função do deslocamento obtidos nos ensaios, a linearidade entre estas duas variáveis até à rotura, indicando que não houve qualquer escorregamento entre os materiais.



Figura 3. 15 - Prensa universal de 600kN.



Figura 3. 16 – Diagrama F- δ de um ensaio de aderência.

3.6 Programa de ensaios

Foram realizadas várias séries destinadas a determinar algumas características da ligação colada relevantes para o presente trabalho. Os ensaios tiveram como objectivo verificar a influência das condições higrotérmicas, do comprimento de colagem, e das condições de carregamento na resistência ao corte e no modo de ruína. As variações entre as séries são indicadas no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Programa de ensaios dos provetes pequenos		
Série	Característica em foco	Condições de ensaio
1	Referência	G=12;T=12; L=50; Carregamento: Monotónico
2	Teor em água	G=20;T=20; L=50; Carregamento: Monotónico
3	Retracção da madeira	G=20;T=12; L=50; Carregamento: Monotónico
4	Inchamento da madeira	G=12;T=20; L=50; Carregamento: Monotónico
5	Carregamento em duas fases	G=12;T=12; L=50; Carregamento: EN26891
6	Comprimento da ligação	G=12;T=12; L=100; Carregamento: Monotónico
7	Comprimento da ligação	G=12;T=12; L=150; Carregamento: Monotónico
8	Carregamento cíclico	G=12;T=12; L=50; Carregamento: Cíclica
G – Teor em água na colagem [%]; T – Teor em água no ensaio [%]; L – Comprimento da linha de cola [mm]; Carregamento – Modo de aplicação da carga.		

O número de provetes a realizar por cada série foi estipulado para 20, de modo a se obterem resultados estatisticamente representativos. Cada provete foi ensaiado duas vezes, ou seja, foram obtidos dois resultados de cada provete, correspondentes à separação da fibra de cada uma das partes de madeira.

Cada uma destas séries teve como objectivo analisar o efeito que a variação de uma determinada característica produz na resistência ao corte da ligação colada.

A série 1, sendo a de referência, foi a que obteve os valores de resistência ao corte e o modo de ruína considerados como os obtidos em condições “normais”, ou seja, em condições de humidade e temperatura ideais, com um comprimento de colagem e sujeita a um carregamento definidos como padrão.

As condições “normais” a que os provetes estiveram sujeitos consistiram no seu armazenamento em um ambiente climatizado, com uma humidade relativa de 65%

e uma temperatura de 20°C (Figura 3.16).



Figura 3. 17 – Armazenamento dos provetes em ambiente condicionado.

O carregamento padrão foi definido como sendo um ensaio monotónico.

Os ensaios para a determinação das propriedades mecânicas, em estruturas de madeira e madeira lamelada colada, devem ser realizados segundo a Norma NP EN 408. Não obstante o facto do provete em estudo ser muito pouco semelhante ao proposto na norma, foi decidido que se iriam cumprir todos os aspectos que se pudessem adaptar ao ensaio:

- O dispositivo de aplicação de forças utilizado deverá ser capaz de medir a força com uma precisão de 1 % da força aplicada aos provetes de ensaio ou, para forças inferiores a 10 % da força máxima, com uma precisão de 0,1 % da força máxima.
- Se ocorrer uma rotura parcial na área colada da interface provete de madeira/fibra, o resultado só é válido se esta área for inferior a 20% da área de rotura.
- A força deve ser aplicada a velocidade constante, ajustada de maneira a que a força $F_{máx}$ seja atingida em (300 ± 120) s.
Nota: esta velocidade deve ser determinada a partir dos resultados de ensaios preliminares. O objectivo é o de atingir a $F_{máx}$ para cada provete de ensaio, no tempo de 300s.
- Cada provete de ensaio que divirja mais de 120 s do alvo dos 300 s deverá ser registado. O instante em que ocorrer a rotura deve ser registado assim como a sua média. [26]

Após o ensaio de alguns provetes obteve-se a velocidade de ensaio para os provetes de referência. Esta velocidade foi a adoptada para todos os outros provetes, sujeitos ao mesmo tipo de carregamento, de modo a eliminar uma possível causa de variação. A velocidade de carregamento obtida para os ensaios de referência foi de 1,2 kgf/s (= 12 N/s).



Figura 3. 18 – Condições higrométricas na câmara de cura.

Da série 2 pôde concluir-se sobre o efeito da presença de humidade na execução deste sistema de reforço.

A humidade na madeira foi induzida nos provetes colocando-os numa câmara húmida, usada normalmente para a cura de provetes de betão, cujas condições higrotérmicas médias eram uma humidade relativa de 87 % e uma temperatura de 16.7 °C (Figura 3.18).

Nas séries 3 e 4 verificou-se uma alteração no teor em água da madeira, que originou variações dimensionais de retracção e inchamento, respectivamente, e consequentemente tensões internas na ligação. Há que distingui-las também no facto de, no caso da série 3, a colagem ter sido feita com um teor em água da madeira alto e a série 4 ter sido colada com um teor baixo.

As séries 6 e 7 testaram a influência do comprimento de colagem, para efeitos de estudo sobre o comprimento de amarração.

A área de colagem correspondeu ao comprimento respectivo de cada série (50, 100, ou 150mm) pela largura da fibra, que tem o valor constante de 12 mm.

Finalmente, as séries 5 e 8 proporcionaram uma ideia da influência do carregamento na resistência ao corte da ligação.

A série 5 foi sujeita a um carregamento carga-descarga-carga, segundo a Norma EN 26891.

A Norma EN 26891 é correntemente usada para determinar a resistência de ligações com elementos tipo cavilha (nomeadamente, para ensaios de determinação da resistência ao esmagamento localizado, nos quais são usados provetes pequenos mistos com estes ligadores). A decisão de manter o padrão de carregamento definido na norma, no presente programa experimental, embora este não se enquadre no tipo preciso de ensaio nela definido, tem a ver com a historial da investigação conduzida em domínios afins deste, nos últimos anos. Numa primeira fase, foram testados provetes mistos madeira-betão com conectores metálicos, para os quais a aplicabilidade da norma é óbvia. Posteriormente, os estudos experimentais estenderam-se a provetes mistos colados madeira-betão. Não existindo especificação para tal tipo de ensaio, pareceu lógico manter o padrão de carregamento definido pela norma, eliminando assim essa variável do sistema. Dado, portanto, que tem sido esse o modelo de referência em todos os trabalhos precursores do presente, pareceu lógico que uma das séries de ensaios de aderência de colagem seguisse a mesma norma, para que os resultados se pudessem comparar.

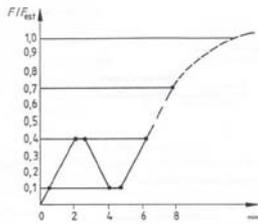


Figura 3. 19 – Curva de carregamento indicada pela norma EN 26 891 [27]

A curva de carregamento sugerida por esta norma está representada no gráfico da Figura 3.19. Inicialmente, o carregamento deve ser aplicado até 40 % da carga máxima estimada (F_{est}) e mantido constante durante um intervalo de 30 segundos. Nesta altura, a carga deve ser reduzida para 10 % de F_{est} e novamente mantida constante durante um intervalo de 30 segundos. Seguidamente a carga deve aumentar até à rotura. [27]

Enquanto a carga for inferior a 70% de F_{est} , a velocidade deve apresentar um incremento constante de carga de 20 % de F_{est} por minuto com uma variação admissível de ± 25 %. A partir do momento em que a carga ultrapassa o valor de 70 % de F_{est} , a velocidade deve apresentar um incremento constante de deformação de tal modo que a carga última, ou a deformação de 15 mm, se atinja para um tempo excedente entre 3 e 5 minutos, e que o tempo total do ensaio tenha valores entre 10 a 15 minutos.

O ensaio acaba quando se atinge a carga última ou quando a deformação atinge o valor de 15 mm. Em casos excepcionais o primeiro ciclo de carga até 40 % de F_{est} pode ser dispensado com o devido ajuste ao tempo total do ensaio. [27]

Para estes ensaios, e seguindo a norma, a velocidade adoptada foi 1,3 kgf/s (= 13 N/s).

A curva de carregamento aplicada aos provetes deste trabalho está representada na figura 3.20.



Figura 3. 20 – Curva de carregamento aplicada aos provetes da série 5.

A série 8 foi sujeita a um carregamento cíclico, arbitrado pelos autores com o intuito de estudar o efeito da fadiga.

Os provetes desta série foram sujeitos a 20 ciclos de carga, finalizando com um carregamento até à rotura. Um ciclo do carregamento consistiu em impor ao

proвете uma carga de 80 % da sua resistência ao corte, com uma velocidade constante de 10 kgf/s, e descarregar a mesma até zero, com a mesma velocidade. Depois dos vinte ciclos o provete foi sujeito a um carregamento final até à rotura com uma velocidade de 10 kgf/s.

A curva de carregamento está ilustrada na figura seguinte.

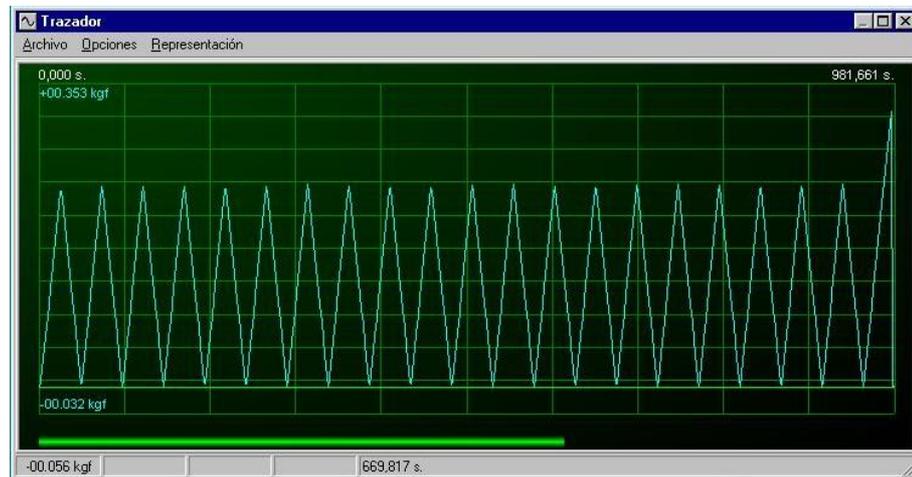


Figura 3. 21 – Curva de carregamento aplicada aos provetes da série 8.

3.7 Estudo analítico - Pré-avaliação dos resultados esperados

Antes de se realizarem os ensaios, efectuou-se um estudo analítico para estimar quais os resultados esperados (Quadro 3.4).

Para este estudo foram considerados, para a rotura, os valores de tensão de corte médios. Sendo a madeira da classe GL24h, segundo a Norma EN 1194 esta apresentava uma tensão de corte característica de $f_{v,g,k} = 2,7 \text{ N/mm}^2$. Considerou-se que o valor da tensão de corte média excedia em 33% o valor da tensão característica: $f_{v,g,m} = 3,591 \text{ N/mm}^2$. [23]

A carga de rotura foi estimada pela seguinte fórmula da Resistência de Materiais, na qual A representa a área de colagem:

$$N = f_{v,g,m} \cdot A,$$

Estes valores foram calculados assumindo que a ligação entre os materiais era rígida e que apresentavam um comportamento totalmente compósito, de tal modo que a rotura se daria pela madeira. Considerou-se ainda um comportamento linear dos materiais, de acordo com a Lei de Hooke, excepto para a cola que se

considerou completamente rígida, sem qualquer tipo de escorregamento. Considerou-se ainda uma distribuição uniforme da tensão de corte em toda a área de colagem.

Assim, todas as situações possíveis de rotura foram analisadas (rotura por corte da madeira, rotura por tracção da madeira e rotura por corte em bloco da madeira), para todas as séries, e verificou-se, pelos cálculos, que em condições normais todos os provetes apresentariam uma rotura por corte da madeira.

Importa referir que não se considerou que a rotura pudesse interferir com o laminado, devido às suas muito superiores propriedades mecânicas, e que possivelmente este se manteria intacto depois do ensaio.

Quadro 3.4 – Valores estimados da carga de rotura dos provetes

	Comprimento de amarração [mm]	Área [mm ²]	Rotura por corte da madeira [kN]
Série 1	50	600	2,1546
Série 2	50	600	2,1546
Série 3	50	600	2,1546
Série 4	50	600	2,1546
Série 5	50	600	2,1546
Série 6	100	1200	4,3092
Série 7	150	1800	6,4638
Série 8	50	600	2,1546



Poderiam ocorrer, no entanto, outras situações, ditas não normais, que eram alheias à previsão da carga de rotura e que pudessem originar um tipo de rotura diferente do esperado. Eram exemplo disso a existência de nós nas peças de madeira, colagens que não fossem devidamente pressionadas ou cuja resina já teria ultrapassado o tempo aberto, entre outras.

3.8 Resultados e Discussão dos Resultados

Os valores médios obtidos da força máxima de corte, em kN, nos ensaios efectuados aos provetes pequenos, encontram-se no Quadro 3.5.

Nesta tabela, podem encontrar-se também os valores esperados da força máxima e a comparação entre os valores esperados e os obtidos nos ensaios. Calculou-se ainda a tensão de corte através dos valores obtidos, considerando que a distribuição da tensão é uniforme e a rotura é instantânea ao longo do plano de corte.

Os resultados completos destes ensaios apresentam-se no Anexo A, assim como vários parâmetros registados durante os mesmos.

A comparação dos resultados foi feita relativamente a duas referências: aos resultados esperados e à série referência. A primeira comparação teve como objectivo verificar a semelhança dos valores obtidos experimentalmente com os do estudo teórico efectuado, e assim inferir sobre a sua legitimidade.

A segunda comparação é mais importante para este trabalho e teve como objectivo verificar a influência de cada um dos vários parâmetros estudados.

A fórmula usada para a comparação dos valores foi a seguinte:

$$Ganho = \frac{Valor_{obtido} - Valor_{referência}}{Valor_{referência}} \cdot 100[\%]$$

Para uma melhor leitura dos resultados, apresentam-se os valores da força de rotura obtidos em cada série, através de uma distribuição de frequências absolutas (Figura 3.22) e apresentam-se os valores experimentais e estimados graficamente de todas as séries (Figura 3.23).

Quadro 3.5 – Força máxima de tracção, em kN, registada nos ensaios dos provetes pequenos.							
	N estimado	N experimental	Tensão de corte	Modo de rotura		Ganho relativamente ao estimado	Ganho relativamente à referência
	[kN]	[kN]	N/mm ²			[%]	[%]
Série 1	2,15	3,185	5,368	Corte da madeira e superfície da madeira		49,78	0
Série 2	2,15	0	0	Corte pelo interface madeira-cola		-100	-100
Série 3	2,15	0,112	0,187	Corte pelo interface madeira-cola		-94,79	-96,48
Série 4	2,15	2,152	3,65	Corte da superfície da madeira		1,84	-32,43
Série 5	2,15	3,115	5,316	Corte da superfície da madeira		48,26	-0,22
Série 6	4,31	4,794	3,983	Corte da madeira e superfície da madeira		10,91	50,52
Série 7	6,46	6,764	3,74	Corte da madeira e superfície da madeira		4,21	112,37
Série 8	2,15	2,707	4,512	Corte da superfície da madeira		25,92	-15,01

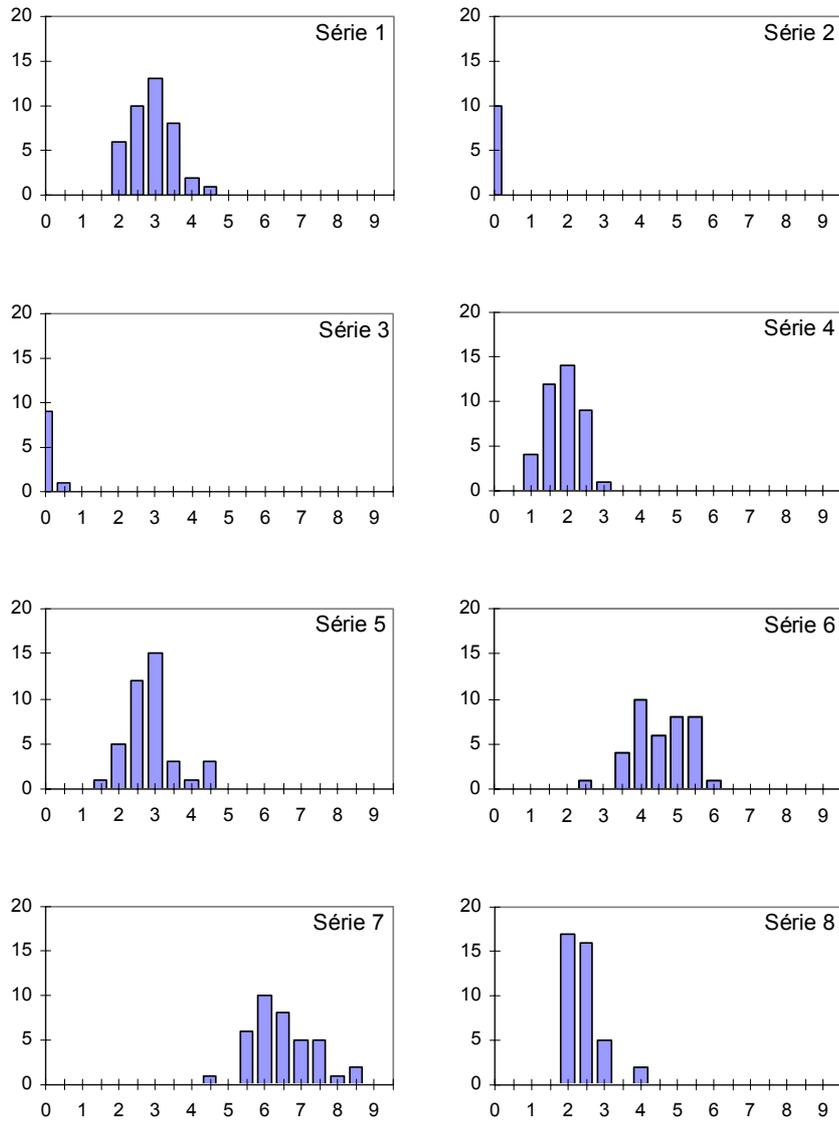


Figura 3. 22 – Frequências absolutas da força de rotura [kN] das séries dos provetes pequenos.

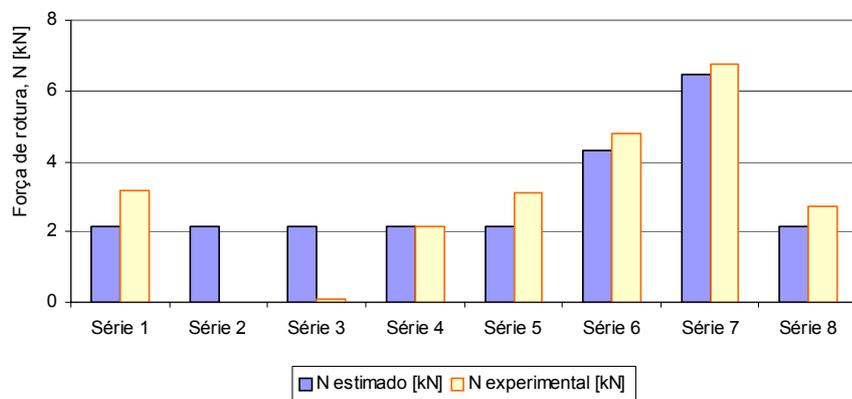


Figura 3. 23 – Valores estimados e valores experimentais médios das séries dos provetes pequenos.

A resistência das ligações mostrou-se alta para a maioria dos provetes, ou seja, para a maioria dos parâmetros em estudo, excepto para os que estavam relacionados com a influência da humidade.

Começando por analisar as séries que estudam a influência da humidade, podem ver-se, no gráfico da Figura 3.24, com maior detalhe, os resultados obtidos nas mesmas.

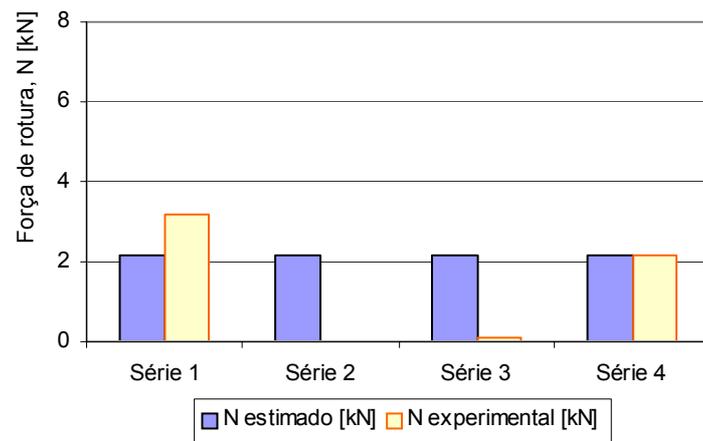


Figura 3. 24 - Valores esperados e valores médios obtidos das séries 1 a 4.

As séries 2 e 3 foram as séries em que os laminados foram colados com um teor em água elevado. Como se pode verificar, a resistência apresentada pelos provetes destas séries foi muito reduzida ou nula, o que revela que a presença de humidade nas peças de madeira, durante a sua colagem, é muito prejudicial.

Nas figuras seguintes podem observar-se, em provetes das séries 2 e 3 e depois de ensaiadas, o empenamento provocado nas peças de madeira depois da simples secagem ao ar. Como se pode ver, o empeno gerou tensões suficientes para descolar as duas peças de madeira, tendo sido ainda agravado pelo facto de a cola não deixar a madeira retraindo livremente num dos lados.



Figura 3. 25 – Provetes da série 2.



Figura 3. 26 – Provetes da série 3.

A série 4 apresentou um decréscimo relevante comparativamente à de referência (-32,43%) mas, no entanto, não apresentou um valor inferior ao esperado, obtido analiticamente.

Este decréscimo relativamente à referência pode ser um indicador de que, mesmo sendo a colagem feita em condições secas, a presença de humidade na madeira pode diminuir a eficiência do sistema de reforço.

O teor em água medido nos provetes sob o laminado, depois de ensaiados, apresentou um valor médio de 22,69 %, com um coeficiente de variação de 2,62 %.

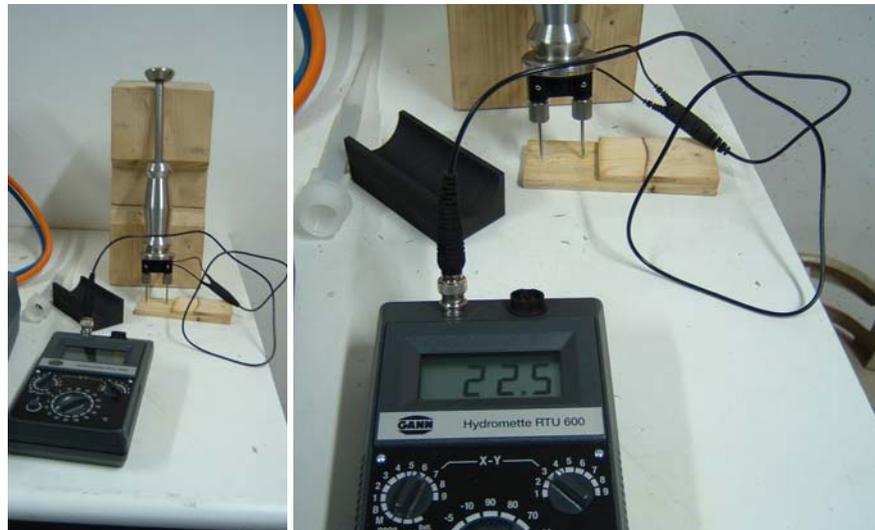


Figura 3. 27 – Medição da humidade sob a fibra, depois do ensaio, nos provetes da série 4.



Figura 3. 28 – Fibras levantadas nos provetes da série 4.

Nesta série pôde observar-se um fenómeno, não comum às restantes séries, que se tratou de um levantamento generalizado das fibras da madeira na zona de rotura (Figura 3.28). Presume-se que isso se tenha devido ao facto de, uma vez que o seu teor em água era elevado, as fibras se apresentarem amolecidas e por isso mais maleáveis, acompanhando o movimento do laminado.

As séries 1, 5 e 8 foram sujeitas a diferentes tipos de carregamentos. A relação entre os seus resultados é mostrada no gráfico seguinte.

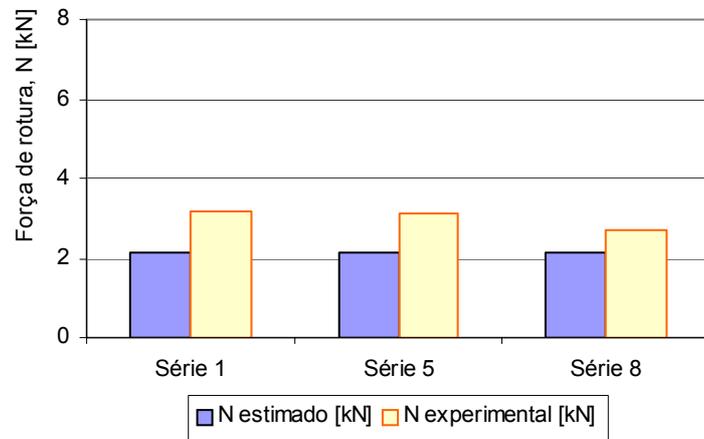


Figura 3. 29 - Valores esperados e valores médios obtidos das séries 1, 5 e 8.

A série referência, que apresenta apenas uma fase e a taxa de aumento de carga mais baixa é a que apresenta o valor de resistência mais alto, seguida da série 5. Os valores obtidos na série 8 são visivelmente inferiores (-15,01 % da série 1) evidenciando o efeito da fadiga que os ciclos originaram na ligação colada.

Finalmente, as restantes séries mostraram a influência do comprimento de colagem na ligação. São elas as séries 6 e 7 e a de referência, para comparação. Na Figura 3.30 podemos ver a evolução dos resultados com o aumento de comprimento e na Figura 3.31 podemos ver a correspondente tensão de corte.

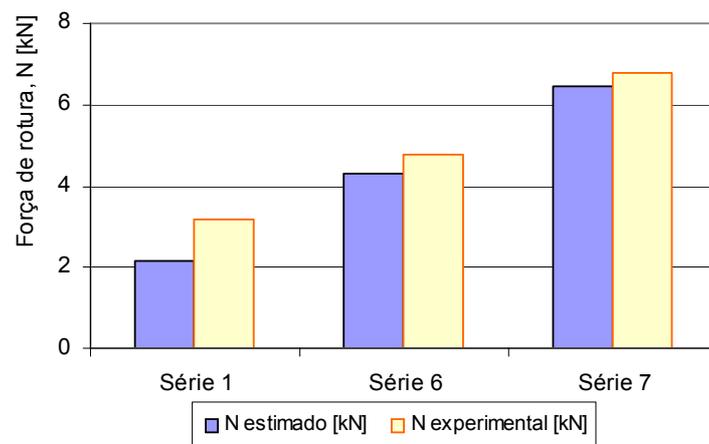


Figura 3. 30 - Valores esperados e valores médios obtidos das séries 1, 6 e 7.

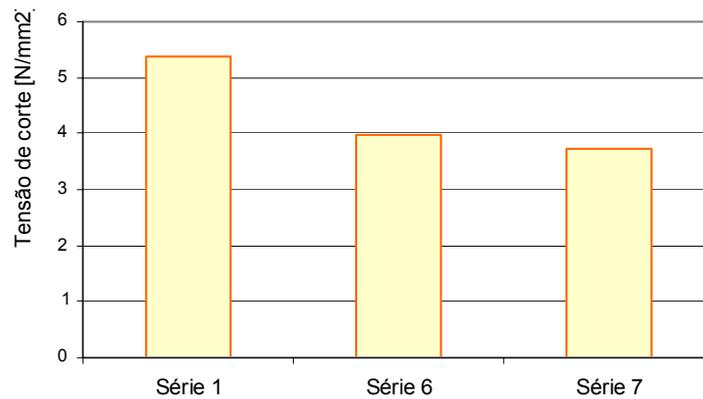


Figura 3. 31 – Tensão de corte nas séries 1, 6 e 7.

No geral os valores obtidos foram superiores aos esperados, tendo estes tendência para se aproximarem à medida que o comprimento aumenta, ou seja, o ganho de resistência comparativamente ao esperado diminuiu com o aumento do comprimento (Quadro 3.5).

Quanto maior foi o comprimento de colagem maior a resistência ao corte, isto significa que só se podiam atingir valores mais altos se se aumentasse a área de colagem. Ficou assim claro que a resistência ao corte dependia do comprimento da linha de colagem.

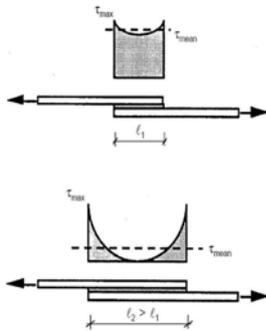


Figura 3. 32 - Distribuição da tensão de corte para diferentes comprimentos de colagem em elementos colados de igual rigidez E.A. [30]

No entanto, verificou-se um decréscimo na tensão de corte à medida que o comprimento aumentava. Isto pode dever-se a uma distribuição não uniforme da tensão de corte ao longo da linha de colagem, apresentando máximos nos topos da linha de cola (Figura 3.32). Este fenómeno já é conhecido em situações semelhantes de ligações por sobreposição [30]

É possível incluir neste ponto alguns resultados, de outros ensaios, realizados pela autora, em Weimar, Alemanha.

Estes ensaios consistiram em provetes com diferentes comprimentos de colagem de 100, 125 e 150 mm respectivamente, mas em que o laminado tinha uma largura de 50 mm e por conseguinte, uma muito maior área.

Pode ver-se no Gráfico 3.33 os resultados da tensão de rotura dos ensaios (realizados em Coimbra e em Weimar) em função dos comprimentos de colagem. As séries com o mesmo comprimento de colagem apresentaram tensões de corte semelhantes, mesmo com áreas de colagem muito diferentes e tornou-se claro que no aumento do comprimento a tensão de corte decresce.

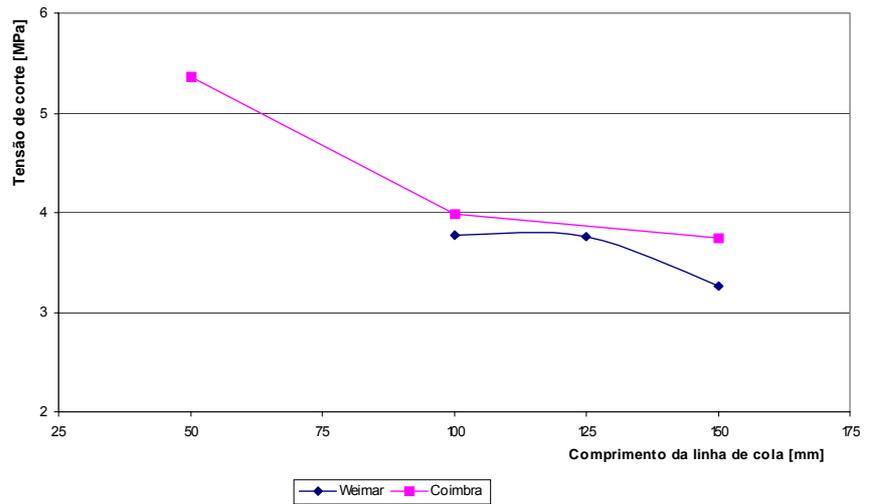


Figura 3. 33 - Tensão de corte em função do comprimento de colagem.

Apresentam-se ainda algumas fotos que ilustram provetes ensaiados das séries 6 e 7, onde se podem ver os seus modos de rotura e as suas peculiaridades.



Figura 3. 34 - Provede da série 6. Ruptura por corte em bloco da madeira.



Figura 3. 35 – Provede da série 6. Ruptura por corte em bloco da madeira, originada pela presença de nós e pela zona da medula.

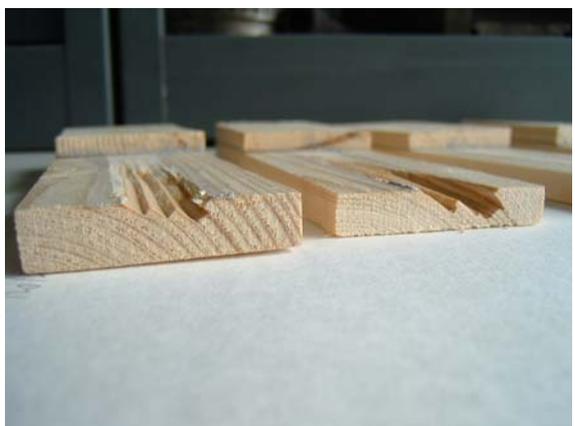


Figura 3. 36 - Provede da série 7 e da série 6. Ruptura dos anéis da madeira na direção tangencial e transversal.



Figura 3. 37 - Provette da série 7.
Rotura da madeira, originada pela
presença de nós.

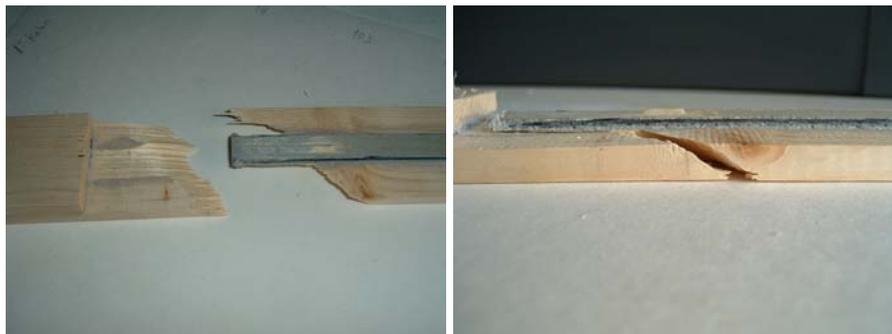


Figura 3. 38 - Provette da série 7. Rotura por corte em bloco da madeira , originada pela presença de nós.

CAPÍTULO 4 - ENSAIO DE VIGAS DE DIMENSÃO REAL

4.1 Materiais

Como já se referiu no capítulo anterior, estabeleceu-se usar o mesmo tipo de material para todos os ensaios realizados, reduzindo assim essa variável. Usou-se também o mesmo tipo de *glulam*, proveniente da mesma empresa (Flexilam), da mesma classe resistente e feito com madeira da mesma espécie.

As vigas originais tinham 4,5 metros de comprimento, com 5 lamelas. Como medida de rentabilização do material disponível, quer da madeira quer dos laminados CFRP, decidiu-se cortar as vigas originais longitudinalmente no plano médio horizontal e transversalmente a meio vão, como se pode ver na Figura 4.1.

Depois do corte e da rectificação, as vigas apresentavam as dimensões de 90x110x2250 (comprimento x largura x altura). Para a execução desta parte do programa experimental utilizaram-se 16 destas vigas.

Decidiu-se que a face de tracção da madeira, ou seja, a face na qual se iriam colar os laminados, seria a face da viga inicial e não a face originada pelo corte. Isto porque a face sujeita ao corte, mesmo depois de rectificada, não se apresentava tão plana e lisa como a face original, rectificada em fábrica, e com certeza não se conseguiria uma colagem uniforme do laminado, quer longitudinalmente quer transversalmente, podendo ainda gerar tensões internas na ligação entre os materiais.

Uma vez que as vigas iniciais eram constituídas por 5 lamelas, as vigas que se obtiveram a partir dessas eram constituídas por 2,5 lamelas (Figura 4.1). Considerou-se que esta meia lamela da secção da viga não seria adequada para a colagem dos laminados, principalmente por duas razões. Em primeiro lugar, porque poderia ter sido danificada, em termos de resistência, pelo corte, e o facto de ser meia lamela, poderia facilitar a ocorrência de delaminação entre lamelas mais cedo do que em condições normais. Em segundo lugar, porque o corte longitudinal pode

desclassificar a madeira, sendo este problema mais crítico quando a madeira está sujeita a tracções do que a compressões.

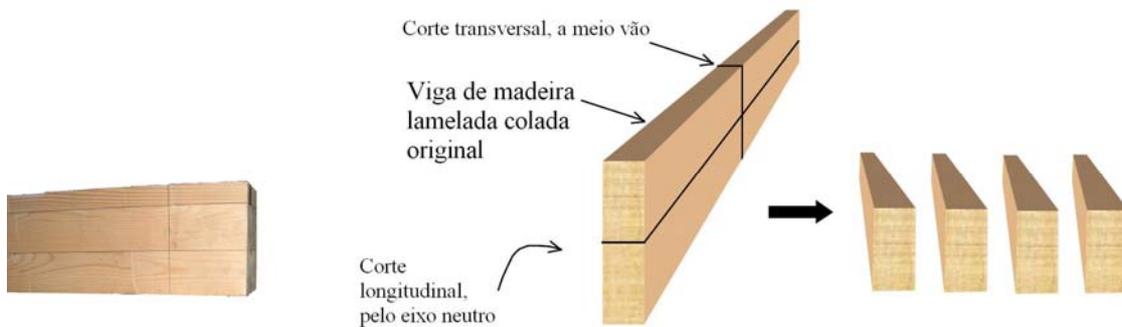


Figura 4. 1 - Constituição dos elementos de viga e pormenor da altura igual a 2,5 lamelas.

O reforço aplicado foi igualmente o sistema constituído por laminados de carbono da empresa Sika, utilizado nos provetes pequenos e já caracterizado no capítulo anterior.

No entanto, no decorrer da execução da parte experimental, o laminado esgotou, obrigando a uma procura no mercado. Tendo em conta que este material é vendido em bobines de 250 metros e uma vez que a quantidade pretendida era apenas de uns metros, usou-se um laminado CFRP diferente que foi gentilmente disponibilizado pela STAP, designado por MBrace Laminados, da Bettor.

As propriedades mecânicas e dimensionais dos laminados utilizados são apresentadas no quadro 4.1. Apresentam-se repetidamente as características do laminado Sika para uma melhor comparação com o laminado Bettor.

O facto de se terem usado dois tipos diferentes de laminado foi ponderado e posteriormente aceite porque se achou que não iria trazer nenhuma alteração significativa aos resultados e, como se pode ver no quadro 4.1, as diferenças nas características dos laminados CFRP não influenciam de forma significativa o comportamento da peça de madeira lamelada colada atendendo à grande diferença de resistência entre o material CFRP e a madeira.

Tudo o resto foi feito de igual modo: a resina usada continuou a ser a do sistema de reforço da marca Sika e o reforço foi realizado da mesma maneira. Esta foi considerada uma mudança pouco relevante uma vez que, tal como se verificou no sistema inicialmente escolhido, a rotura prevista, e posteriormente observada nos os ensaios, deu-se pelo material de suporte.

Quadro 4.1 – Valores das propriedades mecânicas e dimensionais dos laminados							
Sistemas de CFRP		Dimensões			Principais Propriedades		
Tipo	Materiais	Largura mm	Espessura mm	Secção transversal mm ²	Resistência à tracção (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)	Extensão na rotura (%)
Sika® CarboDur S614 [27]	Resina	-	-	-	Rotura pelo suporte	12 800	-
	Laminado	60	1,4	84	fg,k > 2.800 fg,m = 3.100	165 000	> 1,7
Sika® CarboDur S914 [27]	Resina	-	-	-	Rotura pelo suporte	12 800	-
	Laminado	90	1,4	126	fg,k > 2.800 fg,m = 3.100	165 000	> 1,7
MBrace Laminado HM (S&P Laminates CFK 200/2000) [31]	Laminado	120	1,4	168	fg,k > 2.000 2.500 < fg,m < 2.700	200 000	1,2

Relativamente à dimensão dos laminados, foi feito um estudo para determinar qual a secção mais vantajosa, quer em termos de reforço quer em termos económicos. O ideal seria encontrar a menor relação custo/ aumento de momento resistente.

Foi feito um estudo analítico para se conhecer a influência que o aumento da secção do laminado tem no incremento de resistência verificado na viga, relativamente a uma viga não reforçada. Na Figura 4.2 é apresentada um diagrama que ilustra o incremento do momento resistente, para uma viga de secção constante, à medida que a área de laminado aumenta.

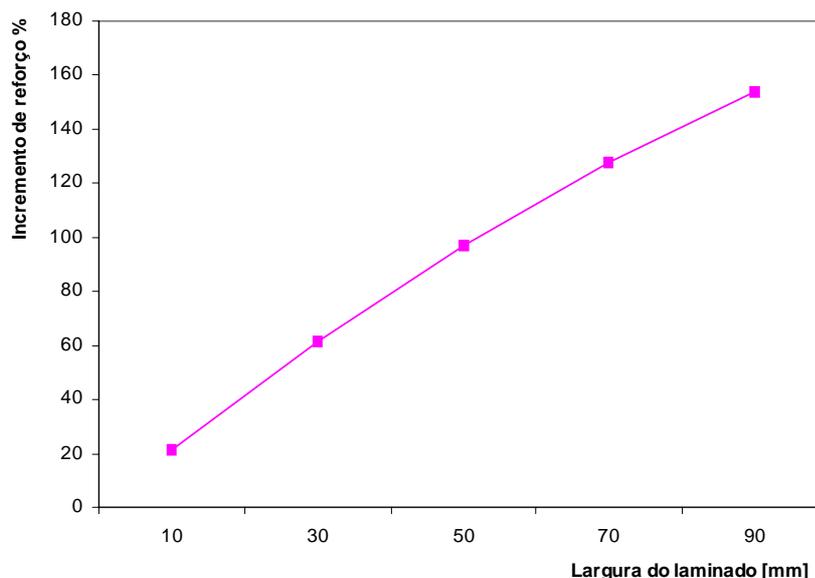


Figura 4. 2 – Incremento de resistência em função da largura do laminado CFRP.

Pode verificar-se pelo estudo que, mesmo sendo a curva do gráfico ligeiramente parabólica, esta é muito aproximada a um comportamento linear. O facto de ser parabólica indica que, a percentagem de aumento de resistência é menor do que a percentagem de aumento de laminado.

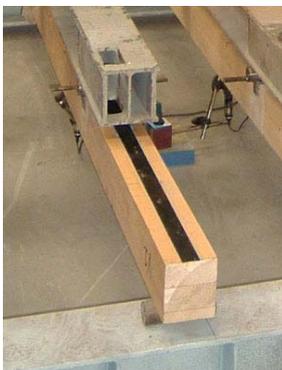


Figura 4. 3 – Laminados Sika®, colados em vigas de glulam.

Através da análise realizada e pela verificação e racionalização do laminado disponível decidiu-se por uma largura do laminado de 30 mm.

Os laminados Sika®, cortados e prontos a aplicar, tinham de espessura 1,4 mm, 30 mm de largura, um terço da largura das vigas, e o comprimento de 2250 mm, igual ao das vigas (Figura 4.3).

Os laminados MBrace tinham espessura e largura iguais às do laminado Sika® e comprimento igual a 1980 mm. Isto deve-se ao facto de os laminados terem sido cedidos e por isso terem de ser ajustados ao programa de ensaios. Estes laminados apenas foram usados em uma das séries de ensaios.

4.1.1. Caracterização dos materiais - Determinação do Módulo de Elasticidade das vigas de madeira.

Antes da realização de qualquer ensaio, determinou-se o Módulo de Elasticidade de todas as vigas para uma melhor caracterização das suas propriedades mecânicas.

O respectivo ensaio é regulamentado pela Norma EN 408:2003. Foram cumpridos todos os requisitos exigidos pela norma, os quais se enumeram de seguida:

- O elemento a ensaiar deve ter um comprimento mínimo de 19 vezes a altura da secção. [28]

$$L > 19 \cdot h \leftrightarrow 2,25 > 19 \cdot 0,1125 \leftrightarrow 2,25 > 2,14 \quad \checkmark$$

- O elemento deve ser carregado simetricamente à flexão, em dois pontos, ao longo de um vão livre de 18 vezes a altura da secção como se pode ver na Figura. O elemento deve ser simplesmente apoiado. [28]

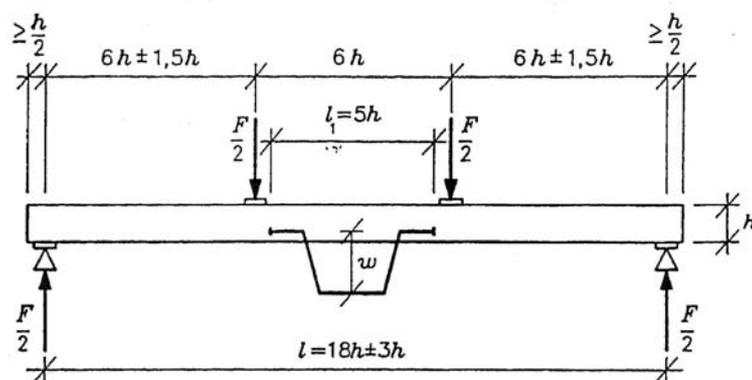


Figura 4. 4 – Esquema de ensaio para a determinação do Módulo de Elasticidade Global à Flexão.

$$\text{Vão} = 18 \cdot h = 2,025\text{m}$$

Optou-se por um vão de 2,1m e uma distância entre pontos de carregamento e apoios de 0,7 m. O carregamento foi realizado por um actuador e repartido por uma viga de distribuição de grande rigidez. Nos pontos de aplicação da força inseriram-se pequenas chapas metálicas destinadas a reduzir a indentação local da madeira.

- A carga deve ser aplicada a uma velocidade constante, não superior a 0,003h mm/s. A carga máxima aplicada não deve exceder 40% da carga máxima ou provocar danos à peça. [28]

$$V < 0,003 \cdot h \leftrightarrow V_{m\acute{a}x} = 0,3375\text{mm/s}$$

$$F_{m\acute{a}x} = 16,55\text{kN} \rightarrow N_{\text{carregamento}} = 0,4 \cdot 16,55 = 6,62\text{kN}$$

$$\text{flecha} = 18,79\text{mm} \left[f = 0.00355 \frac{F \cdot L^3}{E \cdot I} \right]$$

O valor de F foi obtido analiticamente e a sua determinação está exposta no capítulo 4.5.1.

Uma vez que o Data Logger utilizado apenas conseguia registar valores de cinco em cinco segundos, consideraram-se várias velocidades, de modo a que a informação

obtida do ensaio e o tempo do ensaio fossem compatíveis.

$$V = 0,33\text{mm/s} \rightarrow t = 57\text{s} \approx 1\text{min} \rightarrow 11\text{medições}$$

$$V = 0,10\text{mm/s} \rightarrow t = 187,9\text{s} \approx 3,13\text{min} \rightarrow 37\text{medições}$$

$$V = 0,05\text{mm/s} \rightarrow t = 375,8\text{s} \approx 6,26\text{min} \rightarrow 75\text{medições}$$

$$V = 0,01\text{mm/s} \rightarrow t = 1879\text{s} \approx 31,2\text{min} \rightarrow 375\text{medições}$$

A velocidade adoptada para a realização destes ensaios foi de 0,05mm/s, por se achar que fornecia valores suficientes para a obtenção do valor do Módulo de Elasticidade (E_m) e por conferir ao ensaio um tempo total razoável.

Os ensaios foram realizados num pórtico metálico, com uma configuração conforme o estabelecido pela norma. O carregamento foi efectuado por um actuador de 100 toneladas e todo o ensaio foi monitorizado pelos dados obtidos pelo actuador e por três ou seis (conforme o ensaio) transdutores de deslocamento (LVDTs) posicionados um ao centro e os outros nos pontos de aplicação da carga. A medição destes deslocamentos foi efectuada pelo eixo neutro e, quando lidos em ambos os lados do eixo neutro, foi considerada a média desses valores.

O equipamento utilizado nos ensaios está apresentado na Figura 4.5.



Figura 4.5 – Equipamento utilizado nos ensaios de determinação do ME à flexão.

- O módulo de elasticidade à flexão (E_m) é dado pela equação:

$$E_{m,g} = \frac{L^3 \cdot (F_2 - F_1)}{b \cdot h^3 \cdot (w_2 - w_1)} \cdot \left[\left(\frac{3 \cdot a}{4L} \right) - \left(\frac{a}{L} \right)^3 \right]$$

Em que:

$F_2 - F_1$ é o incremento de carga na proporção linear no gráfico força-deslocamento, em Newton (Figura 4.6);

$w_1 - w_2$ é o incremento da deformação correspondente ao intervalo $[F_1; F_2]$, em milímetros (Figura 4.6);

a é a distância entre um ponto de aplicação da carga e o apoio mais próximo, em milímetros. [28]

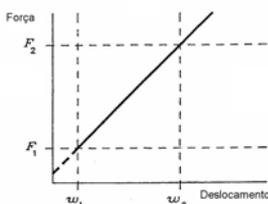


Figura 4.6 – Gráfico força-deslocamento na fase de deformação elástica. [28]

Dos ensaios realizados obtiveram-se gráficos carga-deslocamento para cada uma das vigas. A partir desses gráficos seleccionou-se um troço mais linear (Figura 4.7) e a partir desse troço determinou-se o valor de:

$$\frac{(F_2 - F_1)}{(w_2 - w_1)}$$

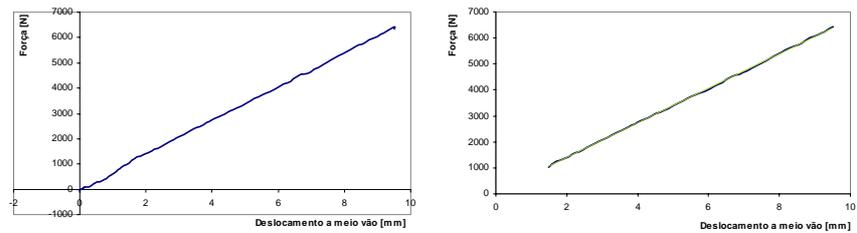
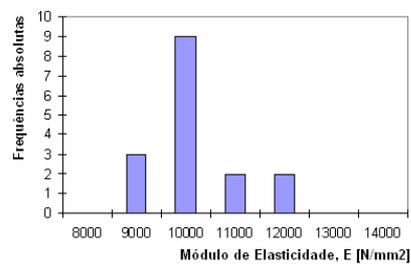


Figura 4. 7 – Gráfico carga-deslocamento da viga 15 do ensaio do Módulo de Elasticidade. Secção considerada do gráfico carga-deslocamento da viga 15 para o cálculo do Módulo de Elasticidade.

Os valores do Módulo de Elasticidade obtidos estão apresentados na figura seguinte, sob a forma de um histograma, assim como o valor médio obtido e o respectivo coeficiente de variação C.

Os resultados completos deste ensaio são apresentados no quadro 4.2.



Média =	10692,77 MPa
Desvio padrão =	889,02 MPa
Coeficiente de variação Cv =	8,31 %

Figura 4. 8 – Frequências absolutas dos valores obtidos do Módulo de Elasticidade.

Quadro 4.2 – Determinação do Módulo de Elasticidade das vigas de glulam							
Viga	h [mm]	b [mm]	L [mm]	a [mm]	Dia do ensaio	$\frac{(F_2 - F_1)}{(w_2 - w_1)} = d$	Em [N/mm ²] $E_{m,g} = \frac{L^3 \cdot d}{b \cdot h^3} \cdot \left[\left(\frac{3 \cdot a}{4L} \right) - \left(\frac{a}{L} \right)^3 \right]$
V01	110	90	2100	700	15-03-2007	634,8	10451,49
V02	110	90	2100	700	21-03-2007	627,77	10335,75
V03	110	90	2100	700	21-03-2007	613,12	10094,55
V04	110	90	2100	700	22-03-2007	589,11	9699,242
V05	110	90	2100	700	22-03-2007	604,52	9952,956
V06	110	90	2100	700	22-03-2007	647,01	10652,52
V07	110	90	2100	700	13-04-2007	769,09	12662,47
V08	110	90	2100	700	22-03-2007	749,48	12339,61
V09	110	90	2100	700	13-04-2007	586,18	9651,002
V10	110	90	2100	700	13-04-2007	636,21	10474,71
V11	110	90	2100	700	13-04-2007	617,2	10161,72
V12	110	90	2100	700	22-03-2007	713,06	11739,98
V13	110	90	2100	700	22-03-2007	628,01	10339,7
V14	110	90	2100	700	22-03-2007	684,54	11270,42
V15	110	90	2100	700	22-03-2007	665,08	10950,03
V16	110	90	2100	700	22-03-2007	626,09	10308,09

Sendo o valor de E_m , indicado para esta classe de madeira lamelada colada, igual a 11600 MPa, verifica-se que, para este tipo de madeira o seu valor é ligeiramente inferior, tendo descido cerca de 8%.

4.2 Programa de ensaios

A parte do programa experimental referente às vigas compreende a realização de um conjunto de ensaios, distribuídos por várias séries.

Como em qualquer trabalho experimental, a primeira de todas as séries foi a de *referência*. Foi ensaiada com o propósito de servir de comparação com as outras séries, definindo as características padrão a utilizar.

A segunda série foi composta por vigas pré-esforçadas com o sistema que se pretendia estudar.

Pretendia-se ainda incluir neste programa o reforço (sem pré-esforço), com laminados de carbono, de vigas sujeitas a algum dano, com o intuito de estimar o potencial de recuperação da capacidade resistente. Para isso, as vigas de referência, após serem ensaiadas, foram reforçadas com laminados de fibras de carbono e novamente ensaiadas. Esta série designou-se como série 4.

Porém, durante a execução dos ensaios, alguns imprevistos surgiram e foram incluídas mais duas séries (série 3 e 5).

A série 3 surgiu porque, na primeira colagem dos laminados da série 2, não se conseguiu o efeito do pré-esforço. A razão porque as vigas ficaram apenas reforçadas é descrita e explicada à frente, na secção 4.3.1.

A razão da inclusão da série 5 deveu-se ao facto de se ter constatado que os danos provocados nas vigas da série 4 eram excessivos quando, em casos práticos, se quisesse reabilitar uma viga de madeira estrutural. Assim, através da abertura de um rasgo, a resistência da viga seria bastante diminuída, mas não a sua integridade e capacidade de ser convenientemente reabilitada.

Com as séries 2 a 5 pretendeu-se avaliar a eficiência proporcionada pelos laminados de fibras de carbono no reforço de vigas submetidas à flexão simples, quer nos elementos que não sofreram qualquer dano (séries 2 e 3), quer nos elementos danificados, com vista à sua reabilitação (séries 4 e 5).

O programa experimental é apresentado resumidamente no quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Programa de ensaios das vigas		
Série	Característica em foco	Número de vigas
Série 1 – Referência	Vigas sem reforço	4
Série 2	Vigas intactas pré-esforçadas com CFRP	7
Série 3	Vigas intactas reforçadas com CFRP	2
Série 4	Vigas sujeitas a alguma cedência, reforçadas com CFRP	4
Série 5	Vigas cortadas a meio vão, reforçadas com CFRP	3

4.3 Preparação das vigas

A preparação das vigas descrita nesta secção refere-se aos tratamentos a que estas foram sujeitas antes de serem ensaiadas, com o objectivo de estudar as várias situações e compará-las entre si.

As vigas foram sujeitas a três tipos de preparação: pré-esforçadas, reabilitadas após cedência e reabilitadas após corte a meio vão.

4.3.1 Vigas pré-esforçadas

O pré-esforço aplicado às vigas consistiu num sistema de imposição de uma contraflecha, colando o laminado contra a face inferior da viga, temporariamente sujeita a um estado de coacção oposto ao de serviço.

Antes de qualquer acto, foi preciso clarificar alguns aspectos através de uma análise teórica.

Como é fácil perceber, o grau de pré-esforço induzido na viga é tanto maior quanto maior for a deformação que se impõe à mesma. Então, é de todo o interesse que se deforme a viga o mais possível sem a danificar, para que esta se mantenha em fase elástica, de modo a se obter o maior aproveitamento em termos de pré-esforço.

Foi acordado que a tensão máxima a que a viga seria sujeita para a colagem dos laminados seria a correspondente a 90 % da resistência característica à flexão, que corresponde a uma carga $F = 1120,1 \text{ kgf} = 11,20 \text{ kN}$, conforme a configuração esquematizada na Figura seguinte.

O valor de F foi obtido analiticamente e a sua determinação está exposta no capítulo 4.5.2.

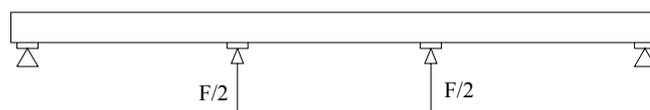


Figura 4. 9 – Esquema de carregamento aplicado à viga para a colagem do laminado CFRP.

A imposição da deformação às vigas não foi realizada exactamente como esquematizado na Figura.

Para a imposição da deformação, as vigas foram viradas na vertical, de modo a que a face onde os laminados deviam ser colados (a face onde as cargas foram

aplicadas) fosse a superior, tornando a aplicação da carga de cima para baixo (Figura 4.3).

Para se conseguir a deformação das vigas enquanto os laminados eram colados utilizou-se um pórtico auxiliar. Este funcionou com um mecanismo de alavanca que exercia sobre as vigas a força do peso da viga de alavanca e a força provocada pelo peso da carga que se colocou no topo da viga de alavanca (Figuras 4.10 e 4.11). A posição da viga de alavanca foi estudada e experimentada no local de modo a esta se apresentar o mais possível na horizontal e exercer uma força vertical sobre a estrutura montada.

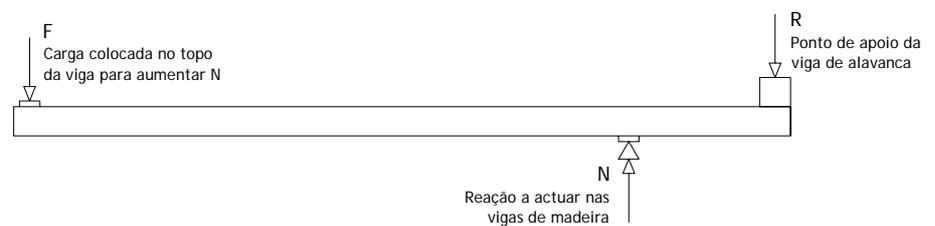


Figura 4. 10 – Esquema do sistema de alavanca.



Figura 4. 11 – Pórtico utilizado para a colagem dos laminados.

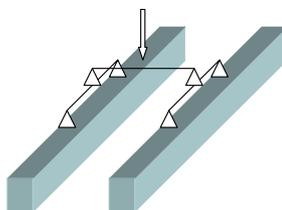


Figura 4. 12 – Esquema da estrutura usada para a colagem dos laminados.

Foram coladas duas vigas de cada vez. A estrutura usada para o fazer está esquematizada na Figura 4.12. O procedimento de montagem da estrutura para a execução desta tarefa está descrito e ilustrado de seguida.

Antes da realização das colagens, reuniu-se todo o material necessário e fez-se uma montagem prévia para determinar a posição exacta de todos os elementos. Estas posições foram delineadas com marcador para uma maior facilidade nas montagens seguintes e para evitar eventuais desvios ou diferenças entre as várias colagens.



Figura 4. 13 - Prê montagem da estrutura.

Começou-se exactamente pelas colagens. A colagem dos laminados foi realizada com a resina epoxi Sikadur® 30, do mesmo modo que o já descrito no capítulo 3.4, para os provetes pequenos.

As vigas foram colocadas sobre os apoios, já posicionados nos seus devidos lugares, e sobre elas começou-se a colocar todo o material que tinha como objectivo aplicar as cargas nas vigas a quatro pontos e fazer a sua distribuição.

Determinou-se que a aplicação da carga na viga para a colagem fosse feita a quatro pontos, tal como para o ensaio à rotura. Deste modo o diagrama de esforços a que a viga iria estar sujeita seria semelhante nos dois casos, com diferenças ao nível dos valores e de sinal, facilitando o seu cálculo.

Sobre cada viga colocou-se um apoio móvel e um fixo, onde assentou uma viga de distribuição das cargas.

Sobre esta colocou-se outra viga de distribuição, na perpendicular, apoiada nas vigas de distribuição das vigas de madeira (Figura 4.12).

Sobre esta última foi colocada uma célula de carga.

A viga de alavanca do pórtico assentou num apoio fixo, sobre a célula de carga.

Todo este sistema era isostático e, por isso, a distribuição das cargas pelas vigas foi uniforme. Infelizmente, por indisponibilidade de material, não foi possível medir a carga nos quatro apoios das vigas de madeira para o confirmar, sendo a carga apenas medida no topo da estrutura.



Figura 4. 14 – Estrutura utilizada para a colagem dos laminados.

A força a aplicar nas vigas, já que são coladas aos pares, foi de:

$$2 \cdot F = 22,402kN = 2283,6kg$$

A este valor foi subtraído o peso do material de distribuição da carga, que se encontrava abaixo da célula de carga, e assim se obteve a carga que a mesma deveria medir.

O valor medido na célula de carga pode ser conferido no quadro 4.4 e deve ser de:

$$2283,6 - 84,43 = 2199,17kg$$

Sobre o topo da viga de alavanca foi colocada carga até se atingir a carga pretendida. A força aplicada era medida instantaneamente na célula de carga, de tal modo que a carga aplicada no topo da viga não era constante, mas exercia sobre as vigas o mesmo esforço.

Os apoios, cinco pares mais um isolado, eram constituídos por roletes ou meios roletes, conforme se tratasse de apoios móveis ou fixos, respectivamente (Figura 4.15).

A deformação das vigas foi medida por transdutores de deslocamentos, colocados na parte inferior das vigas, a meio vão e a meia largura (Figura 4.16). Foram registados valores de 15 em 15 minutos durante um tempo total de 24 horas, o tempo a que as vigas estiveram sujeitas a este esforço e que a cola demorou a curar.



Figura 4. 15 – Apoios móveis.



Figura 4. 16 – Disposição dos dispositivos LVDT.

Dos dados recolhidos obtiveram-se os valores iniciais e finais das flechas a meio vão quando a viga estava carregada, e o valor da flecha residual depois da viga ser descarregada. Estes dados apresentam-se no quadro 4.4. A média dos valores obtidos foi de 17,3 mm para a flecha inicial, quando a viga é carregada, de 18,7 mm para a flecha final, após 24 horas carregada, e de 3,8 mm para a flecha residual. O gráfico da Figura 4.17 mostra como evoluiu esta deformação ao longo do tempo em qualquer uma das vigas, de uma forma genérica. Neste gráfico não se incluiu a deformação elástica instantânea para se poder ter uma melhor percepção da evolução da deformação.

Quadro 4.4 – Deformações verificadas na colagem dos laminados.					
Viga	Dia da colagem	Carga medida na célula [tn]	f inicial [mm]	f final [mm]	f residual [mm]
V1	04 / 04 / 2007	2,145	18,02	19,00	4,29
V8			19,12	19,89	3,93
V4	10 / 04 / 2007	2,157	17,08	18,79	3,63
V5			17,38	18,36	3,38
V6	11 / 04 / 2007	2,153	16,52	17,26	3,71
V7			15,41	16,12	1,02
V12	17 / 04 / 2007	2,133	-	19,50	4,5
V13			-	20,8	5,8

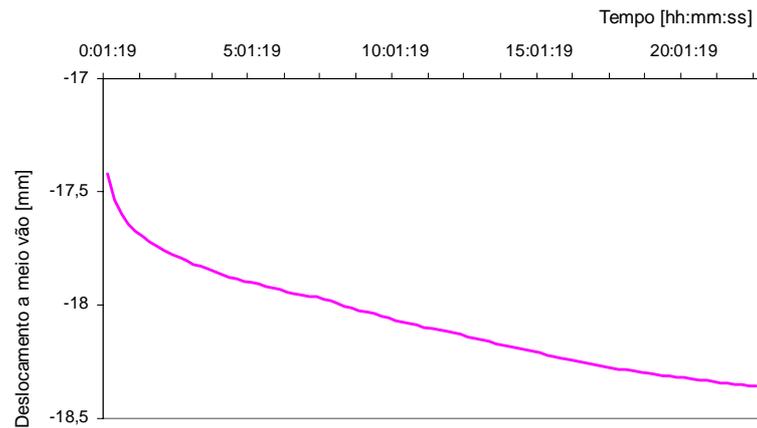


Figura 4. 17 – Deformação das vigas, a meio vão, ao longo do tempo.

No entanto, na primeira colagem dos laminados, nas vigas V1 e V8, as coisas não correram como se esperava e não foi possível induzir qualquer pré-esforço a estas vigas.



O que aconteceu foi que, ao se colocarem os apoios da viga de distribuição sobre a viga de madeira, e necessariamente sobre os laminados colados à viga de madeira, os laminados ficaram trilhados e impossibilitados de deslizar. Com a deformação da viga de madeira, em vez de acompanharem a sua superfície, no terço central, zona em que ficaram trilhados, os laminados descolaram e não se conseguiu obter o resultado pretendido.



A colagem destes laminados teve o mesmo efeito do que se obteria se se colassem os laminados a uma viga sem qualquer deformação. Estas vigas apenas foram reforçadas com laminados de carbono e também foram ensaiadas, incluindo-se assim uma nova série no programa de ensaios e obtendo-se uma maior variedade de dados para comparação.



Figura 4. 18 – Elementos adicionados para permitir o escorregamento do laminado. Apoio que permite o escorregamento e apoio que não permite o escorregamento.

Para resolver este problema as vigas seguintes contaram com umas pequenas chapas que libertavam o laminado da carga, sendo esta aplicada apenas na superfície de madeira. As chapas foram aplicadas em ambos os apoios, para que a inclusão deste novo elemento não causasse desequilíbrio à estrutura já montada. No entanto, esta liberdade foi apenas concedida em um apoio (Figura 4.18).

4.3.2 Vigas rehabilitadas após cedência

As vigas rehabilitadas após cedência foram as da série de referência, depois de ensaiadas. Esperava-se com esse tratamento conferir-lhes alguma resistência, contando para isso com o reforço dos laminados CFRP.

Depois de ensaiadas, as vigas de referência (Figura 4.19) apresentavam uma curvatura provocada pelas lâminas e/ou fibras de madeira que se separaram e depois não conseguiram voltar à posição inicial. Esta deformação foi minimizada o mais possível, sujeitando a viga a carga que contrariasse esta deformação, com o máximo cuidado para que não sofresse danos maiores.



Figura 4. 19 – Vigas após cedência (série referência).

Colaram-se as lâminas de madeira que se soltaram, com uma cola genérica indicada para madeira e aplicou-se pressão sobre a viga para um melhor contacto entre as faces a colar (Figura 4.20 e 4.21). As vigas ficaram nesta condição durante 24 horas.

Esta operação tinha como objectivo conferir alguma coesão à secção da viga, já que não se pretendia que esta pudesse contar com praticamente toda a sua secção para resistir ao esforço transversal.



Figura 4. 20 – Aplicação da cola genérica.



Figura 4. 21 – Colagem da viga, sujeita à aplicação de carga para eliminação da deformação.

Depois de aliviadas, no entanto, algumas lâminas de madeira ainda estavam soltas.

Estas lâminas foram cortadas e removidas na sua totalidade, de modo a não permitir a existência de vazios inacessíveis no interior da viga. Os espaços originados pela remoção das lâminas foram preenchidos com uma resina epoxy indicada para trabalhos de enchimento. Tratou-se de uma resina da empresa Sika®, designada comercialmente por Icosit® K 101 (Figura 4.22).

Depois de reconstituída a viga, o laminado foi colado. O laminado aplicado nesta série, como já foi referido, apresentava um comprimento menor do que o aplicado nas outras séries (Figura 4.23).



Figura 4. 22 - Icosit® K 101

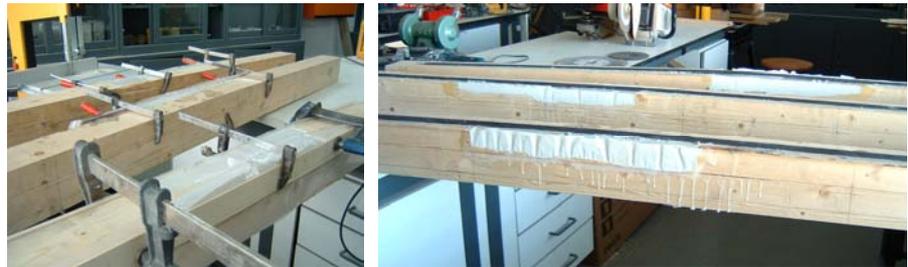


Figura 4. 23 – Preenchimento dos vazios com Icosit e posterior colagem dos laminados.

4.3.3 Vigas reabilitadas após corte a meio vão

Nesta série, as vigas foram sujeitas a um corte de meia secção, desde a face inferior até ao plano médio, a meio vão (Figura 4.25).

De seguida, o laminado foi colado na face inferior da viga, do mesmo lado em que foi cortada (Figura 4.24).



Figura 4. 24 – Colagens dos laminados nas vigas cortadas a meio vão.



Figura 4. 25 - Corte da face inferior até ao eixo neutro, a meio vão.

4.4 Sistema de ensaio e equipamento

Os ensaios para a determinação da resistência à flexão foram realizados num pórtico, de forma semelhante ao ensaio de determinação do módulo de elasticidade.

O respectivo ensaio é regulamentado igualmente pela Norma EN 408:2003, sendo praticamente igual ao do módulo de elasticidade, excepto no carregamento. O esquema de ensaio está representado na Figura 4.4.

Para a determinação da resistência à flexão, a norma estabelece que:

- A carga deve ser aplicada a uma velocidade constante, de tal modo que a carga máxima se atinja em (300 ± 120) segundos. [28]

Os ensaios foram realizados num pórtico metálico, com uma configuração conforme o estabelecido pela norma. O carregamento foi efectuado por um actuador de 100 toneladas. Com este equipamento foi possível controlar o ensaio de uma forma computadorizada, estabelecendo velocidades quer com uma taxa constante de força ou de deslocamento quer por programação de curvas de carregamentos. Os dados obtidos foram os valores da força e da deformação ao longo do tempo. A deformação medida eram referente ao deslocamento do actuador.

Todo o ensaio foi monitorizado pelos dados obtidos pelo actuador e por seis transdutores de deslocamento (LVDTs). Estes destinavam-se a medir os deslocamentos ao longo do eixo, sendo posicionados um ao centro e dois nos pontos de aplicação da carga. A medição destes deslocamentos foi efectuada pelo eixo neutro e em ambas as faces, obtendo-se o deslocamento do eixo através da média das duas leituras.

O equipamento utilizado nos ensaios está apresentado nas Figuras 4.26 e 4.27.

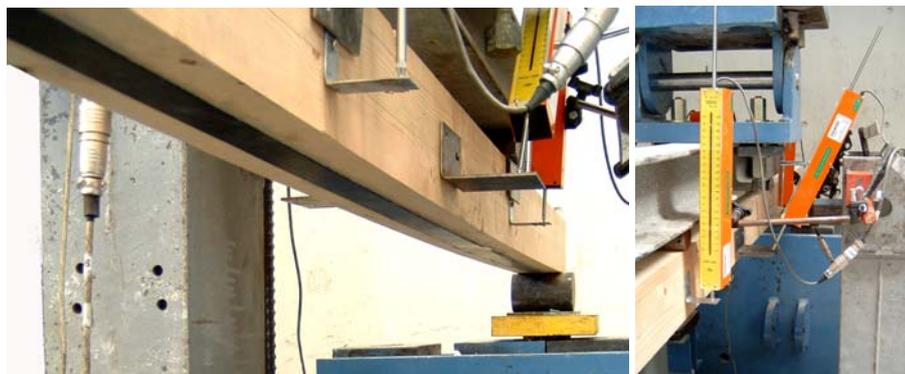


Figura 4. 26 – Disposição dos transdutores de deslocamento LVDTs.



Figura 4. 27 – Pórtico onde foram feitos os ensaios.

Os transdutores de deslocamento, todos da marca TML, eram os seguintes:

- 3 do tipo SDP-200D, com capacidade de leitura de deslocamentos até 200 mm, com uma sensibilidade de $50 \times 10^6 \text{ } \epsilon/\text{mm}$;
- 1 do tipo SDP-200R, com capacidade de leitura de deslocamentos até 200 mm, com uma sensibilidade de $100 \times 10^6 \text{ } \epsilon/\text{mm}$;
- 1 do tipo SDP-100C, com capacidade de leitura de deslocamentos até 100 mm e
- 1 do tipo CDP-100, com capacidade de leitura de deslocamentos até 100 mm, com uma sensibilidade de $100 \times 10^6 \text{ } \epsilon/\text{mm}$.



Figura 4. 28 - Transdutores de deslocamento tipo CDP [32]



Figura 4. 29 - Transdutores de deslocamento tipo SDP [33]

4.5 Estudo analítico - Pré-avaliação dos resultados esperados

O modelo de cálculo descrito de seguida foi o usado para estimar a capacidade resistente das vigas das várias séries, que foram ensaiadas posteriormente à flexão.

A madeira tinha as seguintes propriedades:

- Dimensões:
comprimento de 2100 mm, altura de 110 mm e largura de 90 mm
- Valores característicos, segundo a Norma EN 1194, de GL24h:
 $E_m = 11600 \text{ N/mm}^2$
 $f_{c,k} = 24 \text{ N/mm}^2$, $f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2$
Consideraram-se os valores médios 33% superiores aos valores característicos [24]:
 $f_{c,mean} = 31,92 \text{ N/mm}^2$, $f_{m,mean} = 31,92 \text{ N/mm}^2$
Extensão na rotura de

$$\varepsilon_t = \frac{f_m}{E} = \frac{31,92}{11600} = 0,275\%$$

Extensão de cedência da face comprimida

$$\varepsilon_c = \frac{f_c}{E} = \frac{31,92}{11600} = 0,275\%$$

O laminado FRP apresentava as seguintes propriedades mecânicas:

- Dimensões:
comprimento de 2100 mm, altura de 1,4 mm e largura de 30 mm
 $E = 165 \text{ kN/mm}^2$

4.5.1 Cálculo do momento resistente de uma viga de madeira sem reforço

$$A_g = b_g \cdot h_g = 90 \cdot 110 = 9900 \text{ mm}^2$$

$$I_g = \frac{b_g \cdot h_g^3}{12} = \frac{90 \cdot 110^3}{12} = 9982500 \text{ mm}^4$$

$$M = \frac{f_{m,g,m} \cdot I_g}{\frac{h_g}{2}} = \frac{1,33 \cdot 24 \cdot 9982500}{110/2} = 5793480 \text{ N} \cdot \text{mm} = 5,793 \text{ kN.m}$$

Cálculo da força máxima de rotura e da flecha

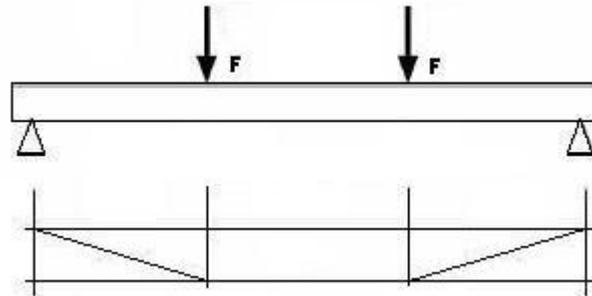


Figura 4. 30 – Diagrama da aplicação da carga e do momento flector aplicado na viga.

$$F = \frac{3M}{L_g} = \frac{3 \cdot 5,793}{2,1} = 8,276 \text{ kN} \quad 2 \cdot F = 16,553 \text{ kN} = 1687,4 \text{ kgf}$$

$$\delta = 0.0355 \frac{F \cdot L^3}{E \cdot I} = 0.0355 \frac{8,276 \cdot 10^3 \cdot (2,1 \cdot 10^3)^3}{11600 \cdot 9982500} = 23,498 \text{ mm}$$

4.5.2 Cálculo do momento resistente de uma viga de madeira com pré-esforço

O conceito deste modo de pré-esforço é impor à viga uma contra-flecha antes da colagem do laminado CFRP. Este sistema de contra-flecha permite facilmente a introdução de um pré-esforço *in situ* e resolve o problema da delaminação, uma vez que o momento introduzido apresenta uma forma trapezoidal.

Momento a aplicar para colar o laminado

$$\sigma = 90\% \cdot f_{m,g,k} = 0,9 \cdot 24 = 21,6 \text{ N/mm}^2$$

$$M = \frac{\sigma \cdot I_g}{\frac{h_g}{2}} = -\frac{21,6 \cdot 9982500}{\frac{110}{2}} = -3920400 \text{ N} \cdot \text{mm} = -3,920 \text{ kN.m}$$

Extensão elástica de compressão

$$\varepsilon_{c,g} \% = \frac{\sigma_{m,g}}{E} \cdot 100 = \frac{-21,6}{11600} \cdot 100 = -0,1862\%$$

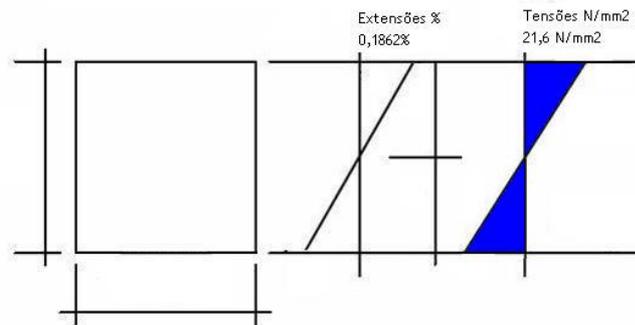


Figura 4. 31 – Estado de tensão da viga para a colagem do laminado.

Cálculo da força e da deformação para a colagem das fibras

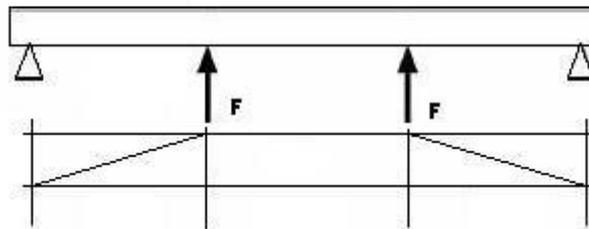


Figura 4. 32 - Diagrama da aplicação da carga e do momento flector aplicado à viga.

$$F = \frac{3M}{L_g} = \frac{3 \cdot 3,920}{2,1} = 5,601kN \quad 2 \cdot F = 11,201kN = 1141,8kgf$$

$$\delta = 0.0355 \frac{F \cdot L_g^3}{E \cdot I} = 0.0355 \frac{5,601 \cdot 10^3 \cdot (2,1 \cdot 10^3)^3}{11600 \cdot 9982500} = 15,901mm$$

Secção composta

Laminado CFRP: 2100x1,4x30

$$A_f = b_f \cdot h_f = 1,4 \cdot 30 = 42mm^2$$

Percentagem de reforço: $\rho = \frac{A_f}{A_g} \cdot 100 = \frac{42}{9900} \cdot 100 = 0,424\%$

Coefficiente de homogeneização: $\alpha = \frac{E_f}{E_g} = \frac{165000}{11600} = 14,2$

Secção de reforço homogeneizada

$$b_{fi} = b_f \cdot \alpha = 30 \cdot 14,22 = 426,72mm$$

$$A_{fi} = b_{fi} \cdot h_f = 1,4 \cdot 426,72 = 597,41mm^2$$

Secção homogeneizada

$$A_i = A_g + A_{fi} = A_g + A_f \cdot \alpha = 9900 + 597,41 = 10497,41 \text{ mm}^2$$

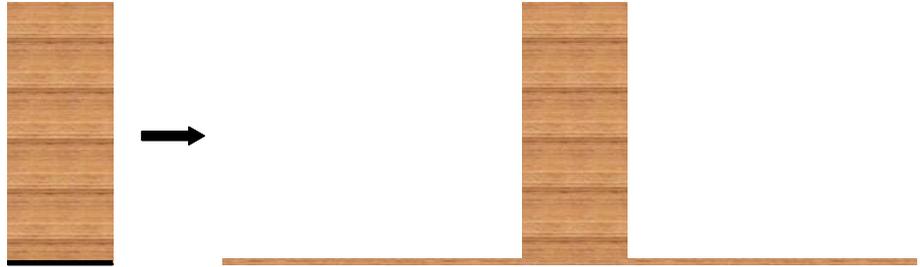


Figura 4. 33 – Transformação da secção em secção homogeneizada

Posição do eixo neutro (a partir do topo da viga)

$$x = \frac{A_{fi} \cdot \left(\frac{h_f}{2} + h_g\right) + A_g \cdot \frac{h_g}{2}}{A_i} =$$

$$x = \frac{597,41 \cdot \left(\frac{1,4}{2} + 110\right) + 9900 \cdot \frac{110}{2}}{10497,41} = 58,17 \text{ mm}$$

Momento de inércia no eixo neutro da secção homogeneizada

$$I_i = \frac{b_g \cdot x^3}{3} + \frac{b_g \cdot (h_g - x)^3}{3} + A_{fi} \cdot \left(\frac{h_f}{2} + h_g - x\right)^2$$

$$I_i = \frac{90 \cdot 58,17^3}{3} + \frac{90 \cdot (110 - 58,17)^3}{3} + 597,41 \cdot \left(\frac{1,4}{2} + 110 - 58,17\right)^2$$

$$I_i = 11730488,27 \text{ mm}^4$$

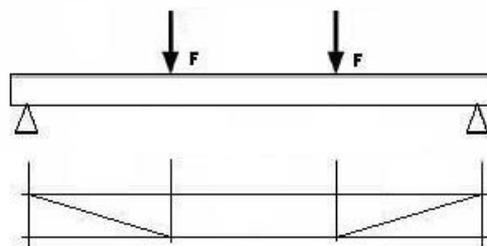
Secção homogeneizada sujeita a um carregamento contrário

Figura 4. 34 – Diagrama da aplicação da carga e do momento fletor aplicado para a rotura da viga.

$$F = 5,601 \text{ kN}$$

$$M = \frac{FL_g}{3} = \frac{5,601 \cdot 2,1}{3} = 3,920 \text{ kN.m}$$

$$\sigma = 90\% \cdot f_{m,g,k} = 0,9 \cdot 24 = 21,6 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_c = \frac{M \cdot y}{I_i} = -\frac{3920400 \cdot 58,17}{11730488,27} = -19,44 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_t = \frac{M \cdot y}{I_i} = \frac{3920400 \cdot (111,4 - 58,17)}{11730488,27} = 17,79 \text{ N/mm}^2$$

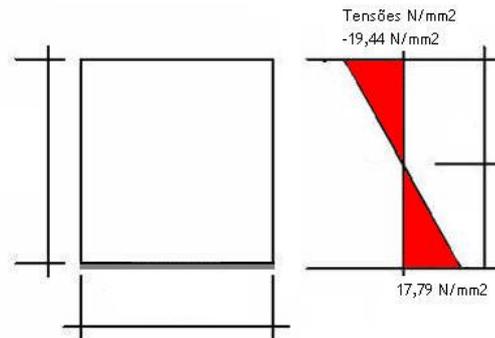


Figura 4. 35 – Estado de tensão para uma viga sujeita a um carregamento contrário.

Soma dos estados de tensão após a colagem e o alívio da carga

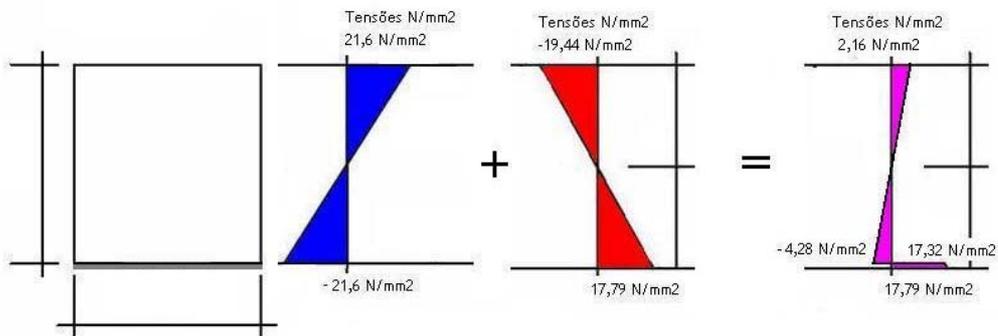


Figura 4. 36 – Estado de tensão resultante, na secção a meio vão.

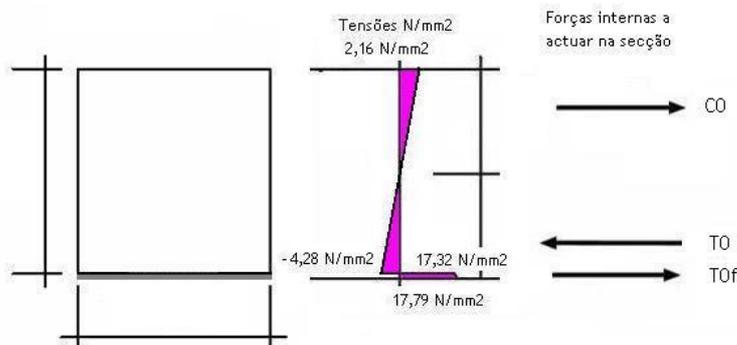


Figura 4. 37 – Forças internas provocadas pelo estado de tensão.

Com o novo estado de tensão o eixo neutro deixa de ser a 58,17mm do topo da viga, sendo necessário recalculá-la sua posição.

Posição do novo eixo neutro (a partir do topo da viga)

$$x = \frac{\sigma_c \cdot h_g}{|\sigma_c| + |\sigma_{interface}|} = \frac{2,15926 \cdot 110}{2,15926 + 4,27807} = 36,90 \text{ mm}$$

$$C_0 = \sigma_c \cdot b_g \cdot x \cdot \frac{1}{2} = 2,15926 \cdot 90 \cdot 36,90 \cdot \frac{1}{2} = 3585 \text{ N} = 3,585 \text{ kN}$$

$$T_0 = \sigma_t \cdot b_g \cdot (h_g - x) \cdot \frac{1}{2} = 4,27807 \cdot 90 \cdot (110 - 36,90) \cdot \frac{1}{2} = 14073 \text{ N}$$

$$T_{0f} = \frac{17,32 + 17,79}{2} \cdot b_{fi} \cdot h_f = 17,55 \cdot 426,72 \cdot 1,4 = 10488 \text{ N} = 10,49 \text{ kN}$$

Cálculo da força de rotura

O cálculo das forças a actuar na secção será feito de uma maneira iterativa até se estabelecer um equilíbrio. Para esse cálculo entrar-se-á em conta com as forças internas residuais da secção, sobrepondo-as às originadas pela flexão da secção homogeneizada.

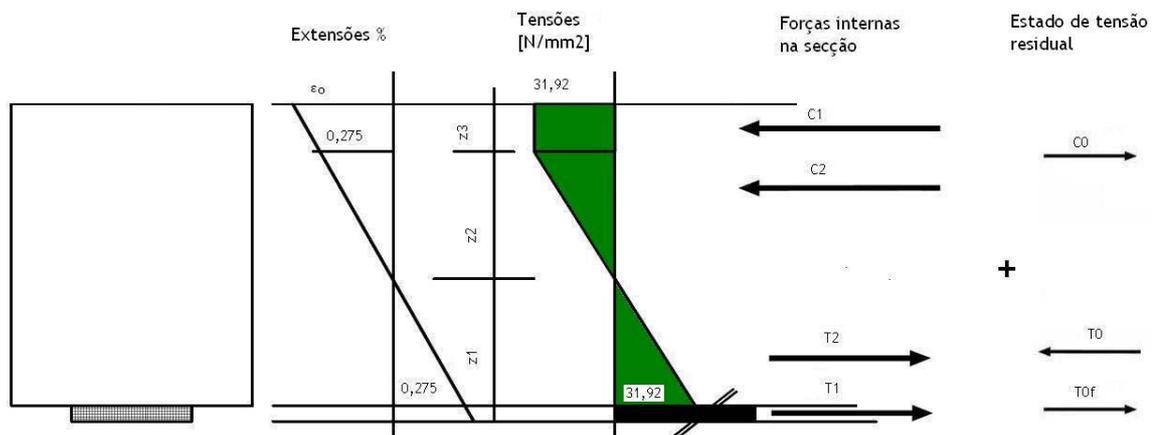


Figura 4. 38 – Forças internas a actuar na secção, a meio vão.

Considerando que:

$$x = z2 + z3 = 58,17 \text{ mm}$$

$$z1 = h_g - x = 110 - 58,17 = 51,83 \text{ mm}$$

$$z2 = z1 = 51,83 \text{ mm}$$

$$z3 = h_g - 2 \cdot z1 = 6,34 \text{ mm}$$

A extensão máxima na face superior é:

$$\varepsilon\% = \frac{\varepsilon_{c,g} \cdot (z_2 + z_3)}{z_2} = \frac{0,275\% \cdot (51,83 + 6,34)}{51,83} = 0,309\%$$

A extensão no laminado (a adicionar à do pré-esforço) é:

$$\varepsilon\% = \frac{\varepsilon_{m,g} \cdot \left(z_1 + \frac{h_f}{2}\right)}{z_1} = \frac{0,275\% \cdot (51,83 + 0,7)}{51,83} = 0,279\%$$

Tensão adicional no laminado

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_f = 165000 \cdot \frac{0,279}{100} = 460,17 \text{ N/mm}^2$$

Forças internas:

Face comprimida da madeira

$$C_0 = -3,585 \text{ kN}$$

$$C_1 = z_3 \cdot b \cdot f_{c,0,m} = 6,34 \cdot 90 \cdot \frac{31,92}{1000} = 18,21 \text{ kN}$$

$$C_2 = 0,5 \cdot z_2 \cdot b \cdot f_{c,0,m} = 0,5 \cdot 51,83 \cdot 90 \cdot \frac{31,92}{1000} = 74,45 \text{ kN}$$

$$C_{total} = C_0 + C_1 + C_2 = 89,08 \text{ kN}$$

Face traccionada da madeira

$$T_0 = -14,073 \text{ kN}$$

$$T_2 = 0,5 \cdot z_1 \cdot b \cdot f_{m,0,m} = 0,5 \cdot 51,83 \cdot 90 \cdot \frac{31,92}{1000} = 74,45 \text{ kN}$$

Tracção no laminado

$$T_{0f} = 10,488 \text{ kN}$$

$$T_1 = \sigma_f \cdot A_f = 460,17 \cdot 42 = 19,33 \text{ kN}$$

$$T_{total} = T_0 + T_{0f} + T_1 + T_2 = 90,19 \text{ kN}$$

Uma vez que as forças de compressão e tracção são diferentes deve fazer-se de novo o cálculo para um novo valor de x (neste caso deverá ser maior).

Com a ajuda de uma folha de cálculo, foi calculado o valor que permite a menor diferença entre as forças de compressão e tracção.

Considerando que:

$$z1 = z2 = 51,64 \text{ mm}$$

$$z3 = h_g - 2 \cdot z1 = 6,72 \text{ mm}$$

A extensão máxima na face superior é:

$$\varepsilon\% = \frac{\varepsilon_{c,g} \cdot (z2 + z3)}{z2} = \frac{0,275\% \cdot (51,64 + 6,72)}{51,64} = 0,311\%$$

A extensão no laminado (a adicionar à do pré-esforço) é:

$$\varepsilon\% = \frac{\varepsilon_{m,g} \cdot \left(z1 + \frac{h_f}{2}\right)}{z1} = \frac{0,275\% \cdot (51,64 + 0,7)}{51,64} = 0,279\%$$

Tensão adicional no laminado

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_f = 165000 \cdot \frac{0,279}{100} = 460,19 \text{ N/mm}^2$$

Forças internas:

Face comprimida da madeira

$$C_0 = -3,585 \text{ kN}$$

$$C_1 = z_3 \cdot b \cdot f_{c,0,m} = 6,72 \cdot 90 \cdot \frac{31,92}{1000} = 19,31 \text{ kN}$$

$$C_2 = 0,5 \cdot z_2 \cdot b \cdot f_{c,0,m} = 0,5 \cdot 51,64 \cdot 90 \cdot \frac{31,92}{1000} = 74,18 \text{ kN}$$

$$C_{total} = C_0 + C_1 + C_2 = 89,90 \text{ kN}$$

Face traccionada da madeira

$$T_0 = -14,073 \text{ kN}$$

$$T_2 = 0,5 \cdot z_1 \cdot b \cdot f_{m,0,m} = 0,5 \cdot 51,64 \cdot 90 \cdot \frac{31,92}{1000} = 74,18 \text{ kN}$$

Tracção no laminado

$$T_{0f} = 10,488 \text{ kN}$$

$$T_1 = \sigma_f \cdot A_f = 460,19 \cdot 42 = 19,33 \text{ kN}$$

$$T_{total} = T_0 + T_{0f} + T_1 + T_2 = 89,92 \text{ kN}$$

Agora que as forças de compressão e tracção são praticamente iguais, não é necessário continuar com o processo iterativo.

O ponto de aplicação de cada uma das forças pode ser determinado por considerações geométricas.

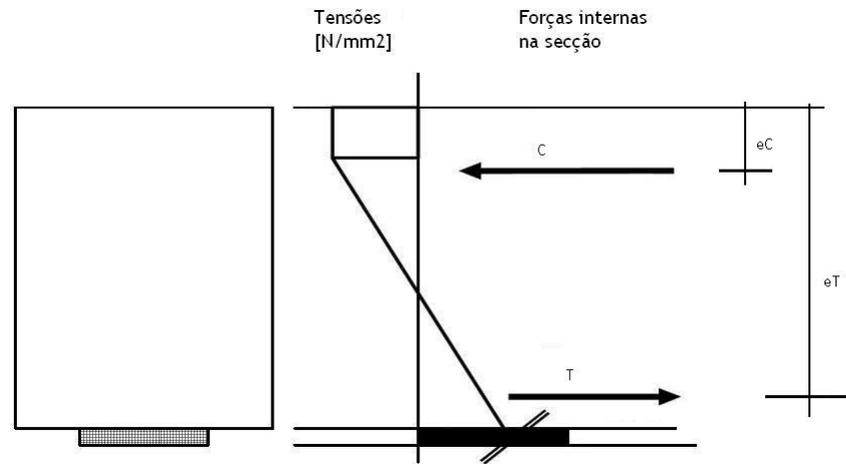


Figura 4. 39 – Definição da localização do ponto de aplicação das forças internas.

$$e_c = \frac{C_0 \cdot 36,90/3 + C_1 \cdot z_3/2 + C_2 \cdot (z_3 + z_2/3)}{\sum C} = 19,979mm$$

$$e_T = \frac{T_0 \cdot \frac{(110 - 36,90) \cdot 2}{3} + (T_{0f} + T_1) \cdot (h_g + \frac{h_f}{2}) + T_2 \cdot (z_3 + z_2 + \frac{z_1 \cdot 2}{3})}{\sum T}$$

$$e_T = 105,621mm$$

Podemos agora calcular o momento de rotura

$$M_U = C \cdot (e_T - e_c) = T \cdot (e_T - e_c)$$

$$M_U = 89,90 \cdot \frac{(105,621 - 19,979)}{1000} = 7,699kN.m$$

Cálculo da força máxima de rotura e da flecha

$$F = \frac{3M}{L_g} = \frac{3 \cdot 7,699}{2,1} = 10,998kN \quad 2 \cdot F = 21,997kN = 2242,3kgf$$

Uma vez que o cálculo do valor da flecha apenas tem valor indicativo, foi utilizada uma equação simplificada para regime elástico, mesmo tratando-se, neste caso, de um regime elasto-plástico. Para isso considerou-se o momento de inércia da seção homogeneizada em regime elástico.

$$\delta = 0.0355 \frac{F \cdot L^3}{E \cdot I} = 0.0355 \frac{10,998 \cdot 10^3 \cdot (2,1 \cdot 10^3)^3}{11600 \cdot 11730488,27} = 26,20 \text{ mm}$$

Verificação ao esforço transversal – Tensão tangencial na interface

$$\tau = \frac{V \cdot S}{I \cdot b_f}$$

$$V = F = 10,998 \text{ kN}$$

$$S = A_{fi} \cdot d = A_{fi} \cdot (z1 + \frac{h_f}{2}) = 597,41 \cdot (51,64 + 0,7) = 31268,64 \text{ mm}^3$$

$$\tau = \frac{10,998 \cdot 10^3 \cdot 31268,64}{11730867,55 \cdot 30} = 0,977 \text{ N/mm}^2 < 2,7 \text{ N/mm}^2 \quad \checkmark$$

Uma vez que o momento introduzido apresenta uma forma trapezoidal, a tensão de corte na interface é constante e reduzida. A tensão induzida ao laminado não é constante ao longo do seu comprimento, tendo o seu valor mais alto entre os pontos de aplicação da carga.

4.5.3 Cálculo do momento resistente de uma viga de madeira reforçada em boas condições

Área da secção homogeneizada

$$A_i = A_g + A_{fi} = A_g + A_f \cdot \alpha = 9900 + 597,41 = 10497,41 \text{ mm}^2$$

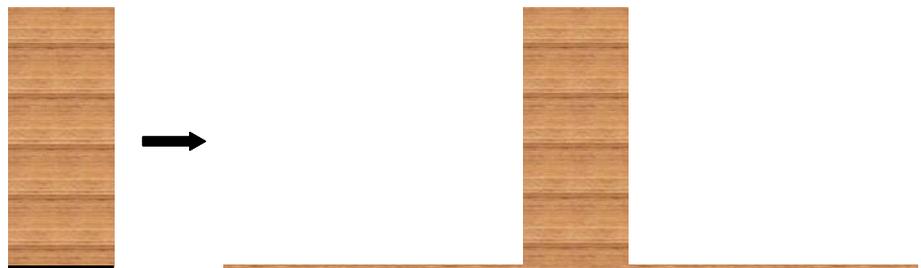


Figura 4. 40 – Transformação da secção em secção homogeneizada

Posição do eixo neutro (a partir do topo da viga)

$$x = \frac{A_{fi} \cdot (\frac{h_f}{2} + h_g) + A_g \cdot \frac{h_g}{2}}{A_i} = \frac{597,41 \cdot (\frac{1,4}{2} + 110) + 9900 \cdot \frac{110}{2}}{10497,41} = 58,17 \text{ mm}$$

$$I_i = \frac{b_g \cdot x^3}{3} + \frac{b_g \cdot (h_g - x)^3}{3} + A_{f1} \cdot \left(\frac{h_f}{2} + h_g - x\right)^2$$

$$I_i = \frac{90 \cdot 58,17^3}{3} + \frac{90 \cdot (110 - 58,17)^3}{3} + 597,41 \cdot \left(\frac{1,4}{2} + 110 - 58,17\right)^2$$

$$I_i = 11730488,27 \text{ mm}^4$$

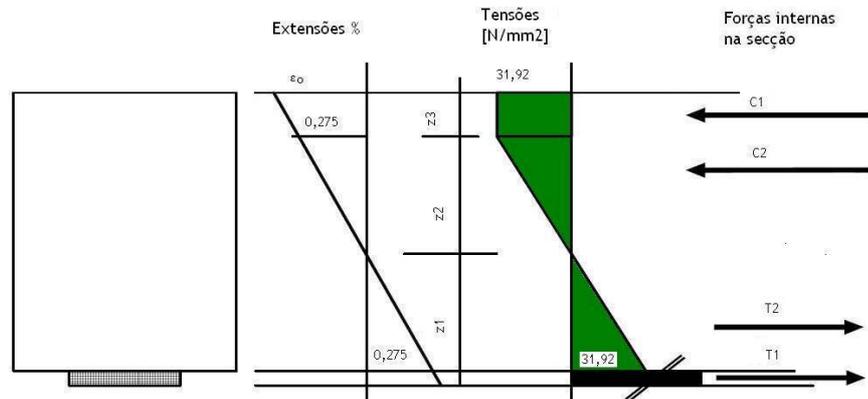


Figura 4. 41 - Forças internas a actuar na secção, a meio vão.

Com a ajuda de uma folha de cálculo, foi calculado o valor que permite a menor diferença entre as forças de compressão e tracção.

Considerando que:

$$x = z2 + z3$$

$$z1 = z2 = 51,6 \text{ mm}$$

$$z3 = h_g - 2 \cdot z1 = 6,8 \text{ mm}$$

A extensão máxima na face superior é:

$$\varepsilon\% = \frac{\varepsilon_{c,g} \cdot (z2 + z3)}{z2} = \frac{0,275\% \cdot (51,6 + 6,8)}{51,6} = 0,311\%$$

A extensão no laminado é:

$$\varepsilon\% = \frac{\varepsilon_{m,g} \cdot \left(z1 + \frac{h_f}{2}\right)}{z1} = \frac{0,275\% \cdot (51,6 + 0,7)}{51,6} = 0,279\%$$

Tensão adicional no laminado

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_f = 165000 \cdot \frac{0,279}{100} = 460,47 \text{ N/mm}^2$$

Forças internas:

Face comprimida da madeira

$$C_1 = z_3 \cdot b \cdot f_{c,0,m} = 6,8 \cdot 90 \cdot \frac{31,92}{1000} = 19,53kN$$

$$C_2 = 0,5 \cdot z_2 \cdot b \cdot f_{c,0,m} = 0,5 \cdot 51,6 \cdot 90 \cdot \frac{31,92}{1000} = 74,12kN$$

$$C_{total} = C_1 + C_2 = 93,65kN$$

Face traccionada da madeira

$$T_2 = 0,5 \cdot z_1 \cdot b \cdot f_{m,0,m} = 0,5 \cdot 51,6 \cdot 90 \cdot \frac{31,92}{1000} = 74,12kN$$

Tracção no laminado

$$T_1 = \sigma_f \cdot A_f = 460,19 \cdot 42 = 19,33kN$$

$$T_{total} = T_1 + T_2 = 93,45kN$$

Como as forças de compressão e tracção são praticamente iguais, não é necessário continuar com o processo iterativo.

O ponto de aplicação de cada uma das forças pode ser determinado por considerações geométricas.

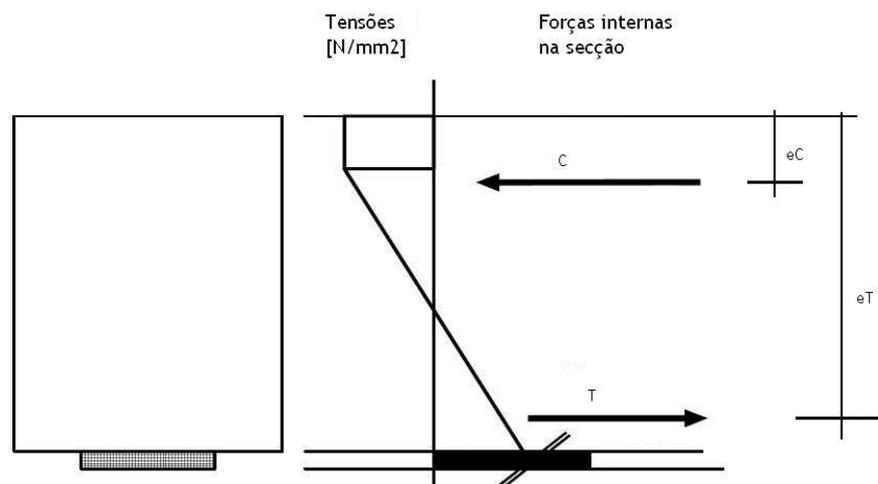


Figura 4. 42 – Definição da localização do ponto de aplicação das forças internas.

$$e_c = \frac{C_1 \cdot \frac{z_3}{2} + C_2 \cdot \left(z_3 + \frac{z_2}{3} \right)}{\sum C} = 19,70mm$$

$$e_T = \frac{T_1 \cdot (h_g + \frac{h_r}{2}) + T_2 \cdot (z_3 + z_2 + \frac{z_1 \cdot 2}{3})}{\sum T} = 96,50 \text{ mm}$$

Podemos agora calcular o momento de rotura

$$M_U = C \cdot (e_T - e_c) = T \cdot (e_T - e_c) = 93,65 \cdot \frac{(96,50 - 19,70)}{1000} = 7,193 \text{ kN}$$

Cálculo da força máxima de rotura e da flecha

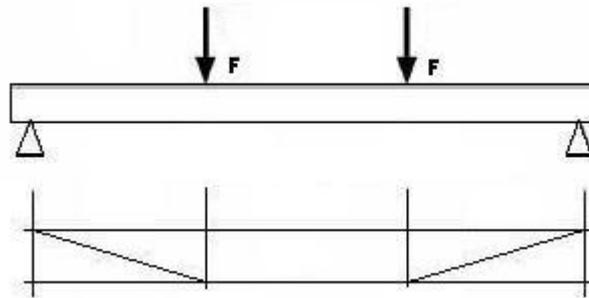


Figura 4. 43 – Diagrama da aplicação da carga e do momento flector aplicado na viga.

$$F = \frac{3M}{L_g} = \frac{3 \cdot 7,193}{2,1} = 10,275 \text{ kN} \quad 2 \cdot F = 20,550 \text{ kN} = 2094,8 \text{ kgf}$$

A flecha foi calculada de forma semelhante à da secção 4.5.2. Considerou-se o momento de inércia da secção homogeneizada em regime elástico.

$$\delta = 0.0355 \frac{F \cdot L^3}{E \cdot I} = 0.0355 \frac{10,275 \cdot 10^3 \cdot (2,1 \cdot 10^3)^3}{11600 \cdot 11730488,27} = 24,83 \text{ mm}$$

4.5.4 Cálculo do momento resistente de uma viga de madeira reabilitada depois de ter sido ensaiada

Os valores da resistência das vigas reabilitadas não foram calculados por não ser possível contabilizar os estragos por elas sofridos.

Apenas se consideraram os valores obtidos nos ensaios e com estes fizeram-se análises e comparações entre os resultados obtidos.

4.5.5 Cálculo do momento resistente de uma viga de madeira reabilitada depois de ter sido cortada

$$A_g = b_g \cdot h_g = 90 \cdot 55 = 4950 \text{ mm}^2$$



Figura 4. 44 – Transformação da secção em secção homogeneizada.

Área da secção homogeneizada

$$A_i = A_g + A_{fi} = A_g + A_f \cdot \alpha = 4950 + 597,41 = 5547,41 \text{ mm}^2$$

Posição do eixo neutro (a partir do topo da viga)

$$x = \frac{A_{fi} \cdot \left(\frac{h_f}{2} + 110\right) + A_g \cdot \frac{h_g}{2}}{A_i}$$

$$x = \frac{597,41 \cdot \left(\frac{1,4}{2} + 110\right) + 4950 \cdot \frac{55}{2}}{5547,41} = 36,46 \text{ mm}$$

Momento de inércia no eixo neutro

$$I_i = \frac{b_g \cdot x^3}{3} + \frac{b_g \cdot (h_g - x)^3}{3} + A_{fi} \cdot \left(\frac{h_f}{2} + 110 - x\right)^2$$

$$I_i = \frac{90 \cdot 36,46^3}{3} + \frac{90 \cdot (55 - 36,46)^3}{3} + 597,41 \cdot \left(\frac{1,4}{2} + 110 - 36,46\right)^2$$

$$I_i = 4937898,90 \text{ mm}^4$$

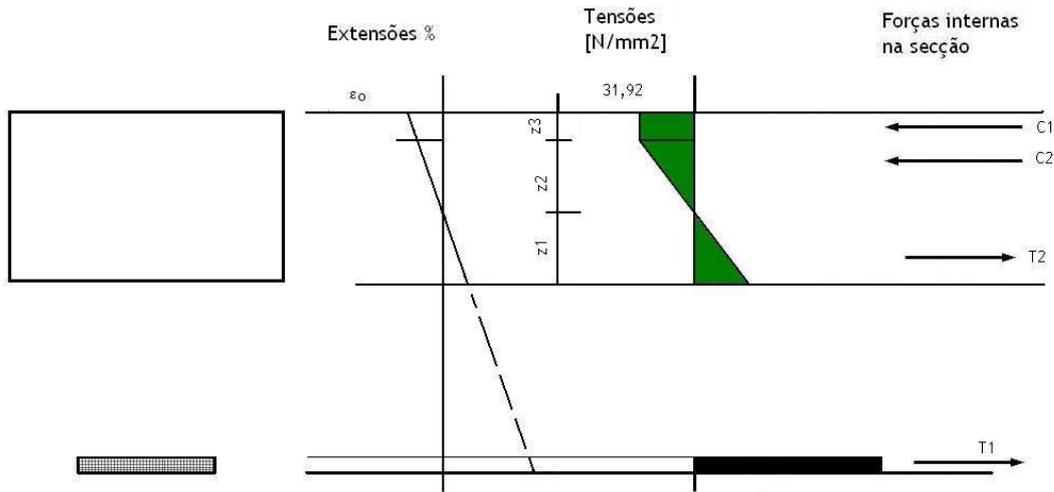


Figura 4. 45 - Forças internas a actuar na secção, a meio vão.

Com a ajuda de uma folha de cálculo, foi calculado o valor que permite a menor diferença entre as forças de compressão e tracção.

Considerando que:

$$z1 = z2 = 24,1mm$$

$$z3 = h_g - 2 \cdot z1 = 6,8mm$$

A extensão máxima na face superior é:

$$\varepsilon\% = \frac{\varepsilon_{c,g} \cdot (z2 + z3)}{z2} = \frac{0,275\% \cdot (24,1 + 6,8)}{24,1} = 0,353\%$$

A extensão no laminado (a adicionar à do pré-esforço) é:

$$\varepsilon\% = \frac{\varepsilon_{m,g} \cdot \left(z1 + 55 + \frac{h_f}{2}\right)}{z1 + 55} = \frac{0,275\% \cdot (24,1 + 55 + 0,7)}{24,1 + 55} = 0,278\%$$

Tensão adicional no laminado

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_f = 165000 \cdot \frac{0,278}{100} = 458,05 N/mm^2$$

Forças internas:

Face comprimida da madeira

$$C_1 = z_3 \cdot b \cdot f_{c,0,m} = 6,8 \cdot 90 \cdot \frac{31,92}{1000} = 19,53kN$$

$$C_2 = 0,5 \cdot z_2 \cdot b \cdot f_{c,0,m} = 0,5 \cdot 21,4 \cdot 90 \cdot \frac{31,92}{1000} = 34,62kN$$

$$C_{total} = C_1 + C_2 = 94,15kN$$

Face traccionada da madeira

$$T_2 = 0,5 \cdot z_1 \cdot b \cdot f_{m,0,m} = 0,5 \cdot 21,4 \cdot 90 \cdot \frac{31,92}{1000} = 34,62 \text{ kN}$$

Tracção no laminado

$$T_1 = \sigma_f \cdot A_f = 458,05 \cdot 42 = 19,24 \text{ kN}$$

$$T_{total} = T_1 + T_2 = 53,86 \text{ kN}$$

Como as forças de compressão e tracção são praticamente iguais, não é necessário continuar com o processo iterativo.

O ponto de aplicação de cada uma das forças pode ser determinado por considerações geométricas.

$$e_c = \frac{C_1 \cdot z_3/2 + C_2 \cdot (z_3 + z_2/3)}{\sum C} = 10,71 \text{ mm}$$

$$e_T = \frac{T_1 \cdot (110 + \frac{h_f}{2}) + T_2 \cdot (z_3 + z_2 + \frac{z_1 \cdot 2}{3})}{\sum T} = 69,73 \text{ mm}$$

Podemos agora calcular o momento de rotura

$$M_u = C \cdot (e_T - e_c) = T \cdot (e_T - e_c) = 53,86 \cdot \frac{(69,73 - 10,71)}{1000} = 3,196 \text{ kN}$$

Cálculo da força máxima de rotura e da flecha

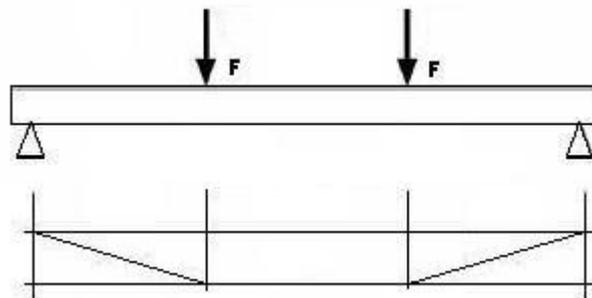


Figura 4. 46 – Diagrama da aplicação da carga e do momento flector aplicado na viga.

$$F = \frac{3M}{L_g} = \frac{3 \cdot 3,196}{2,1} = 4,566 \text{ kN} \quad 2 \cdot F = 9,132 \text{ kN} = 930,9 \text{ kgf}$$

A flecha foi calculada de forma semelhante à da secção 4.5.2. Considerou-se o momento de inércia da secção homogeneizada em regime elástico.

$$\delta = 0.0355 \frac{F \cdot L^3}{E \cdot I} = 0.0355 \frac{4,566 \cdot 10^3 \cdot (2,1 \cdot 10^3)^3}{11600 \cdot 4937877,99} = 26,21mm$$

4.5.6 Momentos resistentes estimados

Os resultados esperados para as várias séries apresentam-se resumidamente no quadro 4.5.

Quadro 4.5 – Resultados esperados para os ensaios das vigas				
Série	Característica em foco	Momento de rotura [kN.m]	Carga de rotura [kN]	Deformação na rotura, a meio vão [mm]
Série 1 – Referência	Vigas sem reforço	5,793	16,553	23,50
Série 2	Vigas intactas pré-esforçadas com CFRP	7,699	21,997	26,20
Série 3	Vigas intactas reforçadas com CFRP	7,193	20,550	24,83
Série 4	Vigas sujeitas a alguma cedência, reforçadas com CFRP	-	-	-
Série 5	Vigas cortadas a meio vão, reforçadas com CFRP	3,196	9,132	26,21

4.6 Resultados e Discussão dos Resultados

Na realização dos ensaios às vigas de tamanho estrutural foram registados os valores da carga última de rotura, da deformação da viga ao longo do plano médio e do tempo de duração do ensaio, principalmente.

Com os valores da carga última de rotura calcularam-se rácios para comparar a eficácia das várias soluções estudadas.

Esta comparação foi feita relativamente a duas referências: aos resultados esperados e à série referência. A primeira comparação teve como objectivo verificar a semelhança dos valores obtidos experimentalmente com os do estudo teórico efectuado, e assim inferir sobre a sua legitimidade. A segunda comparação é mais importante para este trabalho e teve como objectivo verificar o grau de eficiência de cada um dos sistemas de reforço utilizados. A fórmula usada para a comparação dos valores foi a seguinte:

$$\text{Ganho} = \frac{\text{Valor}_{\text{obtido}} - \text{Valor}_{\text{referência}}}{\text{Valor}_{\text{referência}}} \cdot 100[\%]$$

Calculou-se ainda a resistência à flexão, segundo a Norma EN 408:2003, considerando que a distribuição da tensão é linear e a rotura é instantânea ao longo do plano de corte. Esta equação é aplicada quando se trata de regime elástico. No entanto, foi aplicada como comparação, mesmo tratando-se, neste caso, de um regime elasto-plástico.

- A resistência à flexão (f_m) é dada pela equação:

$$f_m = \frac{a \cdot F_{\text{máx}}}{2 \cdot W}$$

Em que:

a é a distância entre um ponto de aplicação da carga e o apoio mais próximo, em milímetros;

F_{máx} é a carga obtida no ensaio, em Newton;

W é o módulo de flexão, em milímetros ao cubo. [28]

4.6.1 Resultados da série 1

A rotura destas vigas deu-se pela face traccionada, na zona intermédia da viga, entre os pontos de aplicação da carga, tendo origem normalmente em defeitos existentes nas lamelas da madeira. Em termos de ductilidade, a rotura apresentou-se frágil, como seria de esperar para vigas de madeira. A abertura de fendas propagou-se segundo a direcção das fibras ou segundo a linha de colagem entre lamelas.

Pode ver-se, nas Figuras seguintes, alguns pormenores da rotura de vigas desta série.



Figura 4. 47 – Rotura da viga V10.



Figura 4. 48 – Rotura da viga V11.

Os resultados dos ensaios apresentam-se no quadro seguinte.

No diagrama da Figura 4.49, estão representadas as curvas obtidas, para as vigas desta série, que mostram a evolução da carga aplicada em função do deslocamento a meio vão. Como se pode verificar, apresentam um comportamento aproximadamente linear, seguido de um ligeiro patamar de cedência antes da rotura.

Quadro 4.6 - Parâmetros registados nos ensaios das vigas da série 1										
Série 1	Viga n°	h [mm]	b [mm]	L [mm]	a [mm]	Dia do ensaio	F experimental [N]	Deformação [mm]	Velocidade do ensaio [kgf/s]	Duração do ensaio [s]
	V07	110	90	2100	700	13-04-2007	29340	36,67	5	641
	V09	110	90	2100	700	13-04-2007	32420	59,57	5	727
	V10	110	90	2100	700	13-04-2007	25240	34,27	5	510
	V11	110	90	2100	700	13-04-2007	30060	46,072	5	616
Totais										
Média							29265,00	44,15		
Desvio Padrão							2988,44	11,48		
Coef. Variação [%]							10,21	25,99		

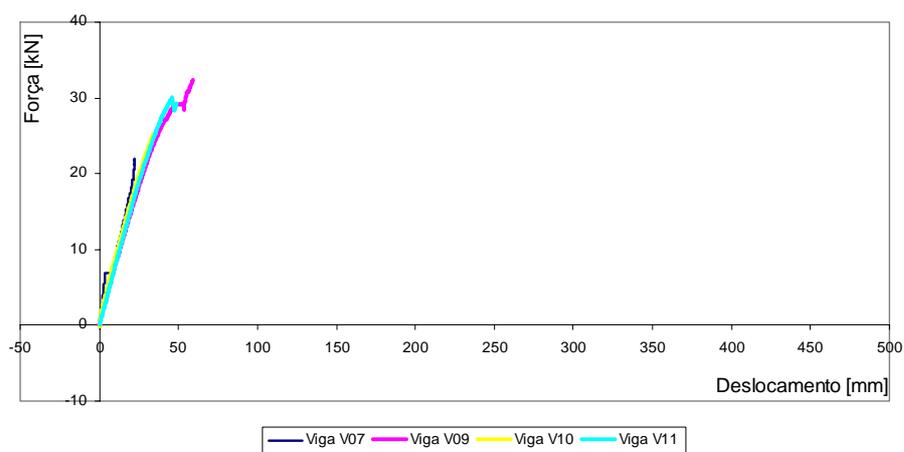


Figura 4. 49 – Gráfico força-deslocamento das vigas da série de referência do ensaio de flexão, à rotura.

4.6.2 Resultados da série 2

A rotura das vigas pré-esforçadas começou a verificar-se a meio vão, na face superior da viga, por esmagamento da zona comprimida. Com o aumento da carga, a zona traccionada também começou a ceder, tendo a rotura origem, normalmente, em defeitos existentes nas lamelas da madeira. A rotura das vigas foi brusca, a mais brusca de todas as séries, dando-se quando o laminado se separava da viga por corte. A abertura de fendas propagava-se segundo a direcção das fibras ou segundo a linha de colagem entre lamelas.

Podem ver-se, nas figuras seguintes, alguns pormenores da rotura de vigas desta série.



Figura 4. 50 – Compressão das fibras, na face superior da viga V03, depois de ensaiada.



Figura 4. 51 – Ruptura da viga V06.



Figura 4. 52 – Ruptura da viga V05. Pormenor da separação por corte do laminado.

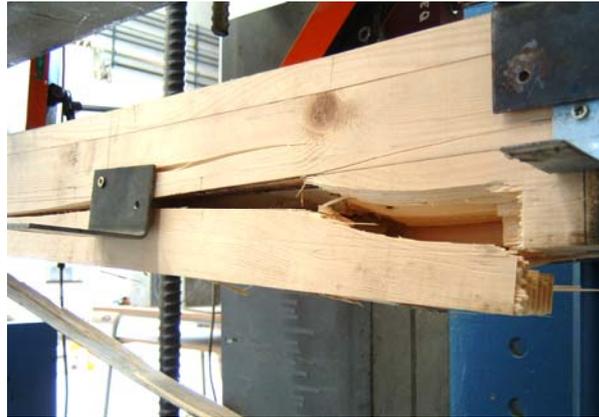


Figura 4. 53 – Rotura da viga V12, por uma ligação tipo finger joint entre lamelas.



Figura 4. 54 – Rotura da viga V13, por separação do laminado por corte.

Os resultados dos ensaios apresentam-se no quadro seguinte.

Quadro 4.7 - Parâmetros registados nos ensaios das vigas da série 2										
Série 2	Viga n°	h [mm]	b [mm]	L [mm]	a [mm]	Dia do ensaio	F experimental [N]	Deformação [mm]	Velocidade do ensaio [kgf/s]	Duração do ensaio [s]
	V02	110	90	2100	700	18-04-2007	35140	57,44	8,5	393
	V03	110	90	2100	700	18-04-2007	35460	90,03	8,5	401
	V04	110	90	2100	700	18-04-2007	38340	109,31	8,5	705
	V05	110	90	2100	700	18-04-2007	39860	92,52	8,5	459
	V06	110	90	2100	700	18-04-2007	39700	135	8,5	447
	V12	110	90	2100	700	18-04-2007	31580	53,83	8,5	356
	V13	110	90	2100	700	18-04-2007	37740	112,2	8,5	434
	Totais									
Média							36831,43	92,90		
Desvio Padrão							2967,08	29,46		
Coef. Variação [%]							8,06	31,71		

No diagrama da Figura 4.55, estão representadas as curvas obtidas para as vigas desta série, que mostram a evolução da carga aplicada em função do deslocamento a meio vão. Como se pode verificar, apresentam um comportamento aproximadamente linear com um patamar de cedência antes de ocorrer a rotura.

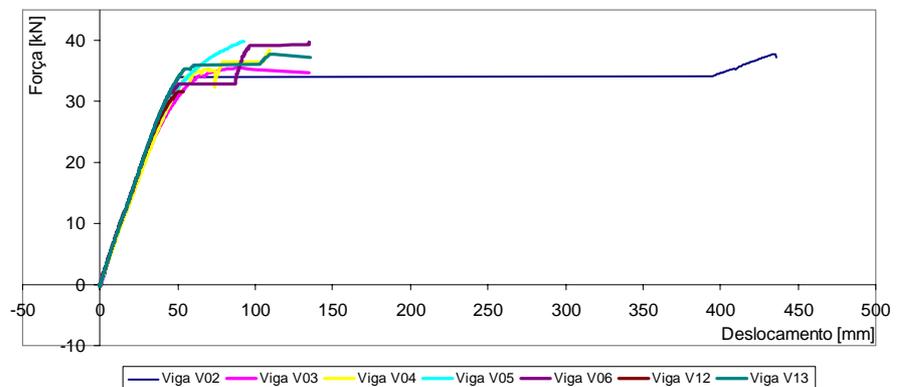


Figura 4. 55 – Gráfico força-deslocamento das vigas da série 2, do ensaio de flexão, à rotura.

4.6.3 Resultados da série 3

A rotura das vigas reforçadas, que estavam em bom estado, deu-se de uma forma semelhante à das vigas pré-esforçadas, mas apresentou valores da carga de rotura ligeiramente inferiores. A rotura começou a verificar-se a meio vão, na face superior da viga, por esmagamento da zona comprimida, e com o aumento da carga, a zona traccionada também começou a ceder, tendo a rotura origem, normalmente, em defeitos existentes nas lamelas da madeira. A rotura das vigas foi brusca, não o sendo tanto como a série anterior, dando-se igualmente quando o laminado se separava da viga por corte. A abertura de fendas propagava-se segundo a direcção das fibras ou segundo a linha de colagem entre lamelas.

Pode ver-se nas Figuras seguintes alguns pormenores da rotura de vigas desta série.



Figura 4. 56 – Rotura da viga V08.

Na viga V01 a rotura provocou a separação de uma ligação entre lamelas do tipo *finger joint*. Como se pode ver nas figuras seguintes, a ligação não apresentava qualquer tipo de cola, tornando estes pontos da viga especialmente frágeis. Esta situação já se tinha verificado em ensaios anteriores (Figura 4.53).



Figura 4. 57 – Rotura da viga V01, numa ligação finger joint.

Os resultados dos ensaios apresentam-se no quadro seguinte.

Quadro 4.8 - Parâmetros registados nos ensaios das vigas da série 3										
Série 3	Viga n°	h [mm]	b [mm]	L [mm]	a [mm]	Dia do ensaio	F experimental [N]	Deformação [mm]	Velocidade do ensaio [kgf/s]	Duração do ensaio [s]
		V01	110	90	2100	700	18-04-2007	34200	138,63	8,5
	V08	110	90	2100	700	18-04-2007	35300	60,95	8,5	439
Totais										
Média							34750,00	99,79		
Desvio Padrão							777,82	54,93		
Coef. Variação [%]							2,24	55,04		

O diagrama da Figura 4.53, correspondente ao ensaio da viga V01 e sendo semelhante ao verificado nas outras vigas desta série, representa a evolução da carga aplicada em função do deslocamento a meio vão. Como se pode verificar apresenta um comportamento aproximado ao das vigas pré-esforçadas.

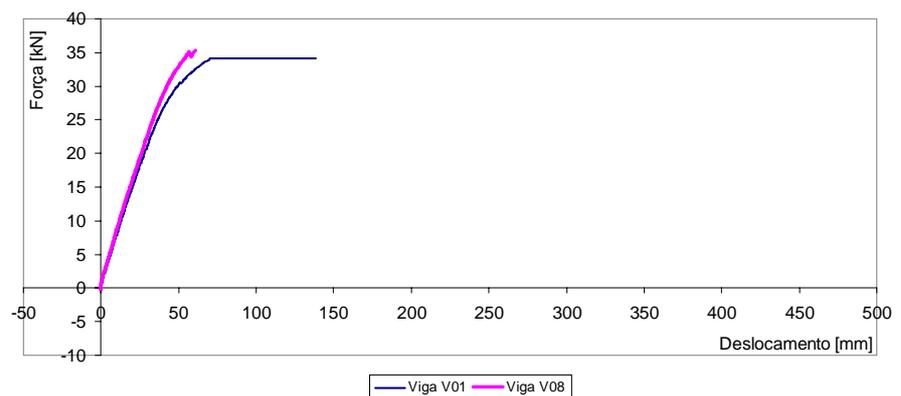


Figura 4. 58 – Gráfico força-deslocamento das vigas da série 3, do ensaio de flexão, à rotura.

4.6.4 Resultados da série 4

As vigas da série 4 eram as vigas de referência, depois de ensaiadas e rehabilitadas, como já foi descrito. Sendo novamente ensaiadas, a rotura deu-se de modo idêntico à das vigas referência. Porém, notou-se que nesta série as fendas se apresentavam mais abertas e na maioria dos casos as fendas verificadas eram as mesmas que se tinham verificado quando ensaiadas para a série 1. Talvez devido aos procedimentos de reabilitação, a zona de prótese tenha adquirido uma maior rigidez e por isso as fendas teriam uma maior tendência para se propagarem acima dessa zona e assim provocar fendas de maior abertura. A rotura, em termos de ductilidade, apresentou-se de fragilidade semelhante à das vigas referência. Pode ver-se nas figuras seguintes alguns pormenores da rotura de vigas desta série.



Figura 4. 59 – Rotura da viga V07.

A viga V11 teve uma rotura particular, por corte longitudinal até ao apoio (Figura 4.61).



Figura 4. 60 – Rotura da viga V10.



Figura 4. 61 – Rotura da viga V11.

Os resultados dos ensaios apresentam-se no quadro seguinte.

Quadro 4.9 - Parâmetros registados nos ensaios das vigas da série 4										
Série 4	Viga n°	h [mm]	b [mm]	L [mm]	a [mm]	Dia do ensaio	F experimental [N]	Deformação [mm]	Velocidade do ensaio [kgf/s]	Duração do ensaio [s]
	V07	110	90	2100	700	26-04-2007	14080	33,41	8,5	302
	V09	110	90	2100	700	26-04-2007	17520	33,54	8,5	374
	V10	110	90	2100	700	26-04-2007	16020	27,37	8,5	386
	V11	110	90	2100	700	26-04-2007	14920	26,64	8,5	318
Totais										
Média							15635,00	30,24		
Desvio Padrão							1486,69	3,75		
Coef. Variação [%]							9,51	12,39		

No diagrama da Figura 4.62, estão representadas as curvas obtidas, para as vigas desta série, que mostram a evolução da carga aplicada em função do deslocamento a meio vão. Como se pode verificar apresenta um comportamento aproximadamente linear.

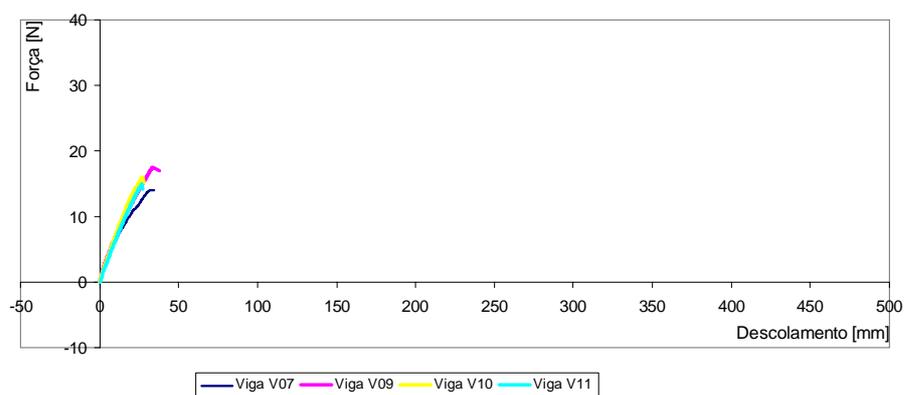


Figura 4. 62 - Gráfico força-deslocamento das vigas da série 4, do ensaio de flexão, à rotura.

4.6.5 Resultados da série 5

A rotura destas vigas, ao contrário das outras séries, começou pela abertura de fendas a partir do eixo neutro, até onde a viga estava cortada. As fendas propagava-se segundo a direcção das fibras ou segundo a linha de colagem entre lamelas e a rotura acontecia quando o laminado se separava da madeira por corte. A rotura, em termos de ductilidade, apresentou-se de fragilidade semelhante à das vigas referência.

Podem ver-se nas figuras seguintes alguns pormenores da rotura de vigas desta série.

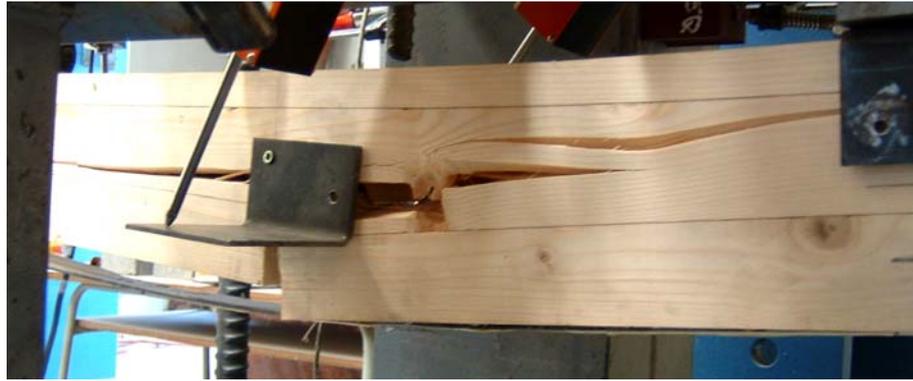


Figura 4. 63 – Rotura da viga V14.



Figura 4. 64 – Rotura da viga V16.

Os resultados dos ensaios apresentam-se no quadro seguinte.

Quadro 4.10 - Parâmetros registados nos ensaios das vigas da série 5										
Série 5	Viga n°	h [mm]	b [mm]	L [mm]	a [mm]	Dia do ensaio	F experimental [N]	Deformação [mm]	Velocidade do ensaio [kgf/s]	Duração do ensaio [s]
		V14	110	90	2100	700	26-04-2007	18520	38,91	8,5
	V15	110	90	2100	700	26-04-2007	12300	22,35	8,5	156
	V16	110	90	2100	700	26-04-2007	13200	23,55	8,5	228
Totais										
Média							14673,33	28,27		
Desvio Padrão							3361,57	9,23		
Coef. Variação [%]							22,91	32,66		

No diagrama da Figura 4.65, estão representadas as curvas obtidas, para as vigas desta série, que mostram a evolução da carga aplicada em função do deslocamento a meio vão. Como se pode verificar apresenta um comportamento aproximadamente linear, apresentando uma ligeira perda de rigidez numa fase antes da rotura.

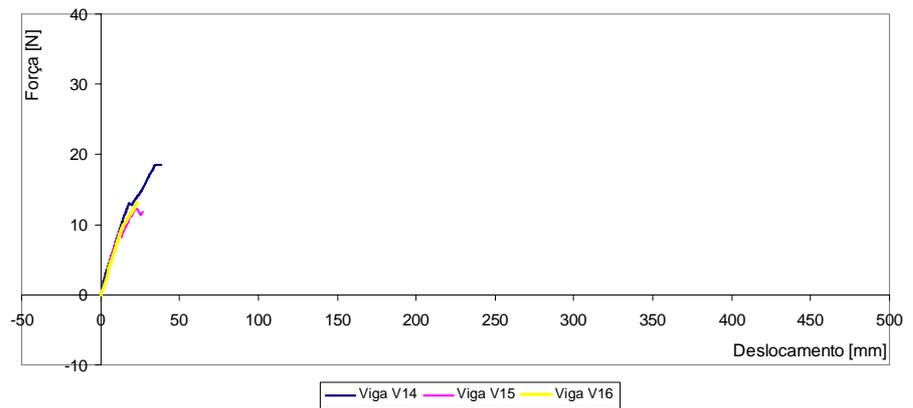


Figura 4. 65 – Gráfico força-deslocamento das vigas da série 5, do ensaio de flexão, à rotura.

4.6.6 Resultados gerais

Na Figura 4.66 está representada, para cada uma das séries, a relação entre a força actuante e o deslocamento a meio vão.

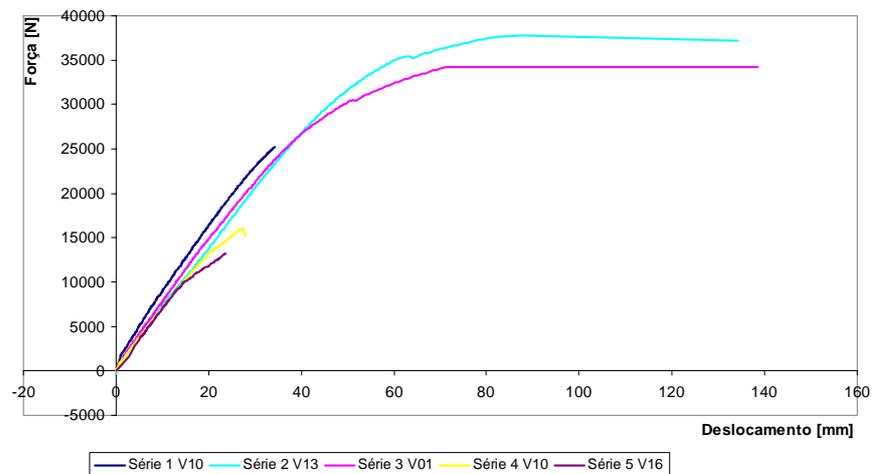


Figura 4. 66 – Gráfico força-deslocamento geral do ensaio de flexão, à rotura.

É possível com este diagrama comparar o comportamento dos sistemas de reforço aplicados às vigas.

De uma maneira geral a rigidez das vigas, numa fase inicial, é bastante semelhante. Como se pode verificar, nesta fase a viga de referência apresenta uma rigidez muito aproximada da das outras vigas e isso pode dever-se ao facto de inicialmente o laminado CFRP ter pouca ou nenhuma influência no comportamento da viga.

A capacidade de suporte das vigas das séries 2 e 3 destaca-se, assim como a sua capacidade de deformação, dando uma visão clara do benefício do sistema de

reforço em elementos novos.

As vigas das séries 4 e 5 apresentam uma resistência baixa, de cerca de metade das vigas referência, com uma ligeira quebra de rigidez numa fase próxima da rotura.

Os valores médios obtidos para a carga máxima nos ensaios efectuados às vigas encontram-se resumidamente no Quadro 4.11.

Neste quadro, podem encontrar-se também os valores esperados da carga máxima e a comparação entre os valores esperados e os obtidos nos ensaios.

Quadro 4.11 – Resultados obtidos nos ensaios às vigas.						
	F estimado	Ganho relativamente à referência	F experimental	Resistência à flexão f_m	Ganho relativamente à referência	Ganho relativamente ao estimado
	[kN]	[%]	[kN]	[N/mm ²]	[%]	[%]
Série 1	16,553	0	29,265	56,43	0	76,80
Série 2	21,997	32,89	36,831	55,47	25,85	67,43
Série 3	20,550	24,15	34,750	53,50	18,74	69,10
Série 4	-	-100	15,635	78,76	-46,57	-
Série 5	9,132	-44,83	14,673	73,91	-49,86	60,68

Para uma melhor leitura dos resultados, apresenta-se graficamente uma comparação entre os valores obtidos e esperados (Figura 4.67).

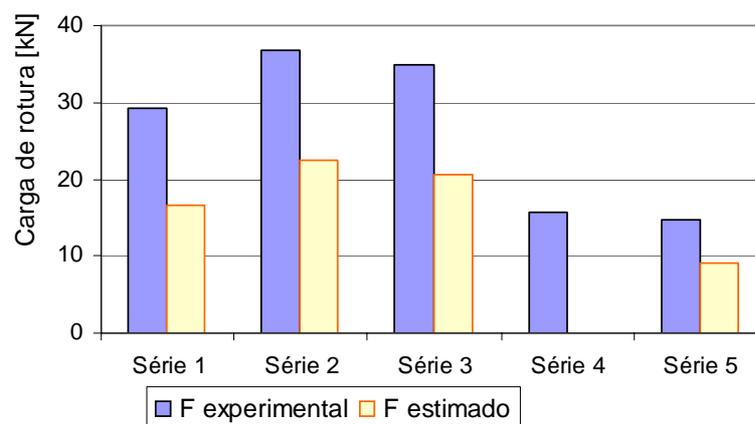


Figura 4. 67 – Comparação da carga de rotura obtida experimentalmente e analiticamente.

Pela análise do gráfico pode ver-se que os resultados obtidos foram significativamente mais altos do que os esperados, em todas as séries.

Assim, tomar-se-á a série 1 como a de referência para que, a partir dos seus resultados, possa inferir-se sobre a eficiência das soluções das outras séries. Na Figura 4.68 é apresentado um diagrama que ilustra o incremento da carga de rotura de cada série comparativamente à série referência.

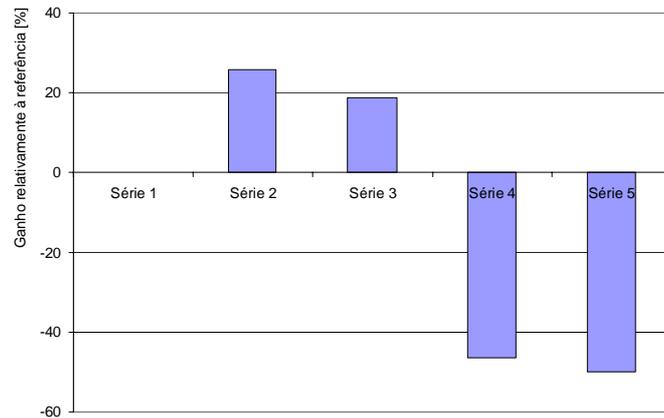


Figura 4. 68 – Incremento da carga de rotura, relativamente à série referência, em %.

Pela análise gráfica da figura, pode ver-se que as séries 2 e 3 foram as que obtiveram resultados superiores às da referência, como seria de esperar, já que estas vigas, além de estarem em boas condições, tinham sido reforçadas ou pré-esforçadas. O aumento de resistência verificado para as vigas pré-esforçadas foi de cerca de 26 % e de cerca de 19 % para as reforçadas.

Já as séries 4 e 5 obtiveram resultados inferiores ao que se esperava obter. Com este resultado será difícil a reabilitação de vigas em mau estado, com o objectivo de repor a capacidade resistente original.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO

Neste trabalho procedeu-se ao estudo de um sistema de reforço de vigas de madeira, destinado a aumentar a sua capacidade resistente. Este é um sistema que pode ser aplicado em vigas novas mas que tem especial importância para o reforço de estruturas existentes, deterioradas ou não, uma vez que pode ser aplicado sem necessidade de remoção do elemento e com interferência mínima nos sistemas de acabamento confinantes, nomeadamente soalhos e tectos falsos estucados ou em madeira, mais ou menos trabalhados e pintados ou não com representações decorativas valiosas. É, assim, um sistema adequado para edifícios com interesse histórico, nos quais é necessário respeitar a originalidade da construção, na maioria das vezes, quando se pretendem usar processos de reabilitação pouco intrusivos.

Em casos onde o factor estético seja preponderante assim como se pretender ter uma elevada resistência à corrosão, o uso de laminados CFRP pode ser uma mais valia.

Tecnicamente, a aplicação deste sistema não apresenta grandes dificuldades. É no entanto necessário que os aplicadores possuam alguma experiência prévia de execução deste tipo de técnicas (resinas e laminados de compósitos), e que de preferência sejam mais qualificados que os operários que executam técnicas de reforço com materiais tradicionais (aço, betão, colas correntes).

O programa experimental efectuado teve como objectivo analisar a eficiência do reforço de vigas de madeira com laminados CFRP, com e sem pré-esforço e em vigas de madeira sãs e danificadas. Estudou-se ainda a influência de determinados parâmetros que pudessem influenciar a ligação colada, como a humidade, o comprimento de colagem e o tipo de carregamento, através do ensaio de provetes pequenos.

O estudo permitiu concluir entre outros aspectos também relevantes que a utilização de pré-esforço permite aumentar sensivelmente a eficiência do sistema de reforço, embora o problema da delaminação do laminado continue a constituir o seu ponto mais débil, requerendo investigação adicional.

Apresentam-se em seguida os principais resultados obtidos. Nos capítulos 3 e 4 apresentam-se conclusões de carácter mais particular relativas, respectivamente, aos ensaios sobre provetes de pequena dimensão e as vigas com dimensões estruturais.

5.1 Principais resultados obtidos

Pode concluir-se, pelos ensaios realizados, que as ligações coladas efectuadas com o sistema utilizado, são ligações com alta rigidez e resistência. Não provocam a delaminação do laminado de CFRP e obtêm-se roturas por corte da madeira, sendo estas as mais desejáveis.

5.1.1 Principais conclusões associadas aos ensaios sobre provetes pequenos

Dos provetes pequenos podem enunciar-se os resultados obtidos relacionados com os três parâmetros estudados: influência da humidade, do comprimento de colagem e do tipo e carregamento.

A ligação colada entre a resina epoxy e o laminado não apresentou problemas. No entanto, a ligação resina-madeira não funcionou nos casos em que a última apresentava teores em água elevados, iguais ou superiores a 20%.

Quando se realizou a ligação colada e a madeira apresentava excesso de teor em água, a ligação apresentou-se muito fraca, podendo mesmo considerar-se inexistente. A quantidade de água existente na madeira reduz a quantidade de cola absorvida por ela e a respectiva penetração a valores muito reduzidos tornando inexistente a ligação mecânica entre os dois materiais.

Pode dizer-se também que a aderência entre a madeira e a resina é também afectada em serviço pela variação do teor em água da madeira, já que o aumento deste tem como consequência o inchamento e a diminuição a consequente retracção da madeira o que afecta a adesão do laminado. Verificou-se um decréscimo de 32 % de resistência em elementos colados com teores em água baixos (da ordem dos 12%) e que posteriormente foram sujeitos a teores mais elevados (cerca de 20%).

Assim, os elementos reparados ou reforçados com laminados CFRP devem estar sujeitos, durante a sua vida útil, a um ambiente seco.

Para elementos com um maior comprimento de amarração, a resistência aumentou cerca de 50 % para o dobro do comprimento e cerca de 112 % para o triplo do comprimento. No entanto, à medida que o comprimento aumenta, a tensão de corte verificada é menor. O comprimento de colagem para amarração do laminado pode ser definido assumindo que a cola é sempre mais rígida do que a madeira e que a tensão de corte máxima que pode ser transferida é a correspondente à tensão de corte máxima da madeira.

Relativamente ao tipo de carregamento, a ligação colada apresenta um decréscimo de 15 % em resistência em ensaios cíclicos, denotando assim algum abaixamento quando sujeita a processos de fadiga.

5.1.2 Principais conclusões associadas aos ensaios sobre vigas com dimensões estruturais

Relativamente às vigas em lamelado colado com dimensões estruturais, podem evidenciar-se algumas conclusões, que não têm só a ver com os parâmetros que se pretendiam estudar, mas também com aspectos que foi possível analisar a partir das acções de preparação e de execução dos ensaios.

Os resultados obtidos apresentaram-se, em média, 68 % superiores aos esperados. A grande diferença entre os valores esperados e os obtidos pode dever-se à qualidade da madeira. Se esta é mais resistente do que o estabelecido na sua classificação, como já foi referido, pode ser porque as lamelas da MLC poderiam pertencer a classes superiores.

No entanto, o valor obtido do módulo de elasticidade registou-se inferior ao esperado, aproximadamente 8 %.

Verificou-se um ganho adicional em resistência à flexão nas vigas pré-esforçadas de 26 % e nas reforçadas de 19 %.

Relativamente à comparação entre vigas reforçadas e pré-esforçadas pode dizer-se que o aumento de resistência é modesto mas existe, e pode ser aproveitado para um suplemento necessário de resistência e para um melhor comportamento das vigas relativamente a vibrações ou a correcção de flechas.

É um suplemento que, mesmo sendo modesto, compensa e justifica-se graças à redução da flecha e/ou indução de uma pequena contra-flecha e à facilidade de

execução.

Verificou-se pouca diferença no comportamento “às cargas de serviço”, relativamente às vigas de referência, mas muito melhor comportamento à rotura. Esperava-se, pela pré-avaliação dos resultados, que a percentagem de reforço obtida para as vigas sãs, relativamente à viga de referência, fosse maior.

As vigas danificadas recuperaram cerca de 50 % da sua resistência original, apresentando o pior caso uma recuperação da resistência inicial de 46 %.

Os resultados obtidos nas vigas danificadas não são directamente comparáveis com os das vigas reforçadas sãs, já que é difícil definir o quanto as vigas se encontram danificadas. Apesar disso, observa-se o efeito favorável do reforço no aumento de capacidade das vigas.

Pela análise numérica verificou-se que este tipo de pré-esforço resulta numa distribuição uniforme da tensão de corte e é por isso uma solução possível para o problema da delaminação do laminado. Além disso, o facto de os laminados terem sido trilhados nos apoios pode ter ajudado a que não se tivesse ocorrido a respectiva delaminação nos ensaios à rotura.

Foi possível ainda concluir que o pré-esforço aumenta muito significativamente a fiabilidade da colagem já que esta é efectuada em compressão. O processo de libertação do pré-esforço ajuda a colocar em tensão o laminado já que este entra imediatamente em acção no momento em que a viga inicia o retorno à sua posição de equilíbrio após serem retiradas as escoras.

Ainda relativamente à colagem, o pré-esforço praticamente elimina a possibilidade de fissuração da cola durante o processo de secagem já que a cola é aplicada sobre fibras comprimidas de madeira.

Uma das principais conclusões obtidas associa-se à vantagem na realização da colagem até à zona do apoio das vigas. A *trilhagem* do laminado de CFRP no apoio aumenta de modo muito significativo a eficiência da fixação colada e reduz praticamente a zero o risco da respectiva delaminação.

5.2 Desenvolvimentos futuros - Propostas de novos estudos

É recomendável o estudo da utilização de outras fibras menos resistentes e por esse motivo com deformações mais compatíveis com a madeira que lhes serve de suporte, surgindo assim uma solução mais eficiente e interessante no que se refere ao aproveitamento da capacidade resistente do laminado. O ideal seria encontrar-se um tipo de fibra de alta resistência que apresentasse um módulo de elasticidade semelhante ao da madeira o que implicaria o aproveitamento integral da respectiva capacidade resistente.

Outros tipos de pré-esforço deveriam ser estudados, assim como as possibilidades de ancoragem, que tornam os topos da viga o ponto mais crítico da solução. Neste caso concreto seria interessante estudar o efeito da *trilhagem* do laminado, que implica prolongar o mesmo por baixo dos apoios, e verificar a sua contribuição para o aumento de resistência da viga.

É igualmente importante o estudo do comportamento deste tipo de reforço a longo prazo, envolvendo a consideração de fenómenos de envelhecimento e de fadiga. O estudo do comportamento ao fogo dos laminados bem como da definição dos modos mais adequados de os proteger contra os aumentos localizados de temperatura constitui também um dos mais importantes domínios de pesquisa associados aos reforços colados de compósitos, não só sobre madeira mas sobre todos os materiais estruturais em geral.

Há actualmente colas no mercado que garantem uma ligação, resistente e dura, das fibras de alta resistência à madeira. Estes produtos, no entanto, devem ser cuidadosamente escolhidos consoante a gama de temperaturas a que estarão sujeitos quando forem aplicados.

A utilização com reforço de colas menos rígidas, mais baratas e de mais fácil aplicação constitui também uma área importante de investigação. O objectivo a este nível será maximizar o potencial do pré-esforço, minimizar o problema da delaminação do laminado usando colas de fácil aplicação, só com um componente, com boa aderência ao laminado e à madeira, estáveis quando sujeitas às acções ambientais correntes, com bom comportamento ao fogo e com bom desempenho num espectro o mais largo possível de temperaturas. Este é um produto que ainda não existe!...

CAPÍTULO 6 - REFERÊNCIAS

1. Braga, Nuno, “Estruturas de Madeira Lamelada”, Construção Magazine, Porto, N°1, 4º Trimestre de 2001.
2. Dias, Salvador J. E., Branco, Jorge M. e Cruz, Paulo J. S., “Reforço à flexão com compósitos de CFRP de vigas de madeira lamelada-colada”, Actas do CIMAD' 04 - I Congresso Ibérico a Madeira na Construção, Guimarães, 2004.
<https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/3179/1/T3-05SAL.pdf>, 16-11-2006.
3. Reis, Maria de Lurdes, Branco, Fernando G., Mascarenhas, Jorge Morarji, “Técnicas de Reabilitação em Estruturas de Madeira”, PATORREB2006, 2.º Encontro sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios, Vol.I, FEUP, Porto, Março, 2006.
4. Cruz, Helena, Custódio, João, et al., “Execução e controlo de qualidade da reparação de estruturas de madeira com colas epoxidicas e FRPS”, Actas do CIMAD' 04 - I Congresso Ibérico a Madeira na Construção, Guimarães, 2004.
http://www.tecnocrete.pt/artigos_comunica%C3%A7%C3%B5es/comunica%C3%A7%C3%A3o_CIMAD04.pdf, 16-11-2006.
5. Duarte. A., Negrão, J., e Cruz, H., “Rehabilitation of timber beams with reinforced epoxy plates”, Actas da "World Conference on Timber Engineering", Finlândia, 2004.
6. Barroso, Daniel, Negrão, João, Cruz, Paulo J., “Avaliação do comportamento de vigas de madeira lamelada pré-esforçada” Actas do CIMAD' 04 - I Congresso Ibérico a Madeira na Construção, Guimarães, 2004.
7. André, Alann, “Fibres for Strengthening of Timber Structures”:
<http://epubl.ltu.se/1402-1528/2006/03/LTU-FR-0603-SE.pdf>, 21-11-2006.

8. <http://www.dharmanet.com.br/multimedia/bgtemplos/horyuji.jpg>, 26-01-2007.
9. Alvarez, Ramon Arguelles, "Estructuras de Madera – Diseño y cálculo", AITIM, 2000, p. 5.
10. Carvalho, Albino, "Madeiras Portuguesas – Estrutura Anatómica, Propriedades, Utilizações", Vol. I, 1996, Direcção Geral de Florestas.
11. Jorge, Luis; Silva, Sérgio, "Resistência ao Fogo de Estruturas de Madeira Lamelada-Colada", Congresso Nacional da Engenharia de Estruturas, 2002, LNEC.
12. Modern structural wood products, 17-11-2006.
<http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/abstract/86011212/ABSTRACT>
13. <http://www.puuproffa.fi/arkisto/puujalosteet.php>, 08-08-2007.
14. http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Stockholm_Central_Station_Interior.jpg, 24-05-2007.
15. http://www.nll.se/upload/IB/lg/pers/informationsmaterial/SY_BROSC.PDF, 17-08-2007.
16. FRP reinforcement for prestressed concrete structures, 20-11-2006.
<http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/abstract/112204078/ABSTRACT>
17. <http://www.matexplas.pt/html/produtos.html>, 13-08-2006.
18. http://www.fibertex.com.br/plastico_reforzado.htm, 13-08-2006.
19. Adhesive Bonding of Wood Materials, 24-11-2006.
<http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fplgtr113/ch09.pdf>
20. Martin, Zeno A., Stith, Joe K., Tingley, Dan A., "Commercialization of FRP reinforced glulam beam technology"; Actas da "World Conference on Timber Engineering", Canadá, 2000.
21. Crews, K., Greenland, A., Bakoss, S., "Application of advanced fibre reinforced plastic composites to structural timber"; Actas da "World Conference on Timber Engineering", Suíça, 1998.
22. Silva, S., Cachim, P., Juvantes, L., "Técnicas avançadas de reforço de estruturas de madeira com compósitos reforçados com fibras FRP", Actas do CIMAD' 04 - I Congresso Ibérico a Madeira na Construção, Guimarães, 2004.
23. El-Hacha R., Wight R. and Green M., Prestressed fibre-reinforced polymer laminates for strengthening structures. "Progress in Structural Engineering and Materials", 2001, 3(2), 111-121.

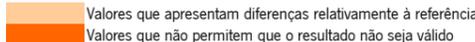
24. Brunner, M., SCHNUERIGER, M., "Timber beams strengthened with prestressed fibres: Delamination"; Actas da "World Conference on Timber Engineering", Finlândia, 2004.
25. Brunner M. et al. 2005. Timber beams strengthened by attaching prestressed carbon FRP laminates with a gradiented anchoring device. Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures, 7 – 9 December 2005, Hong Kong, China, 21-11-2006.
http://www.iifc-hq.org/BBFS-Papers/G2_0066.pdf
26. NP EN 1194 – Estruturas de madeira – Madeira lamelada-colada – Classes de resistência e determinação dos valores característicos.
27. Ficha de produto Sika® CarboDur, 11-01-2007.
http://www.sika.pt/5-32-Sika_CarboDur.pdf
28. EN 408:2003 – Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties.
29. EN 26 891 – Timber structures - Joints made with mechanical fasteners – General principles for the determination of strength and deformation characteristics (ISO 6891:1983)
30. Steiger, R. "Bonding Carbon Fibre-reinforced Plastics (CFRP) with Wood", COST E34 Conference: Innovations in Wood Adhesives, Biel, Switzerland, 2004.
http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*/33921/—/l=1, 05-01-07.
31. Technical data of S&P Laminates CFK, 2007/05/08.
http://www.sp-reinforcement.eu/pdf_daten/en_produk/laminates-cfk_en.pdf
32. CDP-C Displacement Transducer, 23-07-2007.
http://www.tml.jp/e/product/transducer/catalog_PDF/CDP.pdf
33. SDP-C Displacement Transducer, 23-07-2007.
http://www.tml.jp/e/product/transducer/catalog_PDF/SDP-C_SDP-CT.pdf

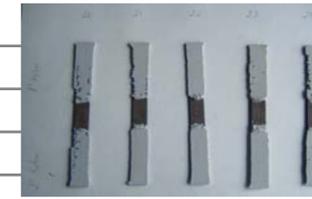
ANEXOS

Anexo A - Resultados dos ensaios das séries dos provetes pequenos

Série 1: Provetes referência																
Condições higrotérmicas: T = 20°C e HR = 65%																
Comprimento de colagem = 50 mm																
Ensaio monotônico																
Proвете n°	b [mm]	Comprimento de amarração [mm]	N esperado [kN]	Dia do ensaio	N obtido [kN]	Deformação [mm]	Velocidade do ensaio [kgf/s]	Duração do ensaio [180 a 420] [s]	Tipo de rotura	Ganho Nobt/Nesp %	N uniformizado b=12mm [kN]	Tensão de corte [N/mm ²]				
2	10	50	1,79	17-Jan	3,42	1,68	5	68,40	corde da madeira	91,06	4,104	6,840				
	10	50	1,79	17-Jan	3,5	3,11	1,2	291,67	corde da superfície da madeira	95,53	4,200	7,000				
3	11	50	1,975	17-Jan	3,64	1,68	5	72,80	corde da madeira	84,30	3,971	6,618				
	11	50	1,975	17-Jan	4,3	1,43	1,2	358,33	corde da madeira	117,72	4,691	7,818				
4	13	50	2,33	17-Jan	4,15	7,57	5	83,00	corde da superfície da madeira	78,11	3,831	6,385				
	13	50	2,33	17-Jan	3,77	1,43	1,2	314,17	corde da madeira e da superfície da madeira	61,80	3,480	5,800				
5	12	50	2,15	17-Jan	3,39	1,16	5	67,80	corde da superfície da madeira	57,67	3,390	5,650				
	12	50	2,15	17-Jan	4,74	1,65	1,2	395,00	corde da madeira e da superfície da madeira	120,47	4,740	7,900				
6	12	50	2,15	17-Jan	3,61	1,89	1,1	328,18	corde da madeira	67,91	3,610	6,017				
	12	50	2,15	17-Jan	3,66	2,32	1,2	305,00	corde da madeira e da superfície da madeira	70,23	3,660	6,100				
média =			3,93	1,971666667						88,9432453	4,063484848	6,7724747				
41	10	50	1,79	14-Fev	2,8	1,8	1,2	230,00	corde madeira, sup madeira e interf cola-fibra	56,42	3,360	5,600				
	10	50	1,79	14-Fev	3,22	1,4	1,2	266,00	corde da madeira e da superfície da madeira	79,89	3,864	6,440				
47	11	50	1,975	14-Fev	2,39	1,22	1,2	199,00	corde da madeira e da superfície da madeira	21,01	2,607	4,345				
	11	50	1,975	14-Fev	3,66	1,8	1,2	291,00	corde da superfície da madeira	85,32	3,993	6,655				
48	13	50	2,33	14-Fev	3,58	2,35	1,2	296,00	corde da madeira e da superfície da madeira	53,65	3,305	5,508				
	13	50	2,33	14-Fev	4,06	1,34	1,2	337,00	corde da superfície da madeira	74,25	3,748	6,246				
Média			3,285	1,65		269,83				61,76	3,479	5,799				
79	12	50	2,15	02-Mar	3,35	1,5	1,2	279,00	corde da superfície da madeira	55,81	3,350	5,583				
	12	50	2,15	02-Mar	2,98	1,19	1,2	248,00	corde da madeira e da superfície da madeira	38,60	2,980	4,967				
81	12	50	2,15	02-Mar	2,75	1,22	1,2	228,00	corde da madeira e da superfície da madeira	27,91	2,750	4,583				
	12	50	2,15	02-Mar	3,55	1,43	1,2	293,00	corde da madeira e da superfície da madeira	65,12	3,550	5,917				
82	12	50	2,15	02-Mar	3,16	1,07	1,2	264,00	corde da madeira e da superfície da madeira	46,98	3,160	5,267				
	12	50	2,15	02-Mar	3,12	1,04	1,2	266,00	corde da superfície da madeira	45,12	3,120	5,200				
83	12	50	2,15	02-Mar	3,2	1,19	1,2	265,00	corde da madeira	48,84	3,200	5,333				
	12	50	2,15	02-Mar	3,11	1,04	1,2	258,00	corde da madeira e da superfície da madeira	44,65	3,110	5,183				
85	12	50	2,15	02-Mar	2,85	1,04	1,2	238,00	corde da madeira	32,56	2,850	4,750				
	12	50	2,15	02-Mar	2,98	1,1	1,2	250,00	corde da madeira e da superfície da madeira	38,60	2,980	4,967				
86	12	50	2,15	02-Mar	3,3	1,77	1,2	276,00	corde da madeira e da superfície da madeira	53,49	3,300	5,500				
	12	50	2,15	02-Mar	3,42	1,34	1,2	285,00	corde da madeira e da superfície da madeira	59,07	3,420	5,700				
90	12	50	2,15	02-Mar	3,7	1,2	1,2	308,00	corde da madeira e da superfície da madeira	72,09	3,700	6,167				
	12	50	2,15	02-Mar	3,39	1,16	1,2	283,00	corde da madeira	57,67	3,390	5,650				
91	13	50	2,33	02-Mar	3,27	1,59	1,2	273,00	corde da madeira	40,34	3,018	5,031				
	13	50	2,33	02-Mar	3,61	1,37	1,2	302,00	corde da madeira e da superfície da madeira	54,94	3,332	5,554				
Média			3,23375	1,27		269,75				48,8619124	3,200673077	5,3344551				
99	12	50	2,15	23-Mar	2,63	1,07	1,2	229,00	corde pela interface cola-fibra	22,33	2,630	4,383				
	12	50	2,15	23-Mar	2,48	0,85	1,2	210,00	corde da superfície da madeira	15,35	2,480	4,133				
100	12	50	2,15	23-Mar	2,91	1,22	1,2	247,00	corde da madeira	35,35	2,910	4,850				
	12	50	2,15	23-Mar	2,7	0,92	1,2	229,00	corde da superfície da madeira	25,58	2,700	4,500				
101	12	50	2,15	23-Mar	2,34	1,1	1,2	199,00	corde da superfície da madeira	8,84	2,340	3,900				
	12	50	2,15	23-Mar	2,35	0,82	1,2	199,00	corde da madeira	9,30	2,350	3,917				
Média			2,5683333	1,00		218,83				19,46	2,568	4,281				
113	12	50	2,15	02-Abr	3,08	1,28	1,2	255,00	corde da madeira e da superfície da madeira	43,26	3,080	5,133				
	12	50	2,15	02-Abr	2,48	1,22	1,2	308,00	corde da superfície da madeira e do interface madeira-cola	15,35	2,480	4,133				
120	12	50	2,15	13-Abr	3,04	2,35	1,2	250,00	corde da superfície da madeira	41,40	3,040	5,067				
	12	50	2,15	13-Abr	2,47	1,07	1,2	203,00	corde da madeira	14,88	2,470	4,117				
122	12	50	2,15	13-Abr	3	1,19	1,2	248,00	corde da superfície da madeira e do interface madeira-cola	39,53	3,000	5,000				
	12	50	2,15	13-Abr	2,88	1,07	1,2	241,00	corde da madeira e da superfície da madeira	33,95	2,880	4,800				
Média			2,825	1,36		250,83				31,40	2,825	4,708				
Totais																
Média					3,18	1,41				49,78		5,37				
Desvio Padrão					0,54	0,48				26,46		0,95				
Coef. Variação [%]					5,93	2,96				1,88		5,66				
<p>Valores que apresentam diferenças relativamente à referência</p> <p>Valores que não permitem que o resultado não seja válido</p>																

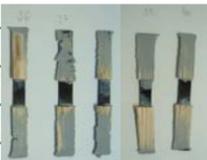
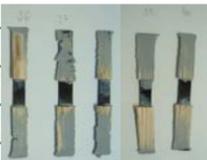
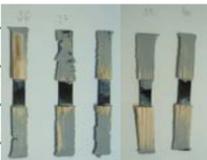
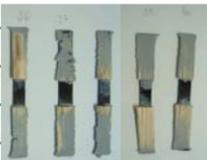
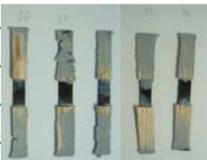
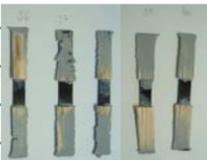
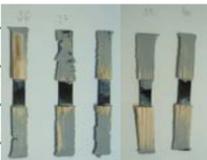
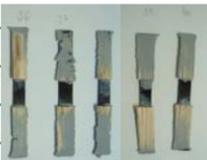
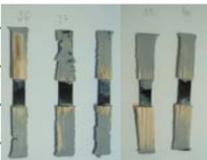
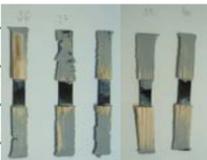
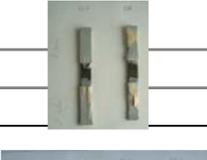
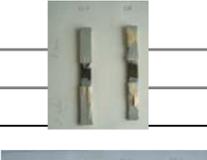
Série 2: Provetes sempre condicionados											
Condições higrotérmicas: T = 15°C e HR = 90%											
Comprimento de colagem = 50 mm											
Ensaio monotônico											
Provete n°	b [mm]	Comprimento de amarração [mm]	N esperado [kN]	Dia do ensaio	N obtido [kN]	Deformação [mm]	Velocidade do ensaio [kgf/s]	Duração do ensaio [180 a 420] [s]	Tipo de rotura	Ganho Nobt/Nesp %	Tensão de corte [N/mm ²]
15	12	50	2,15	15-Fev	0	-	1,2	-	cutelo pelo interface madeira-cola	-100,00	0,000
	12	50	2,15	15-Fev	0	-	1,2	-	cutelo pelo interface madeira-cola	-100,00	0,000
16	12	50	2,15	15-Fev	0	-	1,2	-	cutelo pelo interface madeira-cola	-100,00	0,000
	12	50	2,15	15-Fev	0	-	1,2	-	cutelo pelo interface madeira-cola	-100,00	0,000
17	12	50	2,15	15-Fev	0	-	1,2	-	cutelo pelo interface madeira-cola	-100,00	0,000
	12	50	2,15	15-Fev	0	-	1,2	-	cutelo pelo interface madeira-cola	-100,00	0,000
18	12	50	2,15	15-Fev	0	-	1,2	-	cutelo pelo interface madeira-cola	-100,00	0,000
	12	50	2,15	15-Fev	0	-	1,2	-	cutelo pelo interface madeira-cola	-100,00	0,000
19	12	50	2,15	15-Fev	0	-	1,2	-	cutelo pelo interface madeira-cola	-100,00	0,000
	12	50	2,15	15-Fev	0	-	1,2	-	cutelo pelo interface madeira-cola	-100,00	0,000
média =					0					-100,000	0,000
Totais											
Média					0					-100	0
Desvio Padrão					0						0
Coef. Variação [%]											
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: #f4a460; border: 1px solid black;"></div> Valores que apresentam diferenças relativamente à referência </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center; margin-top: 5px;"> <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: #ff8c00; border: 1px solid black;"></div> Valores que não permitem que o resultado não seja válido </div>											

Série 3: Provetes hum+seco												
Condições higrotérmicas na colagem: T = 15°C e HR = 90%												
Condições higrotérmicas no ensaio: T = 20°C e HR = 65%												
Comprimento de colagem = 50 mm												
Ensaio monotônico												
Provete n°	b [mm]	Comprimento de amarração [mm]	N esperado [kN]	Dia do ensaio	N obtido [kN]	Deformação [mm]	Velocidade do ensaio [kgf/s]	Duração do ensaio [180 a 420] [s]	Tipo de rotura	Teor em água da madeira sob a fibra [%]	Ganho Nobt/Nesp %	Tensão de corte [N/mm ²]
20	12	50	2,15	20-Mar	0,02	0	1,2	-	corte pelo interface madeira-cola	21,5	-99,07	0,033
	12	50	2,15	20-Mar	0,02	0	1,2	-	corte pelo interface madeira-cola	23,8	-99,07	0,033
21	12	50	2,15	20-Mar	0,01	0	1,2	-	corte pelo interface madeira-cola	24,3	-99,53	0,017
	12	50	2,15	20-Mar	0	0	1,2	-	corte pelo interface madeira-cola	23,9	-100,00	0,000
22	12	50	2,15	20-Mar	0,02	0	1,2	-	corte pelo interface madeira-cola	23,5	-99,07	0,033
	12	50	2,15	20-Mar	0	0	1,2	-	corte pelo interface madeira-cola	22,1	-100,00	0,000
23	12	50	2,15	20-Mar	0	0	1,2	-	corte pelo interface madeira-cola	22,2	-100,00	0,000
	12	50	2,15	20-Mar	0,06	0	1,2	-	corte pelo interface madeira-cola	21,7	-97,21	0,100
24	12	50	2,15	20-Mar	0,01	0	1,2	-	corte pelo interface madeira-cola	23,1	-99,53	0,017
	12	50	2,15	20-Mar	0,98	0,37	1,2	-	corte pelo interface madeira-cola	22,4	-54,42	1,633
média =					0,112	0,037				22,85	-94,791	0,187
Totais												
Média					0,11	0,04				22,85	-94,79	0,19
Desvio Padrão					0,31	0,12				1,00	14,21	0,51
Coef. Variação [%]					0,37	0,32				22,95		0,37
												



Série 4: Provetes seco-hum												
Condições higrotérmicas na colagem: T = 20°C e HR = 65%												
Condições higrotérmicas no ensaio: T = 15°C e HR = 90%												
Comprimento de colagem = 50 mm												
Ensaio monotônico												
Provete n°	b [mm]	Comprimento de amarração [mm]	N esperado [kN]	Dia do ensaio	N obtido [kN]	Deformação [mm]	Velocidade do ensaio [kgf/s]	Duração do ensaio [180 a 420] [s]	Tipo de rotura	Teor em água da madeira sob a fibra [%]	Ganho N _{obt} /N _{esp} %	Tensão de corte [N/mm ²]
1	11,5	50	2,06	22-Fev	1,97	1,86	1,2	157	cuta da superfície da madeira	21,5	-4,37	3,426
	11,5	50	2,06	22-Fev	2,1	1,43	1,2	159	cuta da madeira, superfície da madeira e do interface madeira-cola	23,8	1,94	3,652
12	12	50	2,15	22-Fev	2,17	2,32	1,2	181	cuta da superfície da madeira	24,3	0,93	3,617
	12	50	2,15	22-Fev	1,91	1,22	1,2	160	cuta da superfície da madeira e do interface madeira-cola	23,9	-11,16	3,183
13	12	50	2,15	22-Fev	2,57	1,83	1,2	216	cuta da superfície da madeira	23,5	19,53	4,283
	12	50	2,15	22-Fev	2,51	1,4	1,2	208	cuta da superfície da madeira e do interface madeira-cola	22,1	16,74	4,183
14	11	50	1,98	22-Fev	2,03	1,56	1,2	170	cuta pelo interface madeira-cola	22,2	2,53	3,691
	11	50	1,98	22-Fev	2,5	1,34	1,2	208	cuta da madeira e do interface madeira-cola	21,7	26,26	4,545
16	12	50	2,15	22-Fev	2,91	3,14	1,2	245	cuta da madeira e da superfície da madeira	23,1	35,35	4,850
	12	50	2,15	22-Fev	3,39	1,65	1,2	282	cuta da madeira e da superfície da madeira	22,4	57,67	5,650
35	12	50	2,15	22-Fev	2,69	3,36	1,2	201	cuta pelo interface madeira-cola	22,3	25,12	4,483
	12	50	2,15	22-Fev	2	1,8	1,2	164	cuta da madeira e da superfície da madeira	22,5	-6,98	3,333
média =					2,395833	1,909166667				22,78	13,631	4,075
70	13	50	2,33	02-Abr	2,61	4,79	1,2	217	cuta da madeira e da superfície da madeira	22,5	12,02	4,015
	13	50	2,33	02-Abr	2,9	1,98	1,2	244	cuta da superfície da madeira e do interface madeira-cola	23,2	24,46	4,462
71	11	50	1,98	02-Abr	1,88	2,38	1,2	160	cuta da superfície da madeira	22,8	-5,05	3,418
	11	50	1,98	02-Abr	1,94	1,16	1,2	165	cuta do interface madeira-cola	22,7	-2,02	3,527
72	10	50	1,79	02-Abr	2,44	2,17	1,2	204	cuta da superfície da madeira	22,5	36,31	4,880
	10	50	1,79	02-Abr	2,65	1,92	1,2	223	cuta da madeira e da superfície da madeira	23,3	48,04	5,300
73	12	50	2,15	02-Abr	2,92	3,66	1,2	243	cuta da superfície da madeira	22,7	35,81	4,867
	12	50	2,15	02-Abr	2,26	1,31	1,2	193	cuta da madeira e da superfície da madeira	22,4	5,12	3,767
75	12	50	2,15	02-Abr	1,75	1,74	1,2	156	cuta da superfície da madeira e do interface madeira-cola	22,2	-18,60	2,917
	12	50	2,15	02-Abr	1,69	1,04	1,2	147	cuta pelo interface madeira-cola	21,8	-21,40	2,817
média =					2,304	2,215				22,61	11,470	3,997
92	12	50	2,15	16-Abr	2,59	2,62	1,2	219	cuta da madeira e da superfície da madeira	22,5	20,47	4,317
	12	50	2,15	16-Abr	2,25	1,56	1,2	191	cuta da superfície da madeira	23,2	-4,65	3,750
93	12	50	2,15	16-Abr	2,5	2,81	1,2	209	cuta da superfície da madeira	22,8	16,28	4,167
	12	50	2,15	16-Abr	2,27	1,43	1,2	190	cuta da superfície da madeira	22,7	-5,58	3,783
95	12	50	2,15	16-Abr	2,03	3,17	1,2	173	cuta da superfície da madeira	22,5	-5,58	3,383
	12	50	2,15	16-Abr	1,08	0,82	1,2	92	cuta da superfície da madeira	23,3	-49,77	1,800
96	12	50	2,15	16-Abr	2,02	1,74	1,2	169	cuta da superfície da madeira	22,7	-6,05	3,367
	12	50	2,15	16-Abr	2,42	1,4	1,2	204	cuta da superfície da madeira e do interface madeira-cola	22,4	12,56	4,033
97	12	50	2,15	16-Abr	2,18	2,41	1,2	184	cuta da superfície da madeira	22,5	1,40	3,633
	12	50	2,15	16-Abr	1,62	0,89	1,2	138	cuta pelo interface madeira-cola	23,2	-24,65	2,700
98	12	50	2,15	16-Abr	1,6	1,31	1,2	136	cuta pelo interface madeira-cola	22,8	-25,58	2,667
	12	50	2,15	16-Abr	1,7	1,04	1,2	145	cuta pelo interface madeira-cola	22,7	-20,93	2,833
107	12	50	2,15	16-Abr	1,41	2,11	1,2	123	cuta da superfície da madeira	22,5	-34,42	2,350
	12	50	2,15	16-Abr	2,47	2,11	1,2	207	cuta da superfície da madeira	23,3	14,88	4,117
108	12	50	2,15	16-Abr	1,49	1,92	1,2	127	cuta da superfície da madeira e dos interfaces madeira-cola cola-fibra	22,7	-30,70	2,483
	12	50	2,15	16-Abr	1,68	1,92	1,2	140	cuta da superfície da madeira	22,4	-21,86	2,800
111	12	50	2,15	16-Abr	1,63	2,01	1,2	138	cuta da superfície da madeira e do interface madeira-cola	22,2	-24,19	2,717
	12	50	2,15	16-Abr	1,36	0,92	1,2	113	cuta da superfície da madeira	21,8	-36,74	2,267
média =					1,905556	1,788333333				22,68	-11,370	3,176
Totais												
Média					2,15	1,93				22,69	1,84	3,65
Desvio Padrão					0,50	0,83				0,60	24,31	0,87
Coef. Variação [%]					4,31	2,33				38,09	0,08	4,19

Valores que apresentam diferenças relativamente à referência
 Valores que não permitem que o resultado não seja válido

Série 5: Provetes EN 26891														
Condições higrotérmicas: T = 20°C e HR = 65%														
Comprimento de colagem = 50 mm														
Ensaio segundo a Norma EN 26891														
Provete n°	b [mm]	Comprimento de amarração [mm]	N esperado [kN]	Dia do ensaio	N obtido [kN]	Deformação [mm]	Velocidade do ensaio [kgf/s]	Duração do ensaio [600 a 900] [s]	Tipo de rotura	Ganho Nobt/Nesp %	N uniformizado b=12mm [kN]	Tensão de corte [N/mm ²]		
36	10	50	1,79	07-Fev	2,64	1,62	1,2	505	corde da madeira	47,49	3,168	5,280		
	10	50	1,79	07-Fev	3,05	1,89	1,1	619	corde da madeira e da superfície da madeira	70,39	3,660	6,100		
37	13	50	2,33	07-Fev	3,17	1,62	1,1	631	corde da superfície da madeira	36,05	2,926	4,877		
	13	50	2,33	07-Fev	3,25	1,43	1,1	628	corde da madeira e da superfície da madeira	39,48	3,000	5,000		
38	11	50	1,98	07-Fev	3,19	1,83	1,1	668	corde da madeira e da superfície da madeira	61,11	3,480	5,800		
	11	50	1,98	07-Fev	2,91	1,1	1,1	559	corde da madeira e da superfície da madeira	46,97	3,175	5,291		
39	12	50	2,15	07-Fev	3,22	1,1	1,3	572	corde da superfície da madeira	49,77	3,220	5,367		
	12	50	2,15	07-Fev	2,45	1,01	1,2	441	corde da madeira	13,95	2,450	4,083		
40	12	50	2,15	07-Fev	3,27	1,4	1,3	619	corde da madeira e da superfície da madeira	52,09	3,270	5,450		
	12	50	2,15	07-Fev	3,27	1,2	1,2	530	corde da superfície da madeira	52,09	3,270	5,450		
42	10	50	1,79	07-Fev	3,64	1,59	1,1	700	corde da madeira e da superfície da madeira	103,35	4,368	7,280		
	10	50	1,79	07-Fev	2,84	1,16	1,1	562	corde da superfície da madeira	58,66	3,408	5,680		
43	13	50	2,33	07-Fev	2,36	1,19	1,1	573	corde da madeira	1,29	2,178	3,631		
	13	50	2,33	07-Fev	4,62	4,27	1,1	1072	corde da superfície da madeira	98,28	4,265	7,108		
44	10	50	1,79	07-Fev	3,88	2,11	1,1	820	corde da madeira e da superfície da madeira	116,76	4,656	7,760		
	10	50	1,79	07-Fev	3,13	1,19	1,1	584	corde da superfície da madeira	74,86	3,756	6,260		
45	11	50	1,98	31-Jan	3,13	1,16	1,2	615	corde da madeira	58,08	3,415	5,691		
	11	50	1,98	31-Jan	4,71	1,31	1,2	744	corde da superfície da madeira	137,88	5,138	8,564		
46	11	50	1,98	31-Jan	3,35	2,59	1,2	669	corde da superfície da madeira	69,19	3,655	6,091		
	11	50	1,98	31-Jan	4,02	1,59	1,2	706	corde da superfície da madeira	103,03	4,385	7,309		
média =					3,305	1,64				64,54	3,542	5,904		
126	12	50	2,15	17-Abr	3,23	1,16	1,3	586	corde da superfície da madeira e do interface madeira-cola	50,23	3,230	5,383		
	12	50	2,15	17-Abr	3,04	1,13	1,3	531	corde da madeira	41,40	3,040	5,067		
128	12	50	2,15	17-Abr	3,29	1,28	1,3	585	corde da superfície da madeira	53,02	3,290	5,483		
	12	50	2,15	17-Abr	3,47	1,22	1,3	575	corde da superfície da madeira	61,40	3,470	5,783		
130	12	50	2,15	17-Abr	2,73	2,04	1,3	569	corde da madeira e da superfície da madeira	26,98	2,730	4,550		
	12	50	2,15	17-Abr	2,17	1,01	1,3	411	corde da superfície da madeira	0,93	2,170	3,617		
131	12	50	2,15	17-Abr	2,76	1,46	1,3	517	corde da superfície da madeira	28,37	2,760	4,600		
	12	50	2,15	17-Abr	2,67	1,19	1,3	490	corde da superfície da madeira e do interface madeira-cola	24,19	2,670	4,450		
média =					2,92	1,31125				35,81	2,920	4,867		
137	12	50	2,15	23-Abr	2,87	1,4	1,3	529	corde da superfície da madeira e do interface madeira-cola	33,49	2,870	4,783		
	12	50	2,15	23-Abr	2,53	1,13	1,3	470	corde da madeira e da superfície da madeira	17,67	2,530	4,217		
138	12	50	2,15	23-Abr	2,97	2,01	1,3	630	corde da madeira e da superfície da madeira	38,14	2,970	4,950		
	12	50	2,15	23-Abr	4,75	2,38	1,3	907	corde da madeira e do interface madeira-cola	120,93	4,750	7,917		
média =					3,28	1,73				52,56	3,280	5,467		
139	12	50	2,15	24-Abr	3,08	1,46	1,3	588	corde da madeira	43,26	3,080	5,133		
	12	50	2,15	24-Abr	3,91	2,14	1,3	685	corde da madeira, da interface madeira-cola e da interface cola-fibra	81,86	3,910	6,517		
140	12	50	2,15	24-Abr	1,9	1,28	1,3	394	corde da madeira	-11,63	1,900	3,167		
	12	50	2,15	24-Abr	2,42	1,13	1,3	434	corde da superfície da madeira	12,56	2,420	4,033		
141	12	50	2,15	24-Abr	2,44	1,5	1,3	436	corde da madeira e da superfície da madeira	13,49	2,440	4,067		
	12	50	2,15	24-Abr	2,79	1,28	1,3	517	corde da superfície da madeira	29,77	2,790	4,650		
142	12	50	2,15	24-Abr	2,77	1,92	1,3	516	corde da madeira	28,84	2,770	4,617		
	12	50	2,15	24-Abr	2,69	1,28	1,3	504	corde da superfície da madeira	25,12	2,690	4,483		
média =					2,75	1,49875				27,91	2,750	4,583		
Totais					3,11				592,28					
Média					0,64				131,36					
Desvio Padrão					4,85				4,51					
Coef. Variação [%]														

Valores que apresentam diferenças relativamente à referência
 Valores que não permitem que o resultado não seja válido

Série 6: Provetes Lcolagem= 10 cm														
Condições higrotérmicas: T = 20°C e HR = 65%														
Comprimento de colagem = 100 mm														
Ensaio monotônico														
Provete n°	b (mm)	Comprimento de amarração (mm)	N esperado (kN)	Dia do ensaio	N obtido (kN)	Deformação (mm)	Velocidade do ensaio (kgf/s)	Duração do ensaio (180 a 420) [s]	Tipo de rotura	Imagem	Ganho N _{obt} /N _{esp} %	N uniformizado b=12mm (kN)	Tensão de corte (N/mm ²)	
56	12	100	4,31	31-Jan	4,02	2,29	1,5	258	corde da superfície da madeira		-6,73	4,020	3,350	
	12	100	4,31	31-Jan	5,28	2,9	1,5	349	corde da madeira		22,51	5,280	4,400	
57	12,5	100	4,49	31-Jan	4,91	3,14	1,5	327	corde da superfície da madeira		9,35	4,714	3,928	
	12,5	100	4,49	31-Jan	6,5	3,11	1,5	430	corde da superfície da madeira		44,77	6,240	5,200	
58	9	100	3,23	31-Jan	4,82	2,87	1,5	321	corde da madeira		49,23	6,427	5,356	
	9	100	3,23	31-Jan	6,09	2,35	1,5	402	corde da madeira e da superfície da madeira		88,54	8,120	6,767	
59	14	100	5,03	31-Jan	4,99	2,41	1,5	329	corde da madeira		-0,80	4,277	3,564	
	14	100	5,03	31-Jan	6,04	4,52	1,5	390	corde da madeira		20,08	5,177	4,314	
60	10	100	3,59	31-Jan	5,99	4,12	1,5	394	corde da madeira		66,85	7,188	5,990	
	10	100	3,59	31-Jan	6,18	2,84	1,5	407	corde da madeira		72,14	7,416	6,180	
			média =		5,482	3,055					36,595	5,886	4,905	
50	14	100	5,03	14-Fev	6,09	1,89	1,5	402	corde da madeira e da superfície da madeira		21,07	5,220	4,350	
	14	100	5,03	14-Fev	5,75	1,65	1,5	380	corde da madeira e da superfície da madeira		14,31	4,929	4,107	
51	9	100	3,23	14-Fev	5,07	2,75	1,5	336	corde da madeira		56,97	6,760	5,633	
	9	100	3,23	14-Fev	4,71	2,26	1,5	311	corde da superfície da madeira		45,82	6,280	5,233	
52	12	100	4,31	14-Fev	5,11	2,08	1,5	340	corde da madeira e da superfície da madeira		18,56	5,110	4,258	
	12	100	4,31	14-Fev	4,99	1,74	1,5	333	corde da madeira		15,78	4,990	4,158	
53	12	100	4,31	14-Fev	5,28	2,14	1,5	351	corde da madeira e da superfície da madeira		22,51	5,280	4,400	
	12	100	4,31	14-Fev	5,08	1,74	1,5	338	corde da madeira e da superfície da madeira		17,87	5,080	4,233	
54	10	100	3,59	14-Fev	5,95	3,27	1,5	395	corde da madeira e da superfície da madeira		65,74	7,140	5,950	
	10	100	3,59	14-Fev	6,41	2,72	1,5	419	corde madeira, sup madeira e interf cola-fibra		78,55	7,692	6,410	
			média =		5,444	2,224					35,717	5,848	4,873	
55	13	100	4,67	26-Fev	2,56	1,13	1,2	212	corde em bloco da madeira		-45,18	2,363	1,969	
	13	100	4,67	26-Fev	4,24	2,47	1,2	351	corde da superfície da madeira e do interface cola-fibra		-9,21	3,914	3,262	
61	12	100	4,31	26-Fev	3,75	1,19	1,2	309	corde da superfície da madeira e do interface madeira-cola		-12,99	3,750	3,125	
	12	100	4,31	26-Fev	5,9	1,86	1,2	489	corde da madeira e da superfície da madeira		36,89	5,900	4,917	
63	12	100	4,31	26-Fev	4,72	1,68	1,2	392	corde da madeira e da superfície da madeira		9,51	4,720	3,933	
	12	100	4,31	26-Fev	5,14	1,89	1,2	425	corde da madeira e da superfície da madeira		19,26	5,140	4,283	
64	12	100	4,31	26-Fev	4,91	2,38	1,2	404	corde da madeira e da superfície da madeira		13,92	4,910	4,092	
	12	100	4,31	26-Fev	6,23	2,26	1,2	514	corde da madeira e da superfície da madeira		44,55	6,230	5,192	
			média =		4,68125	1,8575						10,274	4,616	3,847
66	12	100	4,31	28-Fev	4,49	2,14	1,2	370	corde da superfície da madeira e do interface madeira-cola			4,18	4,490	3,742
	12	100	4,31	28-Fev	4,71	1,83	1,2	391	corde da madeira e da superfície da madeira	9,28		4,710	3,925	
69	12	100	4,31	28-Fev	4,99	2,69	1,2	410	corde da madeira e da superfície da madeira	15,78		4,990	4,158	
	12	100	4,31	28-Fev	5,61	2,41	1,2	462	corde da madeira e da superfície da madeira	30,16		5,610	4,675	
88	12	100	4,31	28-Fev	5,33	0	1,2	442	corde da madeira e da superfície da madeira	23,67		5,330	4,442	
	12	100	4,31	28-Fev	5,54	2,35	1,2	459	corde da madeira e da superfície da madeira	28,54		5,540	4,617	
			média =		5,116667	2,284						20,803	5,189	4,325
77	12	100	4,31	20-Mar	5,71	3,2	1,2	472	corde da madeira e da superfície da madeira			32,48	5,710	4,758
	12	100	4,31	20-Mar	5,68	2,53	1,2	470	corde da madeira e da superfície da madeira			31,79	5,680	4,733
94	12	100	4,31	20-Mar	4,49	2,04	1,2	375	corde da madeira e da superfície da madeira			4,18	4,490	3,742
	12	100	4,31	20-Mar	5,19	1,95	1,2	428	corde da madeira e da superfície da madeira		20,42	5,190	4,325	
103	12	100	4,31	20-Mar	3,67	1,46	1,2	308	corde da superfície da madeira		-14,85	3,670	3,058	
	12	100	4,31	20-Mar	4,35	1,37	1,2	363	corde da madeira		0,93	4,350	3,625	
105	12	100	4,31	20-Mar	4,44	2,75	1,2	367	corde da madeira em bloco		3,02	4,440	3,700	
	12	100	4,31	20-Mar	5,1	4,21	1,2	420	corde da madeira e da superfície cola-fibra		18,33	5,100	4,250	
			média =		4,82875	2,43875						13,010	4,829	4,024
117	12	100	4,31	23-Abr	3,66	1,56	1,2	305	corde da superfície da madeira e da interface madeira-cola			-15,08	3,660	3,050
	12	100	4,31	23-Abr	5,52	1,71	1,2	456	corde da madeira em bloco	28,07		5,520	4,600	
118	12	100	4,31	23-Abr	3,78	1,46	1,2	314	corde da superfície da madeira e da interface madeira-cola	-12,30		3,780	3,150	
	12	100	4,31	23-Abr	4,91	1,68	1,2	408	corde da madeira	13,92		4,910	4,092	
119	12	100	4,31	23-Abr	5,08	1,71	1,2	419	corde da madeira e da superfície da madeira	17,87		5,080	4,233	
	12	100	4,31	23-Abr	5,51	1,74	1,2	454	corde da madeira e da superfície da madeira	27,84		5,510	4,592	
121	12	100	4,31	23-Abr	5,15	2,56	1,2	426	corde da madeira	19,49		5,150	4,292	
	12	100	4,31	23-Abr	5,02	1,62	1,2	416	corde da superfície da madeira	16,47		5,020	4,183	
123	12	100	4,31	23-Abr	4,51	2,2	1,2	375	corde da madeira e da superfície da madeira	4,64		4,510	3,758	
	12	100	4,31	23-Abr	4,19	1,4	1,2	347	corde da superfície da madeira e da interface madeira-cola	-2,78		4,190	3,492	
			média =		4,733	1,764					10,105	4,733	3,944	
124	12	100	4,31	26-Abr	4,23	1,77	1,2	351	corde da madeira e da superfície da madeira		-1,86	4,230	3,525	
	12	100	4,31	26-Abr	5,17	1,65	1,2	427	corde da madeira		19,95	5,170	4,308	
125	12	100	4,31	26-Abr	4,45	3,14	1,2	367	corde da superfície da madeira		3,25	4,450	3,708	
	12	100	4,31	26-Abr	5,69	2,23	1,2	469	corde da madeira		32,02	5,690	4,742	
127	12	100	4,31	26-Abr	4,23	1,77	1,2	351	corde da superfície da madeira		-1,86	4,230	3,525	
	12	100	4,31	26-Abr	4,32	1,46	1,2	358	corde da madeira e da superfície da madeira		0,23	4,320	3,600	
			média =		4,626625	1,898						8,017	4,627	3,856
Totais														
Média					4,79	1,99						10,91	4,78	3,98
Desvio Padrão					0,75	0,70						18,05	0,78	0,65
Coef. Variação [%]					6,36	2,83					0,60	6,15	6,15	

Valores que apresentam diferenças relativamente à referência
Valores que não permitem que o resultado não seja válido

Série 7: Provetes Lcolagem= 15 cm													
Condições higrotérmicas: T = 20°C e HR = 65%													
Comprimento de colagem = 150 mm													
Ensaio monotónico													
Provete n°	b [mm]	Comprimento de amarração [mm]	N esperado [kN]	Dia do ensaio	N obtido [kN]	Deformação [mm]	Velocidade do ensaio [kgf/s]	Duração do ensaio [180 a 420] [s]	Tipo de rotura	Ganho		Tensão de corte	
										Nobt/Nesp %	[N/mm ²]		
62	12	150	6,46	28-Fev	6,42	2,2	1,2	531	corte da madeira e da interface cola-fibra		-0,62	3,567	
	12	150	6,46	28-Fev	6,52	2,44	1,2	539	corte da madeira e da superfície da madeira		0,93	3,622	
65	12	150	6,46	28-Fev	5,82	3,05	1,2	483	corte da madeira e da interface madeira-cola		-9,91	3,233	
	12	150	6,46	28-Fev	6,68	2,59	1,2	512	corte da madeira e da superfície da madeira		3,41	3,711	
67	13	150	7	28-Fev	7,79	3,97	1,2	637	corte da madeira, da superfície da madeira e da interface cola-fibra		11,29	3,995	
	13	150	7	28-Fev	7,99	3,02	1,2	655	corte da madeira		14,14	4,097	
68	12	150	6,46	28-Fev	6,65	3,54	1,2	547	corte da madeira, da superfície da madeira e da interface cola-fibra		2,94	3,694	
	12	150	6,46	28-Fev	7,7	2,78	1,2	632	corte da madeira e da superfície da madeira		19,20	4,278	
74	12	150	6,46	28-Fev	7,59	3,05	1,2	625	corte da madeira, da superfície da madeira e da interface cola-fibra		17,49	4,217	
	12	150	6,46	28-Fev	8,09	3,17	1,2	668	corte da madeira, da superfície da madeira e da interface cola-fibra		25,23	4,494	
76	12	150	6,46	28-Fev	8,58	6,16	1,2	702	corte da madeira, da superfície da madeira e da interface cola-fibra		32,82	4,767	
	12	150	6,46	28-Fev	4,99	3,08	1,2	412	corte da superfície da madeira (colagem afectada pelo ensaio anterior)		-22,76	2,772	
78	12	150	6,46	28-Fev	7,34	2,75	1,2	603	corte da madeira e da superfície da madeira		13,62	4,078	
	12	150	6,46	28-Fev	8,52	2,93	1,2	701	corte da madeira e da superfície da madeira		31,89	4,733	
média =					7,3607692	3,195					9,976	3,947	
80	12	150	6,46	20-Mar	6,74	2,5	1,2	557	corte pela interface cola-fibra		4,33	3,744	
	12	150	6,46	20-Mar	6,92	2,56	1,2	571	corte da madeira e da superfície da madeira		7,12	3,844	
104	12	150	6,46	20-Mar	5,84	2,08	1,2	485	corte da madeira em bloco		-9,60	3,244	
	12	150	6,46	20-Mar	7,95	3,63	1,2	654	corte da madeira e interface cola fibra		23,07	4,417	
106	12	150	6,46	20-Mar	3,45	1,59	1,2	289	corte por tracção da madeira - NO		-46,59	1,917	
	12	150	6,46	20-Mar	7,26	5	1,2	597	corte da superfície da madeira e rotura da cola		12,38	4,033	
média =					6,942	2,893333333						-1,548	3,533
84	12	150	6,46	23-Mar	6,35	4,36	1,2	523	corte da madeira e da superfície da madeira			-1,70	3,528
	12	150	6,46	23-Mar	6,26	2,41	1,2	517	corte da superfície da madeira			-3,10	3,478
87	12	150	6,46	23-Mar	6,38	2,78	1,2	527	corte da superfície da madeira			-1,24	3,544
	12	150	6,46	23-Mar	6,5	2,14	1,2	536	corte da madeira, da superfície da madeira e da interface cola-fibra	0,62		3,611	
89	12	150	6,46	23-Mar	6,85	3,33	1,2	566	corte da superfície da madeira	6,04		3,806	
	12	150	6,46	23-Mar	7,25	2,56	1,2	598	corte da superfície da madeira	12,23		4,028	
102	12	150	6,46	23-Mar	5,88	2,32	1,2	486	corte da superfície da madeira	-8,98		3,267	
	12	150	6,46	23-Mar	7,42	2,26	1,2	613	corte da madeira - NO	14,86		4,122	
média =					6,61125	2,77						1,909	3,657
109	12	150	6,46	02-Abr	6,15	2,32	1,2	510	corte da madeira e da superfície da madeira			-4,80	3,417
	12	150	6,46	02-Abr	4,91	1,83	1,2	407	corte da madeira e da superfície da madeira		-23,99	2,728	
110	12	150	6,46	02-Abr	6,1	3,23	1,2	507	corte da madeira		-5,57	3,389	
	12	150	6,46	02-Abr	6,25	2,17	1,2	515	corte da madeira e da superfície da madeira		-3,25	3,472	
112	12	150	6,46	02-Abr	5,74	1,92	1,2	473	corte da superfície da madeira e do interface madeira-cola		-11,15	3,189	
	12	150	6,46	02-Abr	6,02	1,83	1,2	497	corte da madeira		-6,81	3,344	
média =					5,8616667	2,216666667						-9,262	3,256
114	12	150	6,46	13-Abr	6,11	2,23	1,2	510	corte da madeira e da superfície da madeira			-5,42	3,394
	12	150	6,46	13-Abr	7,22	2,08	1,2	597	corte da madeira e da superfície da madeira			11,76	4,011
115	12	150	6,46	13-Abr	5,66	2,5	1,2	466	corte da superfície da madeira e do interface madeira-cola			-12,38	3,144
	12	150	6,46	13-Abr	5,85	2,5	1,2	484	corte da madeira em bloco	-9,44		3,250	
116	12	150	6,46	13-Abr	6,95	2,93	1,2	574	corte da superfície da madeira	7,59		3,861	
	12	150	6,46	13-Abr	6,79	2,2	1,2	561	corte da madeira em bloco	5,11		3,772	
média =					6,43	2,406666667						-0,464	3,572
Totais													
Média					6,76	2,82						4,21	3,74
Desvio Padrão					0,86	0,89						12,75	0,46
Coef. Variação [%]					7,90	3,19					0,33	8,17	
<p>Valores que apresentam diferenças relativamente à referência</p> <p>Valores que não permitem que o resultado não seja válido</p>													

Série 8: Ensaios cíclicos														
Condições higrotérmicas: T = 20°C e HR = 65%														
Comprimento de colagem = 50 mm														
Ensaio cíclico														
Provete nº	b [mm]	Comprimento de amarração [mm]	N esperado [kN]	Dia do ensaio	N obtido [kN]	Deformação [mm]	Velocidade do ensaio [kgf/s]	Duração do ensaio [s]	Rotura no ciclo	Tipo de rotura	Ganho Nobt/Nesp %	Tensão de corte [N/mm ²]		
132	12	50	2,15	17-Abr	2,89	1,65	10	974	21	corte da superfície da madeira e do interface madeira-cola	34,42	4,817		
	12	50	2,15	17-Abr	2,76	1,1	10	973	21	corte da superfície da madeira			28,37	4,600
133	12	50	2,15	17-Abr	2,34	1,34	10	641	14	corte da madeira e da superfície da madeira	8,84	3,900		
	12	50	2,15	17-Abr	3,22	1,34	10	978	21	corte da superfície da madeira	49,77	5,367		
134	12	50	2,15	17-Abr	3,17	1,34	10	978	21	corte da superfície da madeira	47,44	5,283		
	12	50	2,15	17-Abr	2,7	1,22	10	973	21	corte da madeira	25,58	4,500		
135	12	50	2,15	18-Abr	2,59	0,52	10	925	21	corte da superfície da madeira	20,47	4,317		
	12	50	2,15	18-Abr	2,83	1,16	10	975	21	corte da madeira	31,63	4,717		
136	12	50	2,15	18-Abr	2,91	1,31	10	976	21	corte da madeira e da superfície da madeira	35,35	4,850		
	12	50	2,15	18-Abr	2,34	1,01	10	349	8	corte da superfície da madeira	8,84	3,900		
média =					2,775	1,199						29,070	4,604	
143	12	50	2,15	26-Abr	3,11	2,32	10	978	21	corte da superfície da madeira	10,23	5,183		
	12	50	2,15	26-Abr	2,59	1,37	10	972	21	corte da superfície da madeira	-5,58	4,317		
144	12	50	2,15	26-Abr	2,24	1,22	10	24	1	corte da madeira	22,79	3,733		
	12	50	2,15	26-Abr	2,37	1,22	10	495	11	corte da madeira e da superfície da madeira	10,23	3,950		
145	12	50	2,15	26-Abr	2,37	1,13	10	308	7	corte da superfície da madeira	44,65	3,950		
	12	50	2,15	26-Abr	2,03	0,85	10	23	1	corte da superfície da madeira	20,47	3,383		
146	12	50	2,15	26-Abr	2,64	1,43	10	972	21	corte da superfície da madeira	4,19	4,400		
	12	50	2,15	26-Abr	2,37	1,1	10	402	9	corte da madeira e da superfície da madeira	10,23	3,950		
147	12	50	2,15	26-Abr	2,37	1,16	10	403	9	corte da superfície da madeira	10,23	3,950		
	12	50	2,15	26-Abr	2,37	0,98	10	119	3	corte da madeira e da superfície da madeira	10,23	3,950		
148	12	50	2,15	26-Abr	2,37	1,46	10	308	7	corte da madeira	10,23	3,950		
	12	50	2,15	26-Abr	2,37	1,59	10	969	21	corte da madeira e da superfície da madeira	10,23	3,950		
150	12	50	2,15	26-Abr	2,81	1,8	10	974	21	corte da superfície da madeira e da interface madeira-cola	30,70	4,683		
	12	50	2,15	26-Abr	2,67	1,25	10	972	21	corte da madeira e da superfície da madeira	24,19	4,450		
média =					2,4771429	1,348571429						15,216	4,129	
151	12	50	2,15	27-Abr	2,62	1,25	10	972	21	corte da superfície da madeira	21,86	4,367		
	12	50	2,15	27-Abr	2,85	1,1	10	974	21	corte da superfície da madeira	32,56	4,750		
152	12	50	2,15	27-Abr	2,37	1,16	10	403	9	corte da madeira, da superfície da madeira e da interface madeira-cola	10,23	3,950		
	12	50	2,15	27-Abr	2,5	1,19	10	971	21	corte da madeira	16,28	4,167		
153	12	50	2,15	27-Abr	2,37	1,25	10	638	14	corte da superfície da madeira e da interface madeira-cola	10,23	3,950		
	12	50	2,15	27-Abr	2,37	1,07	10	448	10	corte da madeira e da superfície da madeira	10,23	3,950		
154	12	50	2,15	27-Abr	2,75	1,77	10	974	21	corte da madeira	27,91	4,583		
	12	50	2,15	27-Abr	2,91	1,25	10	976	21	corte da superfície da madeira e da interface madeira-cola	35,35	4,850		
155	12	50	2,15	27-Abr	2,37	1,83	10	168	4	corte da madeira	10,23	3,950		
	12	50	2,15	27-Abr	4,22	1,56	10	987	21	corte da superfície da madeira	96,28	7,033		
156	12	50	2,15	27-Abr	3,03	1,31	10	977	21	corte da superfície da madeira e da interface madeira-cola	40,93	5,050		
	12	50	2,15	27-Abr	2,37	1,1	10	733	16	corte da madeira	10,23	3,950		
157	12	50	2,15	27-Abr	2,72	1,92	10	974	21	corte da madeira e da superfície da madeira	26,51	4,533		
	12	50	2,15	27-Abr	3,06	1,37	10	977	21	corte da superfície da madeira	42,33	5,100		
159	12	50	2,15	27-Abr	2,87	1,37	10	975	21	corte da madeira	33,49	4,783		
	12	50	2,15	27-Abr	4,48	2,62	10	991	21	corte da madeira e da interface madeira-cola	108,37	7,467		
média =					2,6779724	1,445	21					33,314	4,777	
Totais					2,71	1,35						25,92	4,51	
Média					0,48	0,38						22,20	0,80	
Desvio Padrão					5,67	3,60						1,17	5,67	
Coef. Variação [%]														

Valores que apresentam diferenças relativamente à referência
 Valores que não permitem que o resultado não seja válido

