



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Ciências Sociais e Humanas

Fibras têxteis para reforço de estruturas

Edgar Barão Vidal de Almeida

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Marcin Górski

Covilhã, Outubro de 2010

Agradecimentos

Ao Professor Doutor Marcin Górski, orientador desta dissertação, pela sua orientação, compreensão e tempo disponibilizado.

À minha mãe pelo apoio, paciência, força, compreensão e amor. Por tudo ter feito para me dar esta oportunidade e por ter acreditado em mim.

À minha avó Ana, que sempre foi uma mãe para mim. Saudades.

Ao meu irmão pelo apoio e amizade.

Aos meus amigos pela presença, ajuda e apoio.

E a todos que, directa ou indirectamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Resumo

Com o presente trabalho pretende-se mostrar a importância da recuperação de estruturas com sistemas de fibras têxteis, sejam estas naturais ou artificiais. Fala-se aqui das propriedades e características de diversas fibras naturais que podem ser aplicadas em forma de tecidos, no reforço de estruturas.

São dados exemplos de produtos de fibras artificiais existentes no mercado, assim como as suas propriedades.

Por fim, é apresentado um exemplo do dimensionamento do reforço de uma estrutura, com a comparação entre dois programas de cálculo, que usualmente são usados pelos projectistas, devido à falta de regulamentações.

Palavras-chave:

Fibras naturais, fibras artificiais, FRP (Fiber Reinforced Polymer), compósitos.

Abstract

The present work aims to show the importance of rehabilitation of structures with textile systems, whether natural or artificial. Are shown here several properties and characteristics of various natural fibers that can be applied in the form of textile, in strengthening of structures.

Examples are given of man-made fiber products on the market, as well as their properties.

Finally, an illustrative example of the design of strengthening a structure with a comparison between two calculation programs, which are usually used by designers, due to lack of regulations.

Keywords

Natural fibres, artificial fibres, FRP (Fiber Reinforced Polymer), composites.

Índice

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	15
1.2. Tema	17
1.3. Objectivos da dissertação	17
CAPÍTULO 2. ESTADO DA ARTE	19
2.4. Introdução	21
2.5. Fibras	21
2.5.1. Forma	21
2.5.2. Dimensões	22
2.5.3. Densidade	23
2.5.4. Interacção com a humidade	23
2.5.5. Propriedades mecânicas	24
2.5.5.1. Tenacidade e alongamento	24
2.5.5.2. Plasticidade	24
2.5.6. Propriedades térmicas	25
2.6. Fibras têxteis	25
2.6.1. Fibras naturais	26
2.6.1.1. Vantagens das fibras naturais	27
2.6.1.2. Limitações das fibras naturais	28
2.6.1.3. Fibra de bambu	28
2.6.1.4. Fibra de sisal	29
2.6.1.5. Fibra de Eucalipto	30
2.6.1.6. Fibra de juta	30
2.6.1.7. Fibra de coco	31
2.6.1.8. Fibra de Malva	33
2.6.1.9. Fibra de Piaçaba	33
2.6.1.10. Fibra de Bananeira	33
2.6.2. Fibras artificiais	34
2.6.2.1. Sistemas pré-fabricados	36

2.6.2.2. Sistemas curados “in situ”	37
CAPÍTULO 3. PRODUTOS E APLICAÇÕES	41
3.7. Introdução	43
3.8. Adesivos	43
3.9. Resinas	46
3.10. Produtos S&P Reinforcement	47
3.10.1. Sistemas de fibra de vidro e aramida	48
3.10.1.1. Mantas de fibra de vidro S&P Reinforcement	48
3.10.1.2. Mantas de fibra de aramida disponíveis no mercado	49
3.10.2. Sistemas de fibra de carbono	49
3.10.2.1. Mantas de fibra de carbono S&P Reinforcement	49
3.10.2.2. Laminados de fibra de carbono disponíveis no mercado em duas classes	50
CAPÍTULO 4. CÁLCULO COM RECURSO A SOFTWARE	53
4.1. Introdução	55
4.2. Dimensionamento do reforço de uma viga	55
4.2.1. FRP Lamella	56
4.2.2. FRP-Analysis	72
4.2.3. Conclusão	77
CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES FINAIS	79

Lista de Figuras

Figura 1. Vista ao microscópio das diferentes fibras: a. Algodão, corte longitudinal; b. Algodão, corte transversal; c. Linho, corte longitudinal; d. Linho, corte transversal; e. Sisal, corte longitudinal; f. Sisal corte transversal; g. Carbono, corte longitudinal; h. Carbono, corte transversal; i. Aramida, corte longitudinal; j. Aramida, corte transversal; l. Vidro, corte longitudinal; m. Vidro, corte transversal.	22
Figura 2. Exemplos de fibras têxteis: a. unidireccional; b. bidireccional; c. bidireccional, com combinação de diferentes materiais (carbono, kevlar e fibra de vidro); d.. multidireccional; e. tridimensional/multidimensional.....	26
Figura 3. Sisal, a. planta; b. fibra (7).	29
Figura 4. Estrutura do fruto do coco (12).....	32
Figura 5. Diagramas de tensões/extensões de sistemas compósitos unidireccionais e do aço macio (27).....	35
Figura 6. Constituintes do laminado de um sistema de FRP pré-fabricado (unidireccional) (1).	37
Figura 7. Sistema de tecido FRP curado “in situ” (1).	38
Figura 8. Diagrama de tensão/deformação de vários sistemas FRP e de aço (1).....	39
Figura 9. Sistema laminado de CFRP pré-fabricado (Sistema Sika - CarboDur) (1).....	44
Figura 10. Corte longitudinal da viga.....	56
Figura 11. Corte transversal da viga.....	56
Figura 12. Escolha da geometria da secção transversal da peça.....	57
Figura 13. Propriedades da secção transversal da viga.....	58
Figura 14. Propriedades do betão.....	58
Figura 15. Propriedades do aço.	59
Figura 16. Armadura de flexão.	60
Figura 17. Armadura de flexão no apoio.	60
Figura 18. Solicitações anteriores ao reforço com FRP.	61
Figura 19. Solicitações posteriores ao reforço com FRP.....	62
Figura 20. Selecção do sistema FRP.	62
Figura 21. Secção transversão do FRP.....	63
Figura 22. Dimensionamento.....	64
Figura 23. Extensões em estado limite último (ELU).....	64
Figura 24. Extensões e tensões em estado limite de serviço (ELS).	65
Figura 25. Introdução de dados para amarração do FRP na extremidade.	66
Figura 26. Amarração do FRP na extremidade.	66
Figura 27. Cintagem mínima do reforço à flexão no ponto E.	67
Figura 28. Dados para determinação da amarração da armadura de flexão no apoio.....	68

Figura 29. Amarração da armadura de flexão no apoio.	68
Figura 30. Armadura e cargas de esforço transverso.	69
Figura 31. Escolha do sistema FRP para reforço do esforço transverso.....	70
Figura 32. Definição da secção transversão do FRP para reforço ao esforço transverso.....	70
Figura 33. Esforços resistentes ao corte.	71
Figura 34. Amarração dos estribos externos adicionais.	71
Figura 35. Introdução de dados para o cálculo do reforço à flexão.	73
Figura 36. Momentos resistentes e áreas necessárias pós-reforço.	73
Figura 37. Diagramas de tensões/extensões.	74
Figura 38. Determinação do número de tiras de FRP necessárias.	74
Figura 39. Verificação da amarração.....	75
Figura 40. Verificação do esforço transverso.	76
Figura 41. Determinação das camadas para esforço transverso.	76

Lista de Tabelas

Tabela 1. Densidades de algumas fibras	23
Tabela 2. Tenacidade e alongamento de rotura de algumas fibras (3)	24
Tabela 3. Propriedades de diversas fibras naturais (6).....	27
Tabela 4. Propriedades de mecânicas e físicas do bambu (7), (11).	28
Tabela 5. Propriedades de mecânicas e físicas da fibra de sisal (7), (11).....	29
Tabela 6. Propriedades de mecânicas e físicas da fibra de eucalipto (7).	30
Tabela 7. Propriedades de mecânicas e físicas da fibra de juta (7), (11).	31
Tabela 8. Propriedades de mecânicas e físicas da fibra de coco (7), (11).	32
Tabela 9. Propriedades de mecânicas e físicas da fibra de malva (11).	33
Tabela 10. Propriedades de mecânicas e físicas da fibra de piaçaba (11).	33
Tabela 11. Propriedades de mecânicas e físicas da fibra de bananeira (11).....	34
Tabela 12. Principais características das fibras contínuas (28)	36
Tabela 13. Descrição das mantas e tecidos empregues nos sistemas FRP curados “in situ” (1).	38
Tabela 14. Propriedades mecânicas do adesivo, do betão e do aço (1).	46
Tabela 15. Propriedades das mantas de fibra de vidro.	48
Tabela 16. Propriedades da manta de fibra de aramida.	49
Tabela 17. Propriedades das mantas de fibra de carbono.	50
Tabela 18. Propriedades dos laminados de fibra de carbono para aplicação em superfícies. .	51
Tabela 19. Laminados de fibra de carbono para aplicação em ranhuras.	52

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1. Tema

Devido à cada vez maior necessidade de reconstruir e reaproveitar as estruturas existentes na construção, em vez de se fazerem novas estruturas, o uso de sistema de reforço é extremamente importante. Pois estes sistemas de reforço não são apenas aplicados a estruturas degradadas e danificadas, mas também a estruturas devidamente dimensionadas e conservadas, que mais tarde se decide dar um novo uso, que não foi contemplado no seu projecto. Com o aumento das cargas, algo é necessário fazer para manter a estrutura em funcionamento, poupando-se assim muito tempo e dinheiro. A solução aqui demonstrada nesta dissertação é o uso de fibras, quer estas sejam naturais ou artificiais. É uma solução rápida e económica e que apesar de especializada necessita de pouca mão de obra.

1.2. Objectivos da dissertação

Com esta dissertação pretende-se apresentar as propriedades físicas e mecânicas dos diversos tipos de fibras. Assim como apresentar alguns materiais disponíveis no mercado, suas características e aplicações. Devido à falta de regulamentações no dimensionamento de reforço com têxteis, e uma vez que os projectistas usam programas de cálculo para o seu dimensionamento, pretende-se fazer a comparação entre dois destes programas de cálculo, recorrendo ao dimensionamento do reforço de uma estrutura corrente.

Capítulo 2

ESTADO DA ARTE

2.1. Introdução

O betão armado, com ou sem pré-esforço, tem mostrado a suas potencialidades ao longo do tempo, sendo uma das melhores opções na área da construção civil. É notória a sua evolução após a 2ª Guerra Mundial, onde as estruturas se foram tornando mais esbeltas e arrojadas (1).

Com esta evolução, também surgem alguns problemas até aqui ignorados, como a durabilidade das estruturas e a falta de controlo de qualidade na produção de betão armado. Hoje em dia, muitas das estruturas atingem o tempo de vida para o qual foram projectadas, mas há as que apresentam uma degradação prematura (1).

É muito frequente que certas estruturas ao fim de algum tempo mudem de funções, passando muitas vezes a suportar cargas mais elevadas que não eram contempladas no projecto inicial. Para se efectuarem estas alterações deve-se fazer um estudo de reforço da estrutura.

Existem também casos de acidentes, como por exemplo impactos (automóveis e outros), sismos ou outros desastres naturais, que podem deixar elementos estruturais severamente danificados, inviabilizando o uso das estruturas.

O reforço de estruturas com fibras têxteis, quer estas sejam naturais ou químicas, é uma resposta a este tipo de solicitações, em que é necessário reforçar uma estrutura já existente e evitando assim a sua demolição ou substituição. Podendo assim continuar a ser utilizada, para os mesmos ou novos fins.

2.2. Fibras

A fibra é um elemento caracterizado pela sua flexibilidade, finura e grande comprimento relativamente ao diâmetro, que o tornam apto para fins têxteis. Podem ser caracterizadas quanto à forma, dimensões, densidade, interações com a humidade, propriedades mecânicas, etc.

2.2.1. Forma

Quanto à forma as fibras diferem de umas para as outras, tanto em relação à sua secção transversal, como em relação ao seu corte longitudinal.

Na Figura 1 são apresentados alguns exemplos de fibras que apresentam secção transversal e corte longitudinal muito diferentes quando observados ao microscópio.

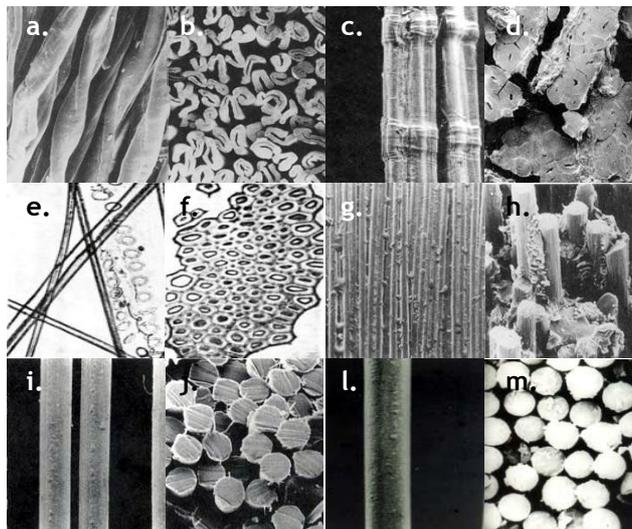


Figura 1. Vista ao microscópio das diferentes fibras: a. Algodão, corte longitudinal; b. Algodão, corte transversal; c. Linho, corte longitudinal; d. Linho, corte transversal; e. Sisal, corte longitudinal; f. Sisal corte transversal; g. Carbono, corte longitudinal; h. Carbono, corte transversal; i. Aramida, corte longitudinal; j. Aramida, corte transversal; l. Vidro, corte longitudinal; m. Vidro, corte transversal.

2.2.2. Dimensões

É importante o conhecimento da finura e do comprimento das fibras, pois dele depende a qualidade dos tecidos. Quanto mais fina for a fibra, mais fino é o tecido. É necessário o conhecimento destes parâmetros para a configuração das máquinas que vão processar a fiação.

O comprimento das fibras é variável de umas para as outras. A fibra curta por excelência é o algodão, embora para uma mesma matéria se encontrem fibras curtas, médias e longas. Para fibras não naturais, o corte é feito segundo o comprimento desejado, nomeadamente, o comprimento das fibras com que se vai fazer a mistura.

O conhecimento e medição do comprimento das fibras que constituem um lote de matéria-prima é importante para avaliar as características que determinarão a sua transformação em fio, bem como as propriedades finais desse fio e até do tecido.

2.2.3. Densidade

A densidade ou massa volúmica de uma fibra pode ser determinada com grande precisão e por isso as fibras podem ser identificadas a partir das mesmas. Como tal são apresentadas na Tabela 1 as densidades de referência de algumas fibras.

Material	Densidade [g/cm ³]
Algodão	1,50 - 1,55
Coco	1,01
Juta	1,50
Linho	1,50
Sisal	1,26
Aramida	1,44
Carbono	1,82
Vidro	2,56

Tabela 1. Densidades de algumas fibras

Em laboratório para a determinação da densidade é utilizado o método da flutuação, que consiste na introdução das fibras num líquido de densidade tal que elas fiquem em equilíbrio, sem afundarem nem flutuarem à superfície. Como os líquidos usados têm densidades conhecidas, quando estas estão em equilíbrio com o líquido isto indica que as fibras e o líquido têm a mesma densidade.

2.2.4. Interação com a humidade

As fibras absorvem mais ou menos humidade do ambiente que as cerca, ficando esta incorporada na sua massa. Diz-se então que uma fibra é mais ou menos higroscópica. Esta propriedade conduz assim a matéria têxtil a um estado ou grau higrométrico que é função da temperatura, da humidade do ar e do estado higrométrico antecedente das fibras.

A resistência das fibras é influenciada pelo grau higrométrico das mesmas, há fibras em que a sua resistência diminui com a humidade, como é o caso da lã, mas há outros casos em que aumenta como no caso do algodão e do linho. Por este motivo, os ensaios mecânicos são realizados em atmosfera padrão, isto é, a 20°C e 65% de humidade relativa.

A elasticidade também é influenciada pela humidade, como a lã por exemplo, que pode distender a seco entre 25% a 40%, e quando mergulhada em água pode chegar aos 100% (2).

2.2.5. Propriedades mecânicas

Entre as várias propriedades das fibras têxteis, as propriedades mecânicas são as mais importantes, pois estas indicam como as fibras reagem à aplicação de forças ao longo do eixo: a força que é necessária usar para causar a rotura da fibra e o alongamento registado no momento da rotura. Destas propriedades resulta o comportamento durante o processamento industrial e mais tarde, durante o uso.

2.2.5.1. Tenacidade e alongamento

A tenacidade mede a força de tracção necessária para atingir a rotura da fibra, ou seja, a medida da resistência da fibra, quanto maior este valor, mais resistente é a fibra. A tenacidade é geralmente expressa em N/Tex, que no Sistema Internacional esta unidade é equivalente a kJ/g.

Alongamento de rotura é o alongamento verificado no ponto de rotura em percentagem do comprimento inicial. Tanto a carga de rotura como o alongamento de rotura são influenciados pela humidade relativa do meio, como já foi referido anteriormente.

Na Tabela 2 são apresentados os valores da tenacidade e do alongamento de rotura de diferentes fibras.

Fibra	Tenacidade [N/Tex]	Alongamento de rotura [%]
Linho	0,26 - 0,62	1,8
Poliéster	0,35 - 0,47	35 - 65
Algodão	0,26 - 0,44	5 - 10
Seda	0,26 - 0,53	20 - 25
Lã	0,09 - 0,53	15 - 35
Juta	0,26 - 0,51	1,7
Cânhamo	0,51 - 0,60	1,8
Aramida (Kevlar)	0,19	4
Carbono	0,11 - 0,17	0,5 - 1
Vidro	0,53 - 0,88	3 - 4

Tabela 2. Tenacidade e alongamento de rotura de algumas fibras (3)

2.2.5.2. Plasticidade

Uma propriedade importante nas fibras sintéticas é a chamada termoplasticidade, que consiste no fenómeno de amolecimento e de fusão destas fibras quando sujeitas a temperaturas suficientemente elevadas. Neste estado, as fibras tornam-se plásticas, as

macromoléculas ficam livres de se moverem e a forma pode ser facilmente alterada por forças exteriores. Quando as fibras arrefecerem tornam-se novamente duras e adquirem uma forma permanente que só é possível alterar por aplicação de temperaturas igualmente elevadas (2).

2.2.6. Propriedades térmicas

As fibras podem ser afectadas pelo calor e as suas propriedades podem ser alteradas em maior ou menor grau dependendo da fibra. É importante saber quais são as alterações estruturais à medida que a temperatura aumenta.

As alterações provocadas nas fibras devido ao calor estão divididas em duas classes, as de primeira ordem e as de segunda ordem. No caso de transições de primeira ordem as alterações envolvem quebra de cadeias do empacotamento macromolecular, e portanto a passagem de um estado de ordem a um estado de desordem (fusão). Numa transição de segunda ordem, as alterações ocorrem sem quebra nem variações das ligações moleculares, ou seja, apenas envolvem estados de comportamentos moleculares diferentes.

As alterações que se verificam nas fibras por acção do calor podem ser diversas, como degradação, contracção, encolhimento ou fixação das fibras termoplásticas.

2.3. Fibras têxteis

As fibras são o elemento constituinte que confere ao material composto as suas características mecânicas: rigidez, resistência à ruptura, etc. Sendo os tipos mais comuns de fibras o vidro, a aramida (kevlar), o carbono, a juta, a sisal, entre outros.

Estas podem ser definidas como sendo unidireccionais, quando estão orientadas segundo uma mesma direcção, a.; bidireccionais, quando as fibras estão orientadas segundo duas direcções ortogonais (tecidos), Figura 2 b. e c.; multidireccionais, com as fibras orientadas em várias direcções, Figura 2 d.; e tridimensionais, quando as fibras são orientadas no espaço tridimensional (tecidos multidimensionais), Figura 2 e. (4).

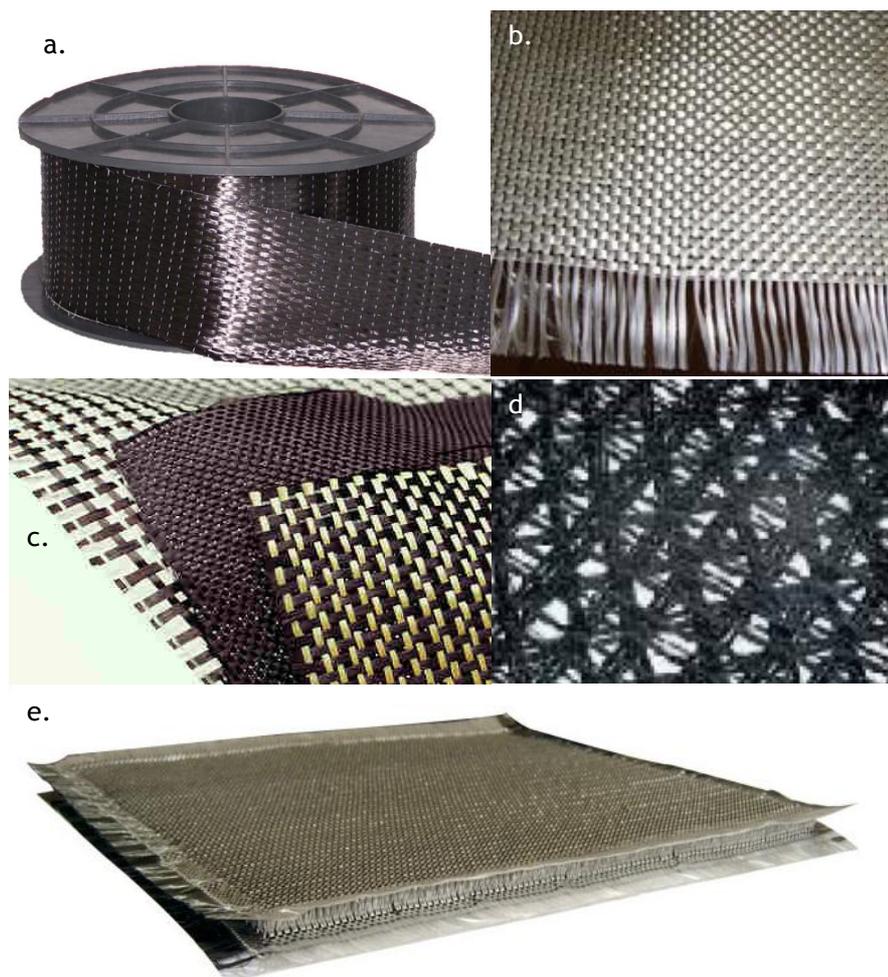


Figura 2. Exemplos de fibras têxteis: a. unidireccional; b. bidireccional; c. bidireccional, com combinação de diferentes materiais (carbono, kevlar e fibra de vidro); d.. multidireccional; e. tridimensional/multidimensional.

2.3.1. Fibras naturais

A utilização dos materiais compósitos começou há 3000 anos, onde os egípcios reforçavam argila ou lama com palha, para utilizarem na construção de blocos. No entanto, com o desenvolvimento de outros materiais mais duráveis como os metais, o interesse nas fibras naturais foi-se perdendo. A partir de então, e até ao início do século XX, a sua utilização praticamente desapareceu. Em 1940 utilizou-se óleo de soja para fabricar esmalte de alta qualidade que podia ser moldado em fibras, e que possuíam uma resistência ao choque 10 vezes superior à do aço. No entanto, este material apresentava grandes inconvenientes, tais como longo tempo de cura e problemas associado à sua moldagem (5).

Actualmente usam-se compósitos de fibras naturais em várias áreas, sendo uma delas a engenharia civil, no reforço de elementos estruturais.

Estas fibras são normalmente usadas para a produção de têxteis, estes podem ter diferentes características, como por exemplo o alinhamento das suas fibras, tendo assim diferentes propriedades e comportamentos. Na Tabela 3 são apresentadas algumas das propriedades mais importantes de algumas fibras naturais.

Propriedades	Fibras				
	Linho	Cânhamo	Juta	Sisal	Algodão
Densidade g/cm ³	1.4	1.48	1.46	1.33	1.51
Resistência à Tracção 10E ⁶ N/m ²	800 - 1500	550 - 900	400 - 800	600 - 700	400
Módulo de Young E (GPa)	60 - 80	70	10 - 30	38	12
Módulo de Young Específico (E/densidade)	26 - 46	47	7 - 21	29	8
Extensão de rotura (%)	1.2 - 1.6	1.6	1.8	2 - 3	3 - 10
Absorção de humidade (%)	7	8	12	11	8 - 25
Preço/kg (€), em bruto (manta/tecido)	1.5 (2/4)	0.6 - 1.8 (2/4)	0.35 (1.5/0.9 - 2)	0.6 - 0.7	1.5 - 2.2

Tabela 3. Propriedades de diversas fibras naturais (6)

2.3.1.1. Vantagens das fibras naturais

Necessitam de baixos níveis de energia para a sua produção. Têm uma baixa densidade que poderá atingir no máximo 1,5 g/cm³, que comparativamente com outras fibras não naturais, como por exemplo a fibra de vidro que pode atingir valores de 2,5 g/cm³.

São materiais que apresentam grande resistência e rigidez específica, devido ao seu baixo peso. A sua comercialização encontra-se facilmente a nível mundial, sendo mais económicas comparativamente com outras fibras. Não são abrasivas, o que faz com que haja menores desgastes nas ferramentas.

Têm um bom comportamento em colisões (não estilhaça), e também permitem construção em formato celular, o que faz com que os componentes tenham boas propriedades acústicas e de protecção térmica (5).

2.3.1.2. Limitações das fibras naturais

Existem problemas em termos de qualidade, pois as características das fibras dependem muito da sua produção, o que faz com que seja necessário um bom acompanhamento e sementes de qualidade, de forma a garantir a obtenção de boas propriedades. A sua produção exige um controlo mais apertado do que as fibras artificiais.

Devido à origem natural, pode ocorrer um elevada concentração de defeitos nas fibras o que provoca uma baixa resistência ao impacto. Têm uma grande afinidade com a água, o que pode significar maiores problemas de degradação e menor capacidade de aderência às matrizes (5).

2.3.1.3. Fibra de bambu

A plantação de bambu geralmente é encontrada em áreas tropicais, subtropicais e até em áreas temperadas onde estão presentes os factores ecológicos necessários ao seu desenvolvimento. O bambu, pertence à classe das gramíneas, que é subdividida em quatro famílias e aproximadamente cinquenta géneros. Dentre todos os géneros apenas alguns podem ser usados para fins estruturais. São estes: Arundinaria, Bambusa, Cephalostachyum, Dendrocalamus, Gigantocloa, Melocanna, Phyllostachys, Schizostachyum, Guadua e Chusquea (7).

O uso das fibras de bambu tem como vantagens uma boa resistência à tracção, um rápido crescimento, o baixo consumo de energia na produção das fibras, e aliado a tudo isto o seu baixo custo. Na Tabela 4 pode-se ver as propriedades mecânicas e físicas da fibra e polpa do bambu.

Ref.	Compr. (mm)	Diâmetro (mm)	Módulo de Elasticidad e (GPa)	Resistência à tracção (MPa)	Alongamento na ruptura (%)	Densidade (kg/m ³)	Obs.
Smook (1989) (8)	2.8	15	-	-	-	-	Polpa
Guimarães (1987) (9)	-	-	28.2	564	3.22	-	Fibra
Sinha (1975) (10)	3.06	7	-	-	-	1600	Fibra
Savastano (2000) (11)	-	-	5.1 - 24.6	73 - 505	3.2	-	Fibra

Tabela 4. Propriedades de mecânicas e físicas do bambu (7), (11).

2.3.1.4. Fibra de sisal

O nome sisal é oriundo de uma cidade costeira em Yucatan, México, tendo como significado, água fria (12). O sisal, Figura 3, é uma das fibras vegetais que possui maior resistência à tracção e uma das mais indicadas para o uso como reforço em argamassas (7).

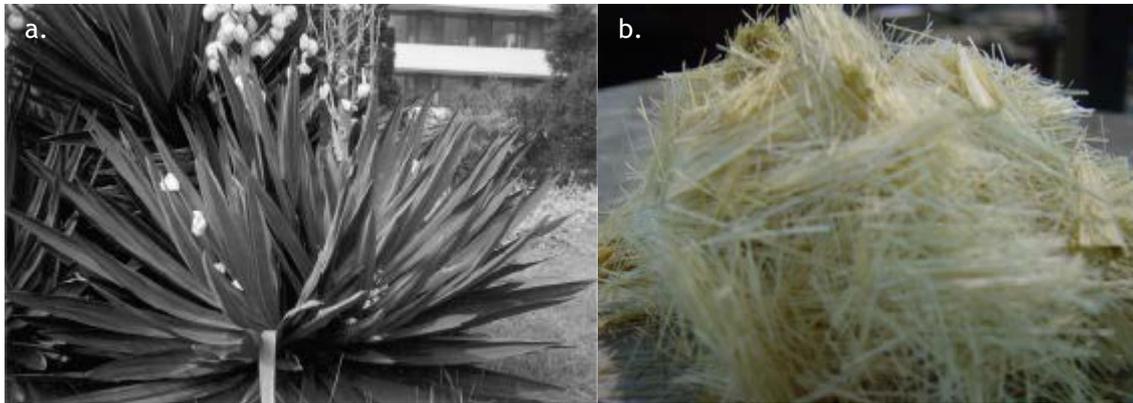


Figura 3. Sisal, a. planta; b. fibra (7).

Como se pode ver através da Tabela 5, as propriedades mecânicas e físicas do sisal apresentam valores muito diferentes, o mesmo também pode ocorrer com outras fibras vegetais. Este facto pode ser explicado pela espécie da planta, local de plantio e metodologia de ensaios.

Ref.	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à tracção (MPa)	Alongamento na ruptura (%)	Densidade (kg/m ³)	Diâmetro (µm)
Guimarães (1987) (9)	14.9	176	29.2	-	-
Chand et al (1988) (13)	9.4 - 22	530 - 640	3 - 7	1450	50 - 300
Toledo Filho (1997) (14)	10.94 - 26.70	227.8 - 230	2.08 - 4.18	750 - 1070	80 - 300
Beaudoin (1990) (15)	13 - 26	1000 - 2000	3 - 5	-	-
Savastano (2000) (11)	15.2	347 - 378	4.9 - 5.4	-	-

Tabela 5. Propriedades de mecânicas e físicas da fibra de sisal (7), (11).

2.3.1.5. Fibra de Eucalipto

O eucalipto é classificado como uma madeira dura sendo que as suas fibras apresentam grandes diferenças em relação às madeiras moles, as suas fibras são muito mais curtas, têm a parede celular mais espessa, possuem maior quantidade de vasos de parede fina e existe uma menor diferença entre as madeiras mais jovens e mais velhas (7).

É de notar, através da Tabela 6, que a resistência à tracção da fibra de eucalipto é muito variável, sendo importante ter em mente que estes valores são influência das diversas espécies existentes de eucalipto. Comparativamente com o sisal, a fibra de eucalipto chega a ter um módulo de elasticidade superior à da primeira.

Ref.	Comp (mm)	Diâmetro (μm)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tracção (MPa)
Hillis et al. (1984) (16)	1	20	-	-
Fordos et al. (1986) (17)	0.9 - 1.2	12 - 30	45	200 - 1300

Tabela 6. Propriedades de mecânicas e físicas da fibra de eucalipto (7).

2.3.1.6. Fibra de juta

A juta é uma fibra vegetal tradicionalmente usada para fazer cordas e sacos. Esta fibra é obtida da haste da planta (*Corchorus capsularis*), tendo o seu comprimento uma variação de 200 a 1500 mm (18). Conforme se pode ver as propriedades mecânicas da juta na Tabela 7, os valores apresentados são baixos quando comparados com os das fibras artificiais. De qualquer forma estes são valores adequados para aplicações sujeitas a baixas solicitações mecânicas.

Ref.	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tracção (MPa)	Alongamento na ruptura (%)	Diâmetro (μm)	Densidade (kg/m^3)	Comp. (mm)
Chawla (1979) (19)	21.78	270.5	-	-	-	-
D'Almeida (1987) (18)	21.1	270.5	1.28	-	-	-
Chand (1988) (13)	17.48	239.46	1.16	200	-	-
Aziz (1987) (20)	26 - 32	250 - 350	2 - 3	100 - 400	120 - 140	180 - 800
Beaudoin (1990) (15)	26 - 32	250 - 350	1.5 - 1.9	-	-	-
Savastano (2000) (11)	-	230	3.7 - 6.5	-	-	-

Tabela 7. Propriedades de mecânicas e físicas da fibra de juta (7), (11).

2.3.1.7. Fibra de coco

A fibra de coco é obtida do fruto proveniente do coqueiro (*Cocos nucifera*). A fibra é extraída da parte mais externa do fruto, chamada exocarpo, e do endocarpo, como se pode ver na Figura 4. O cultivo do coco está concentrado principalmente nas áreas tropicais da Ásia e do leste da África (21). O comprimento das fibras pode variar de 150 a 300 mm. Existem três tipos principais de fibras, a mais longa e fina, conhecida como fibra branca, é usada na produção de cordas e esteiras. Uma fibra mais grossa, usualmente utilizada para fazer capachos e uma fibra mais curta usada no enchimento de colchões (7).

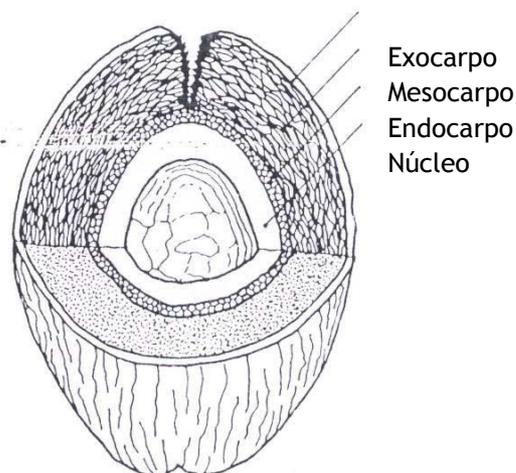


Figura 4. Estrutura do fruto do coco (12).

Como se pode ver na Tabela 8, que mostra as propriedades mecânicas da fibra de coco, esta fibra possui uma resistência à tracção que varia de 69 a 200 MPa, possuindo um módulo de elasticidade baixo, quando comparada com as fibras vegetais anteriormente citadas.

Ref.	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tracção (MPa)	Alongamento na ruptura (%)	Diâmetro (μm)	Densidade (kg/m^3)
Guimarães (1987) (9)	2.74	176	29.2	-	-
Chand et al. (1988) (13)	6.2	131 - 175	-	100 - 450	1150
Azis et al. (1987) (20)	1.9 - 2.6	100 - 200	10 - 25	100 - 400	-
Paramasivam et al. (1984) (22)	2	69.3	-	300	1140
Kulkarni et al. (1981) (23)	-	163 - 226	30 - 42	200 - 300	-
Beaudoin (1990) (15)	2	71	-	-	-
Savastano (2000) (11)	2.8	95 - 118	23.9 - 51.4	-	-

Tabela 8. Propriedades de mecânicas e físicas da fibra de coco (7), (11).

2.3.1.8. Fibra de Malva

A malva é uma planta herbácea anual, da família Malvaceae, *Urena lobata*. Esta planta distribui-se geograficamente pelas regiões tropicais, subtropicais e temperadas de África, América e Europa. A fibra de malva é muito usada, na confecção de sacos para armazenar produtos como açúcar, café e cacau. Assemelha-se na cor e textura e na resistência à de juta (24). Na Tabela 9 pode-se ver as propriedades da fibra de malva.

Ref.	Absorção máxima (%)	Alongamento na ruptura (%)	Resistência à tracção (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Savastano (2000) (11)	182.2	5.2	160	17.4

Tabela 9. Propriedades de mecânicas e físicas da fibra de malva (11).

2.3.1.9. Fibra de Piaçaba

Piaçaba é o nome pelo qual é conhecida a palmeira *Attalea funifera* Martius, uma espécie nativa do sul do Estado da Bahia, Brasil. O nome piaçaba é de origem tupi, querendo dizer “planta fibrosa”. Esta fibra é muito usada em utensílios caseiros, como vassouras e outros. Esta palmeira caracteriza-se por produzir uma fibra longa, resistente, rígida, lisa, de textura impermeável e de alta flexibilidade. A necessidade de poucos recursos financeiros na sua plantação, manutenção e exploração, tornam a esta palmeira uma opção atraente (25). Na Tabela 10 são apresentadas as propriedades da fibra de piaçaba.

Ref.	Absorção máxima (%)	Alongamento na ruptura (%)	Resistência à tracção (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Savastano (2000) (11)	34.4 - 108	6	143	5.6

Tabela 10. Propriedades de mecânicas e físicas da fibra de piaçaba (11).

2.3.1.10. Fibra de Bananeira

A banana é uma fruta tropical que cresce em regiões quentes, em que a sua produção se dá o ano inteiro. É originária da Ásia e foi levada para a América latina em 1516 (26). Após da colheita do fruto o pseudocaule da bananeira é cortado, este devido ao grande volume que ocupa é considerado um resíduo. Como é um material fibroso, pode ter novas utilizações e é usado como matéria-prima de diversos produtos, como por exemplo, o papel. Do pseudocaule

é possível extrair vários tipos de fibras, mas as suas características dependem da espécie, das condições climáticas e do tipo de solo. Algumas das características gerais são fibras longas e amareladas, mas facilmente branqueadas, sedosas e brilhantes, têm elevada resistência à ruptura e módulo de elasticidade, como se pode ver na Tabela 11.

Ref.	Absorção máxima (%)	Alongamento na ruptura (%)	Resistência à tracção (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Savastano (2000) (11)	407	2.7	384	20 - 51

Tabela 11. Propriedades de mecânicas e físicas da fibra de bananeira (11).

2.3.2. Fibras artificiais

A evolução da ciência decorrida no século XX, originou a descoberta de novos materiais, como é o caso dos compósitos. Esta foi uma descoberta importante para a engenharia civil, pois com comportamentos mais eficientes, veio colmatar lacunas dos materiais utilizados até à data. Aliando-se as fibras a novos materiais, surgiram então os compósitos ou polímeros, reforçados com fibras, denominadas fibras contínuas ou longas, conhecidos pela sigla internacional FRP “Fiber Reinforced Polymer”. São três os principais FRP comercializados, são eles o vidro, GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer), o carbono, CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) e a aramida, usualmente conhecida por kevlar, AFRP (Aramid Fiber Reinforced Polymer). Os seus comportamentos dependem dos materiais pelos quais são constituídos, do comprimento, da forma e da composição das fibras, dependem ainda das propriedades mecânicas das resinas da matriz e da adesão ou ligação entre as fibras e a matriz (1). Na Figura 5 podem-se ver os diagramas de tensões/extensões de cada um destes FRP assim como do aço macio.

Estes compósitos são geralmente caracterizados por uma alta resistência à tracção, rigidez adaptável às necessidades de cada projecto, duráveis, resistentes à corrosão, elevada resistência à fadiga, bom amortecimento ao choque, bom isolamento electromagnético, baixo peso específico, de fácil aplicação em espaços confinados, reduzidos custos de mão-de-obra, capazes de absorver e dissipar energia, disponibilidade praticamente ilimitada de tamanhos, geometria e dimensões.

Os compósitos têm também certas desvantagens, que não devem ser negligenciadas. Ao contrário do aço, que se comporta de uma forma elasto-plástica, os compósitos comportam-se de forma elástica linear até à falha, sem presença de tensão de cedência, embora na altura da falha ocorram grandes deformações, sem qualquer aviso significativo ou deformação plástica, sendo a ductilidade reduzida. Além disso, o custo dos compósitos em relação ao peso

é várias vezes superior à do aço, mas quando a comparação de custos é feita com base na força, tornam-se menos desfavorável. Alguns materiais compósitos, como o carbono e a aramida, têm coeficientes de expansão térmica incompatível com o betão. A sua exposição a temperaturas elevadas, como em caso de incêndio, pode causar a degradação prematura e colapso, algumas resinas epóxicas têm o seu início de amolecimento a cerca de 45 °C a 70 °C. Os materiais compósitos não devem ser pensados como um substituto completo do aço, ou de outros materiais, nas aplicações de intervenção estrutural. As vantagens oferecidas por eles devem ser avaliadas contra potenciais inconvenientes, e as decisões finais quanto à sua utilização deve ser feita em função de diversos factores, incluindo não só aspectos de desempenho mecânico, mas também de facilidade de construção e durabilidade a longo prazo (27).

O Japão é um dos principais produtores de fibras contínuas e a sua classificação quanto aos tipos e características das fibras mais correntes nas situações de reforço estrutural são apresentadas na Tabela 12.

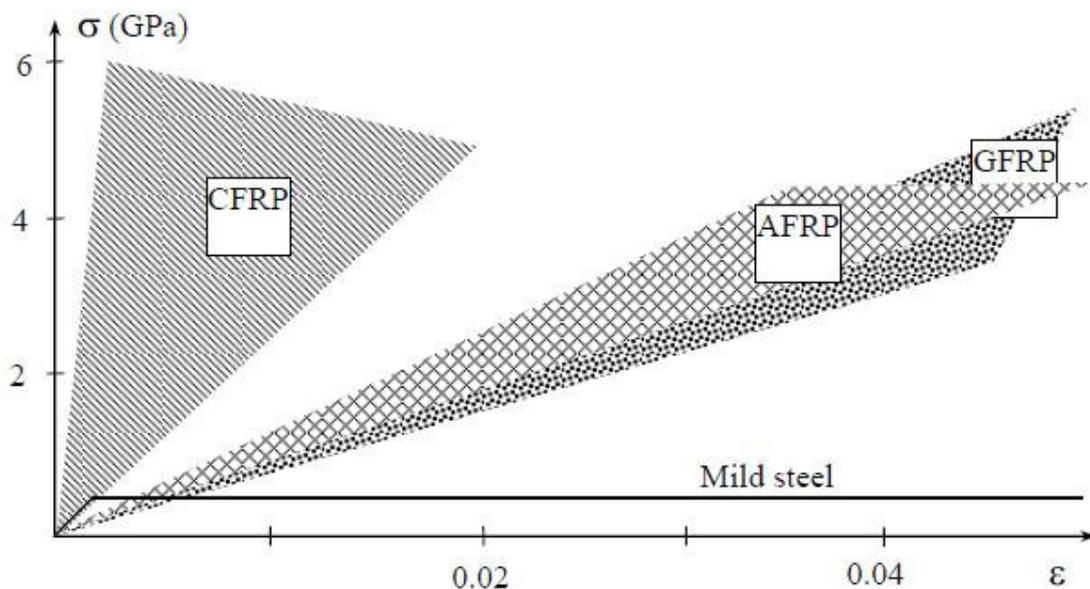


Figura 5. Diagramas de tensões/extensões de sistemas compósitos unidireccionais e do aço macio (27).

Tipo de fibras		Resistência à tração [MPa]	Módulo elasticidade [GPa]	Alongamento máximo [%]	Peso específico
Carbono (C)	Elevada resistência	3430 - 4900	230 - 240	1,5 - 2,1	1,8
	Elevado mód. elast.	2940 - 4600	392 - 640	0,45 - 1,2	1,8 - 2,1
Aramida (A)	Elevado mód. elast.	2900	111	2,4	1,45
	Elevada resistência	3500	74	4,6	1,39
Vidro (G)	Vidro - E	3500	74	4,7	2,6

Tabela 12. Principais características das fibras contínuas (28)

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

2.3.2.1. Sistemas pré-fabricados

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

Consiste na substituição das tradicionais chapas metálicas rígidas, por sistemas laminados semi-rígidos de FRP do tipo unidireccional. Estes resultam da impregnação de um conjunto de feixes ou camadas contínuas de fibras por uma resina termoendurecível, consolidadas por um processo de pultrusão com controlo de espessura e da largura do compósito, Figura 6. A orientação unidireccional das fibras confere ao laminado a maximização da resistência e da rigidez na direcção longitudinal. Em contraste, os casos de arranjos bidireccionais e multidireccionais das fibras no plano repartem as propriedades mecânicas pelas várias direcções. Como tal, estes casos ainda não são seguramente aplicados e controlados pela construção civil. Tratando-se de produtos finalizados de FRP, com as características mecânicas e físicas garantidas pelos seus produtores, neste trabalho, designar-se-á por laminados à classe dos sistemas de FRP pré-fabricados nestas condições.

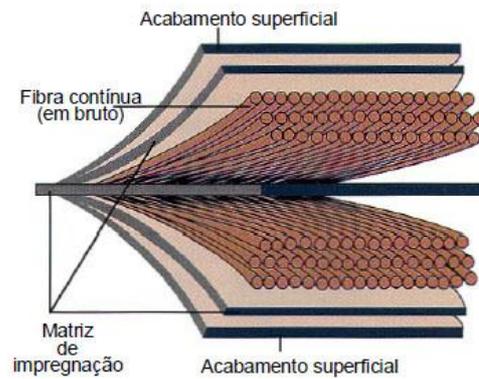


Figura 6. Constituintes do laminado de um sistema de FRP pré-fabricado (unidireccional) (1).

2.3.2.2. Sistemas curados “in situ”

Actualmente, outro processo credível nas aplicações de colagem a elementos de betão consiste na aplicação de feixes de fibras contínuas, com a forma de fios, mantas ou tecidos em estado seco ou pré-impregnado, sobre um adesivo epóxico previamente espalhado na superfície a reforçar, Tabela 13. O adesivo tem as funções de impregnar o grupo de fibras, proporcionar a polimerização do conjunto num compósito de FRP e, por fim, desenvolver propriedades de aderência na ligação do FRP ao material existente (28). Segundo o conceito de FRP, este sistema só o será fisicamente após a execução do reforço, isto é, polimerização ou endurecimento “in situ” e deverá ter um comportamento semelhante ao dos laminados pré-fabricados, desde que a superfície a reforçar esteja convenientemente regularizada (1). Na Figura 7 é apresentado um esquema do aspecto geral de um sistema tecido FRP curado “in situ”.

Designação		Descrição	Orientação das fibras	Estado
Mantas “sheets”		Disposição de faixas contínuas e paralelas de fibras sobre uma rede de protecção. (200 - 300 g/m ²)	Unidireccionais	Secas
				Pré-impregnadas
Tecidos	“Woven roving”	Entrelaçamento direccionado de dois fios ou faixa de fibras (600 - 800 g/m ²)	Bidireccionais: 0/90° 0/+45° 0/-45°	Secos
	“Mat”	Espalhamento aleatório das fibras num tapete rolante que, depois, é pulverizado com resina para adquirir consistência.	Multidireccional	
	“Cloth”	Fios contínuos tecidos por um processo têxtil convencional. (150 - 400 g/m ²)	Unidireccional ou bidireccional ou multidireccional	

Tabela 13. Descrição das mantas e tecidos empregues nos sistemas FRP curados “in situ” (1).

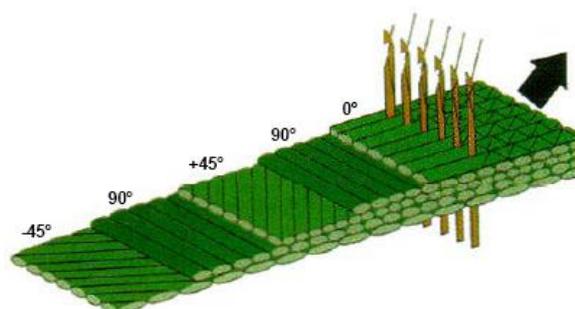


Figura 7. Sistema de tecido FRP curado “in situ” (1).

Das várias fibras disponíveis no mercado, os sistemas reforçados com fibras de carbono CFRP apresentam características que melhor se ajustam aos compromissos exigidos pelo reforço de estruturas de betão com a técnica de colagem. No confronto com as restantes fibras destacam-se factores decisivos como as maiores resistências à tracção e à compressão,

o valor do módulo de elasticidade longitudinal mais próximo do do aço, Figura 8, o bom comportamento à fadiga e boa resistência alcalina (1).

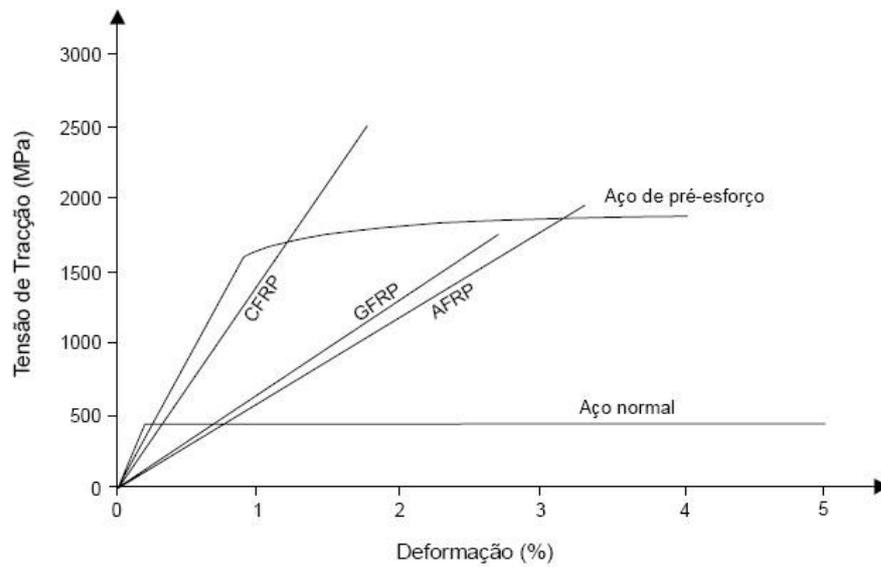


Figura 8. Diagrama de tensão/deformação de vários sistemas FRP e de aço (1).

Capítulo 3

PRODUTOS E APLICAÇÕES

3.1. Introdução

A escolha dos materiais é um processo complexo, pois estes têm de ser seleccionados tendo em conta diversos factores e cada sistema é único. É preciso ter em atenção se o conjunto de fibras, resinas e adesivos são compatíveis, e se foram concebidas de modo a trabalharem em conjunto. Um conjunto de adesivos pode ser bom para fibras, mas não proporcionar uma boa colagem para betão, ou outro material de que seja feita a estrutura em causa.

Actualmente existem vários sistemas de reforço com compósitos de FRP, como os sistemas curados “*in situ*”, pré-fabricados ou pré-curados e outros sistemas especiais, como por exemplo, o envolvimento automático de pilares, o pré-esforço, etc. Estes sistemas existem em diversos fabricantes, e podem ser configurados de diversas formas, dependendo dos tipos de fibras usadas, das resinas, dos adesivos, etc. Dependem também do tipo de estrutura a ser reforçada. Por exemplo, as tiras pré-fabricadas são mais indicadas para superfícies planas e rectas, enquanto os têxteis como são mais flexíveis podem ser usados em superfícies quer planas como curvas. O sistema de envolvimento automático é indicado para casos em que seja necessário o reforço de vários pilares no mesmo local.

Para se conseguir uma boa aderência há dois factores que são muito importantes, sendo estes, a limpeza e a temperatura. A aplicação de qualquer sistema sobre uma superfície suja, nunca vai proporcionar uma boa colagem. Os processos químicos envolvidos nas resinas, necessitam de temperaturas acima de 10 °C para se iniciar a cura, e caso a temperatura desça o tempo de cura aumenta (27).

3.2. Adesivos

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

Os sistemas avaliados utilizam adesivos que têm sido formulados, especificamente, para otimizar o seu comportamento estrutural, na vasta gama de condições ambientais a que possam estar sujeitos. Os adesivos principais nestes sistemas são da classe geral dos epóxidos, dos vinilester e dos poliester insaturados.

No caso dos laminados pré-fabricados, o agente adesivo é um material distinto do compósito de FRP sendo, nas aplicações realizadas na Europa, do tipo epóxido. Nestes, são usados sistemas de resinas de dois componentes, a resina de epóxido e um endurecedor e, regra geral, a primeira é livre de solventes e tem enchimento mineral, como por exemplo quartzo. Um desses exemplos é ilustrado na Figura 9.



Figura 9. Sistema laminado de CFRP pré-fabricado (Sistema Sika - CarboDur) (1)

Nos sistemas de FRP curados “in situ”, o agente adesivo é a própria resina de impregnação das fibras e de polimerização em compósito de FRP. Este apresenta o papel de matriz do FRP e promove a transferência de esforços entre as fibras e destas para a superfície colada.

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

As reacções são lentas a baixas temperaturas, obrigando a tratamentos apropriados abaixo dos 5°C e melhoradas em ambientes quentes. O aumento do número de ligações no adesivo traduz-se num incremento do módulo de elasticidade, da temperatura de transição vítrea, da elasticidade térmica e da resistência química. É de referir ainda, que após um cura à temperatura ambiente, as propriedades do adesivo podem ser implementadas com uma pós-cura a quente.

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

sucesso do adesivo irá depender da correcta preparação e aplicação da mistura, baseada nas especificações do fornecedor.

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

O tempo de utilização (pot life), é o intervalo de tempo, após a mistura da resina base e restantes componentes, durante o qual o material líquido é utilizável sem dificuldade. Esgotado o tempo de utilização, qualquer formulação de resina perde drasticamente as suas características de aderência, pelo que não deve ser utilizada. Os valores podem variar entre uns minutos e várias horas. O tempo de utilização diminui com o aumento da temperatura e da quantidade de material a preparar, uma vez que há libertação de calor durante a cura. A presença de cargas (inertes) aumenta o tempo de utilização, pois estas absorvem parte do calor libertado na reacção, diminuindo a temperatura atingida pela resina.

O tempo de contacto (open time), é o tempo aplicado às formulações para colagem. É o intervalo de tempo que decorre entre o momento em que a formulação é aplicada na superfície a colar e o instante em que esta principia a endurecer e deixa de ser possível efectuar a colagem. A junção das peças deve ser realizada neste intervalo de tempo para que a colagem apresente as características desejadas. O tempo de contacto é influenciado pela temperatura ambiente e pela temperatura do suporte. A natureza da superfície a colar condiciona também as características da colagem.

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

Na Tabela 14 são expostos os valores correntes das principais propriedades mecânicas dos adesivos do epóxico, comparativamente com os correspondentes valores do betão e do aço.

Propriedades	Adesivo	Betão	Aço
Resistência à compressão [MPa]	55 - 110	25 - 150	200 - 2000
Resistência à tracção [MPa]	9 - 20	1 - 4	200 - 2000
Módulo de elasticidade [GPa]	0,5 - 20	20 - 50	200
Coef. De dilatação térmica [$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]	25 - 30	8 - 16	10 - 15
Densidade [kg/m^3]	1450 - 1550	2300	7800
Coeficiente de poisson	0,3	0,2	0,3

Tabela 14. Propriedades mecânicas do adesivo, do betão e do aço (1).

Apesar de não serem formulações do tipo adesivo, devem destacar-se os produtos com capacidade para completar e melhorar o desempenho daquele e que se designam por primários e por regularizadores de superfície. O primário apresenta a característica de penetrar na superfície do betão por capilaridade, de modo a melhorar a propriedade adesiva da superfície, para a recepção da resina de saturação ou o adesivo. Por outro lado, o produto de regularização elimina pequenas irregularidades na superfície com vista a evitar a formação de bolhas de ar e garantir uma superfície lisa para colagem do FRP. Estes dois produtos são indispensáveis, principalmente, para as aplicações de sistemas de FRP endurecidos “in situ”, fios, mantas e tecidos (1).

3.3. Resinas

A resina que constitui a matriz polimérica dos compósitos tem como função envolver e proteger as fibras das agressões ambientais por forma a garantir uma transferência adequada dos esforços entre estas e impedir os deslocamentos no sentido do alinhamento das fibras ou transversalmente a estas. Nos tecidos e nas mantas, as resinas assumem igualmente a função de colagem, devendo garantir a aderência das fibras à estrutura e entre camadas.

A resina influencia bastante o comportamento do compósito ao corte e à compressão, mas exerce uma influência reduzida na resistência à tracção final do mesmo. As características exigidas às resinas epóxicas, com função resistente, são: boa capacidade de aderência às fibras, tempo de cura longo, baixa retracção durante a cura, módulo de elasticidade da ordem dos 2 GPa, deformação de rotura compatível com as fibras e boa estabilidade face aos agentes químicos (28).

As resinas usadas em materiais compósitos, são normalmente termoendurecíveis ou termoplásticas, sendo as primeiras as de uso mais comum. As características físicas e químicas das matrizes como a temperatura de cura, a viscosidade e a reacção às fibras

influencia a escolha do seu processo de fabricação. A escolha correcta de uma matriz para um sistema compósito, requer que se tenham em conta estes factores.

3.4. Produtos S&P Reinforcement

As fibras usadas por esta empresa são embebidas numa matriz de resina epóxica e são aplicadas como reforços a estruturas já existentes. As fibras podem ser fornecidas em tecido, na forma de manta, ou em laminado pré-curado. Quando as fibras são usadas na forma de manta, a matriz epóxica é aplicada no local de forma manual. No caso de se usar os laminados pré-curados, estes são aplicados directamente ao substrato.

A S&P Reinforcement dispõe de quatro tipos de fibras, sendo elas, carbono, aramida, E-glass e AR-glass. Existem aqui dois tipos de fibra de vidro, a E-glass, que é uma fibra de vidro não revestida; e a AR-glass, que é uma fibra de vidro resistente a alkalis.

A E-glass como não é revestida não é resistente aos alkalis, havendo assim um risco no uso desta fibra em estruturas de betão recentes. No caso de mesmo assim se optar por esta solução a E-glass deve ser completamente submersa numa matriz epoxy. Contudo não há qualquer problema na aplicação desta em estruturas de betão já antigas, que é o que acontece na maioria dos casos. Devido à baixa durabilidade da E-glass, usa-se um elevado factor de redução das suas propriedades.

A AR-glass é resistente a alkalis e é adequada para usar como reforço de confinamento, juntamente com qualquer matriz de resina epoxi. Devido à sua elevada durabilidade é aconselhado o uso de um baixo factor de redução.

A aramida é um material muito resistente, sendo por isto aconselhado o seu uso em aplicações especiais de reforço, como o reforço de colunas rectangulares ou reforço contra impactos e explosões. Devido ao seu elevado custo, a aramida pode ser na maioria dos casos substituída por fibra de vidro ou fibra de carbono.

A fibra de carbono tem várias vantagens quando comparada com os restantes materiais, tem um elevado módulo de elasticidade, o coeficiente de expansão térmica é muito baixo (aproximadamente 50 vezes mais baixo que o do aço), excelente resistência à fadiga, excelente resistência a ataques químicos. Não corrói, é altamente resistente ao gelo/degelo e ao ataque dos sais.

3.4.1. Sistemas de fibra de vidro e aramida

Só são fornecidos na forma de mantas. Nas mantas unidireccionais as fibras são posicionadas em linha recta, numa única direcção, mas com o seu manuseamento, estas tendem a ficar com uma ligeira forma ondulada. São usados factores de redução na sua concepção para considerar as irregularidades devido a técnicas de manuseamento. Nas mantas bidireccionais, as fibras são tecidas, e por isso, assumem uma forma ondulada. Mais uma vez é usado um factor de redução devido a essa situação.

3.4.1.1. Mantas de fibra de vidro S&P Reinforcement

As mantas de fibra de vidro são fornecidas em rolos de 670 mm de largura com 50 m de comprimento. A sua aplicação é principalmente recomendada para protecção de explosões, reforço de alvenaria, reforço de edifícios históricos e reforço sísmico.

Na Tabela 15 são apresentadas as propriedades das mantas de fibra de vidro disponíveis no mercado pela marca S&P Reinforcement.

Propriedades da fibra	E 50/50	AR 50/50	E 90/10 A	AR 90/10 A	E 90/10 B	AR 90/10 B
Módulo de elasticidade [kN/mm ²]	73	65	73	65	73	65
Resistência à tracção [N/mm ²]	3400	3000	3400	3000	3400	3000
Peso da manta (cada direcção) [g/m ²]	175	175	400	400	800	800
Densidade [g/cm ³]	2,6	2,68	2,6	2,68	2,6	2,68
Alongamento na ruptura [%]	4,5	4,3	4,5	4,3	4,5	4,3
Espessura (peso da fibra/densidade) [mm]	0,067	0,065	0,154	0,149	0,308	0,299
Secção transversal teórica para 1000 mm de largura [mm ²]	67	65	154	149	308	299
Factor de redução (recomendado pela S&P)	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Força de tensão para 1000 mm de largura (cada direcção) [kN]	162,7	139,3	374,0	319,3	748,0	640,7

Tabela 15. Propriedades das mantas de fibra de vidro.

3.4.1.2. Mantas de fibra de aramida disponíveis no mercado

As mantas de fibra de aramida são fornecidas em rolos com 300 mm de largura e 100 m de comprimento, em casos especiais em que sejam necessárias outras medidas é possível o seu fornecimento.

Este produto é excelente para protecção a impactos e explosões.

A Tabela 16 mostra as propriedades da manta de fibra de aramida comercializada pela S&P Reinforcement.

Propriedades (unidireccionais)	S&P A-Sheet 120
Módulo de elasticidade [kN/mm ²]	120
Resistência à tracção [N/mm ²]	2900
Peso da fibra (direcção principal) [g/m ²]	290
Peso por unidade de área da manta [g/m ²]	320
Densidade [g/cm ³]	1,45
Alongamento na ruptura [%]	2,5
Espessura (peso da fibra/densidade) [mm]	0,20
Secção transversal teórica para 1000 mm de largura [mm ²]	200
Factor de redução (recomendado pela S&P)	1,3
Força de tensão para 1000 mm de largura (cada direcção) [kN]	446,2

Tabela 16. Propriedades da manta de fibra de aramida.

3.4.2. Sistemas de fibra de carbono

Os sistemas de fibra de carbono existem tanto em mantas como em laminados pré-curados. Na sua produção são usadas fibras com elevado módulo de elasticidade. O módulo de elasticidade é um parâmetro decisivo quando se compara os vários tipos de mantas de carbono e laminados.

3.4.2.1. Mantas de fibra de carbono S&P Reinforcement

As mantas de carbono da S&P Reinforcement são fornecidas em rolos com larguras de 300 ou 600 mm e com 100 m de comprimento. São indicadas para reforço à flexão, reforço axial de colunas e para substituição de estribos em colunas.

Na Tabela 17 são apresentadas as propriedades mecânicas das diversas soluções de fibra de carbono disponibilizadas pela S&P Reinforcement.

Propriedades (unidireccionais)	C-Sheet 240 (200)	C-Sheet 240 (300)	C-Sheet 240 (400)	C-Sheet 240 (600)	C-sheet 640 (400)
Módulo de elasticidade [kN/mm ²]	240	240	240	240	640
Resistência à tracção [N/mm ²]	3800	3800	3800	3800	2650
Peso da fibra (direcção principal) [g/m ²]	200	300	400	600	400
Peso por unidade de área da manta [g/m ²]	230	330	430	640	430
Densidade [g/cm ³]	1,7	1,7	1,7	1,7	2,1
Alongamento na ruptura [%]	1,55	1,55	1,55	1,55	0,4
Espessura (peso da fibra/densidade) [mm]	0,117	0,176	0,234	0,352	0,190
Secção transversal teórica para 1000 mm de largura [mm ²]	117	176	234	352	190
Factor de redução (recomendado pela S&P)	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Força de tensão para 1000 mm de largura (cada direcção) [kN]	370,5	557,3	744,0	1114,6	419,6

Tabela 17. Propriedades das mantas de fibra de carbono.

3.4.2.2. Laminados de fibra de carbono disponíveis no mercado em duas classes

Os laminados de fibra de carbono, são fornecidos em rolos de 100 m e 150 m, também podem ser cortados à medida, apesar de sair mais dispendioso. Podem ser pedidas medidas especiais, além das standardizadas. Estes laminados, são usados externamente colados, para reforço à flexão de estruturas em betão, madeira ou pedra natural.

É a solução indicada para diversas situações como quando se pretende dar um novo uso à estrutura, e é necessário modificar o seu sistema estático ou é necessário aumentar a carga aplicada nesta. Para o reforço da capacidade de desempenho da estrutura, como a redução da deflexão, absorção de vibrações ou o reforço sísmico. Ou a reparação de defeitos estruturais, como danos causados devido a corrosão de armaduras, acidentes, como impactos ou explosões, ou mesmo para correcção de erros cometidos na fase de cálculos.

São diversas as vantagens deste sistema de reforço, como o baixo peso próprio, a pequena espessura, é uma aplicação económica, uma vez que não necessita de equipamentos especiais para levantamentos ou de suporte, tem elevada resistência, elevado módulo de elasticidade, excelente comportamento à fadiga, é resistente à corrosão e pode ser revestido com tinta.

Na Tabela 18 e na Tabela 19 podem-se ver as propriedades dos laminados de fibra de carbono S&P Reinforcement disponíveis no mercado.

Tipo de Laminado / Medidas [mm]	Área da secção	Módulo de elasticidade médio	Resistência à tracção com alongamento de 0,6%	Resistência à tracção com alongamento de 0,8%
150/2000	[mm²]	[kN/mm²]	Resistência à tracção teórica: 1000 N/mm²	Resistência à tracção teórica: 1300 N/mm²
50/1.2	60	> 165	60,0 kN	78,0 kN
50/1.4	70	> 165	70,0 kN	91,0 kN
60/1.4	84	> 165	84,0 kN	109,2 kN
80/1.2	96	> 165	96,0 kN	124,8 kN
80/1.4	112	> 165	112,0 kN	145,6 kN
90/1.4	126	> 165	126,0 kN	163,8 kN
100/1.2	120	> 165	120,0 kN	156,0 kN
100/1.4	140	> 165	140,0 kN	182,0 kN
120/1.2	144	> 165	144,0 kN	187,2 kN
120/1.4	168	> 165	168,0 kN	218,4 kN
200/2000	[mm²]	[kN/mm²]	Resistência à tracção teórica: 1250 N/mm²	Resistência à tracção teórica: 1650 N/mm²
50/1,4	70	> 210	87,5 kN	115,5 kN
60/1,4	84	> 210	105,0 kN	138,6 kN
80/1,4	112	> 210	140,0 kN	184,8 kN
90/1,4	126	> 210	157,5 kN	207,9 kN
100/1,4	140	> 210	175,0 kN	231,0 kN
120/1,4	168	> 210	210,0 kN	277,2 kN

Tabela 18. Propriedades dos laminados de fibra de carbono para aplicação em superfícies.

Tipo de Laminado / Medidas [mm]	Área da secção	Módulo de elasticidade	Resistência à tracção recomendada: 1650 N/mm ²
150/2000	[mm ²]	[kN/mm ²]	
10/1,4	14	> 165	23,1 kN
20/1,4	28	> 165	46,2 kN
200/2000	[mm ²]	[kN/mm ²]	Resistência à tracção recomendada: 2050 N/mm ²
10/1.4	14	> 210	28,7 kN
20/1.4	28	> 210	57,4 kN

Tabela 19. Laminados de fibra de carbono para aplicação em ranhuras.

É possível encomendar qualquer um dos produtos anteriormente descritos com medidas diferentes das apresentadas, sendo para isso necessário contactar a empresa e verificar a sua disponibilidade (29).

Capítulo 4

CÁLCULO COM RECURSO A SOFTWARE

4.1. Introdução

Neste capítulo vai-se recorrer a dois programas de cálculo para dimensionar o reforço, com fibra de carbono, de uma viga isostática. Os softwares em causa são o FRP Lamella, disponibilizado pela empresa S&P Reinforcement, e o FRP-Analysis da empresa SIKA. Como estes existem diversos programas para o dimensionamento do reforço, a escolha recaiu sobre estes visto serem as principais empresas do ramo a comercializar estes produtos na Europa.

A razão pela qual se optou pela escolha destes softwares de cálculo e não pelo cálculo analítico deve-se ao facto de estes materiais serem relativamente recentes, e apesar já serem bastante populares em alguns países que já possuem algumas normas para o seu dimensionamento, como é o caso da Suíça, China, Egipto, etc. Em Portugal não existe nenhum documento que regule o dimensionamento do reforço com sistemas FRP, como uma norma Portuguesa ou mesmo um Eurocódigo. Existem documentos internacionais como o Fib Bulletin 14, mas não existe qualquer obrigatoriedade de o seguir. Assim sendo, o que a maior parte dos Engenheiros que fazem o dimensionamento destes sistemas, recorrem aos softwares de cálculo disponibilizados pelos próprios fabricantes.

Devido ao frequente uso destes softwares de cálculo do dimensionamento de sistemas FRP, decidiu-se fazer a comparação entre eles, e mostrar as diferenças entre o uso de cada um e os resultados deles obtidos.

4.2. Dimensionamento do reforço de uma viga

Neste exemplo vai-se considerar uma viga em betão armado, em que a carga a aplicar após o reforço é o dobro da carga considerada na fase do dimensionamento da viga.

A viga é simplesmente apoiada de secção rectangular, com um vão entre pilares de 5 m e uma secção de 0,25 m por 0,50 m. Os pilares têm secção quadrada com 0,25 m de lado. A viga é uma viga interior de uma laje, que a divide em duas lajes quadradas com 5 m de lado, suportando assim a viga as cargas das lajes de um lado e do outro. A viga é composta por quatro varões de vinte milímetros na face inferior, dois varões de doze milímetros na face superior e dois varões de doze milímetros, com função construtiva, a meia altura. É composta ainda por dois ramos de estribos com diâmetro de seis milímetros espaçados de dez centímetros entre si. A viga possui um recobrimento de três centímetros. Na Figura 10 e na Figura 11 são apresentados os cortes com a representação da viga original, antes de ser feito o reforço.

As acções aplicadas na laje são o revestimento com $1,0 \text{ kN/m}^2$, sobrecarga de utilização de $2,0 \text{ kN/m}^2$, na viga é uma parede divisória com $3,5 \text{ kN/m}$. Os materiais são betão de classe C25/30 e aço A400. A laje tem 10 cm de espessura. A viga foi projectada para uma sobrecarga uniformemente distribuída de 10 kN/m , e posteriormente pretende-se aumentar essa sobrecarga para 20 kN/m .

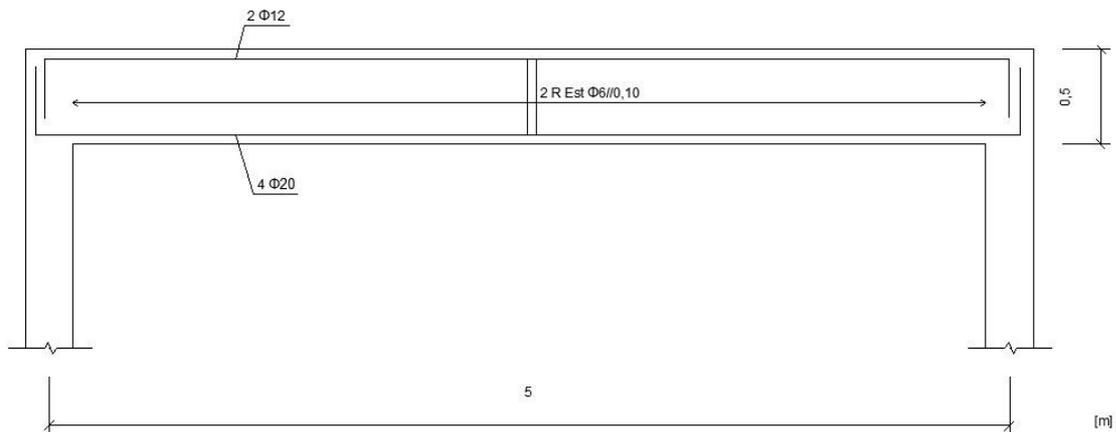


Figura 10. Corte longitudinal da viga.

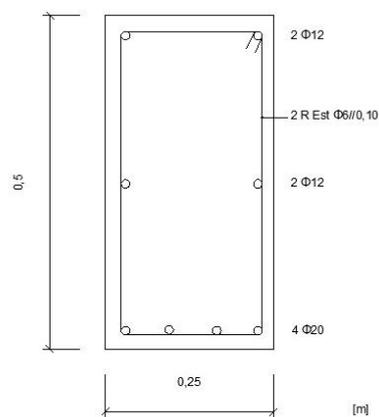


Figura 11. Corte transversal da viga.

4.2.1. FRP Lamella

Este programa destina-se apenas ao dimensionamento de sistemas de reforço em fibra de carbono, sendo necessário outro programa se se pretender a aplicação de outro tipo de fibras. O programa permite efectuar o dimensionamento segundo várias normas, cabendo assim ao utilizador escolher a norma aplicável ao país. Neste caso, o exemplo de dimensionamento a seguir apresentado rege-se segundo o Eurocódigo 2. Este software apenas

permite o dimensionamento do reforço em lajes e vigas, podendo as vigas ser rectangulares, em T ou em I.

Passando agora ao uso do programa de dimensionamento, começa-se por identificar o projecto e escolher a norma que se pretende usar, assim como as unidades. Como se pode ver na Figura 12 o passo seguinte é a escolha do tipo de viga, neste caso rectangular e as suas medidas da secção transversal. Neste momento escolhe-se também o nível de exposição em que se encontra a estrutura, optou-se por estrutura protegida, uma vez que se vai considerar que é uma viga interior. Caso fosse uma estrutura exterior, o programa de cálculo iria considerar um factor de redução devido à temperatura para a aderência de elementos de FRP devido a variações de temperatura de -20°C a 30°C .

Figura 12. Escolha da geometria da secção transversal da peça.

Com estes dados inseridos é nos apresentada uma tabela, que se pode ver na Figura 13, com as propriedades da secção transversal, como a área, o momento de inércia e a distância do eixo neutro.

secção transversal

<p>área da secção transversal</p> $A_g = 1250 \text{ [cm}^2\text{]}$	<p>momento de inércia</p> $I_y = 260417 \text{ [cm}^4\text{]}$
<p>eixo neutro</p> $z_{cg} = 25 \text{ [cm]}$	<p>modulo da secção</p> $W_{superior} = 10417 \text{ [cm}^3\text{]}$ $W_{inferior} = 10417 \text{ [cm}^3\text{]}$

Figura 13. Propriedades da secção transversal da viga.

No quadro referente ao betão, Figura 14, é pedido que se indique qual a classe de betão da estrutura, que pode ser escolhido de uma lista ou introduzido manualmente. Caso seja escolhido da lista são automaticamente preenchidos os campos da resistência característica do betão f_{ck} , do módulo de elasticidade médio do betão E_{cm} e do valor médio da resistência à tracção do betão f_{ctm} . O factor de redução α_{cc} tem em conta os efeitos de longo prazo na resistência à compressão e o α_{ct} tem em conta os efeitos de longo prazo na resistência à tracção, entram automaticamente com o valor de 1, devido à recomendação do EC2, mas estes podem ser alterados. O valor da extensão última do betão ϵ_{cu} é limitado a 3,5 ‰, de acordo com o EC2. A extensão no eixo da curva parabólica ϵ_{c2} é assumida com 2,0 ‰. O coeficiente de segurança parcial γ_c é predefinido para 1,5. O betão escolhido é da classe C20/25.

betão

propriedades

classe:

$f_{ck} = 25 \text{ [N/mm}^2\text{]}$

$\alpha_{cc} = 1 \text{ [-]}$

$\epsilon_{cu} = 3,5 \text{ [‰]}$

$\epsilon_{c2} = 2 \text{ [‰]}$

$E_{cm} = 31476 \text{ [N/mm}^2\text{]}$

$\alpha_{ct} = 1 \text{ [-]}$

$f_{ctm} = 2,56 \text{ [N/mm}^2\text{]}$

coeficiente de segurança parcial

$\gamma_c = 1,5 \text{ [-]}$

Figura 14. Propriedades do betão.

No quadro referente ao aço, Figura 15, é escolhida a classe de aço. E caso o aço pretendido esteja presente na lista, como acontece aqui, o valor da tensão de cedência característica f_{yk} , o valor da tensão característica de pré-esforço $f_{p0,1k}$ e o módulo de elasticidade E_s e E_p são exibidos no quadro. Selecciona-se se o aço é liso ou nervurado, e no caso do pré-esforço se é referente ao cordão ou ao fio. As extensões máximas ϵ_{su} e ϵ_{pu} , para o aço normal e de pré-esforço, respectivamente, são assumidas com 20 ‰, como é recomendado no EC2. Também é recomendado pela mesma norma um factor de redução da tensão característica do aço de pré-esforço $\alpha_p=0,9$. O coeficiente de segurança parcial γ_s para o aço é predefinido como 1,15. A classe de aço usado nesta viga é um A400. Como a viga não é pré-esforçada, nada se altera nesses campos.

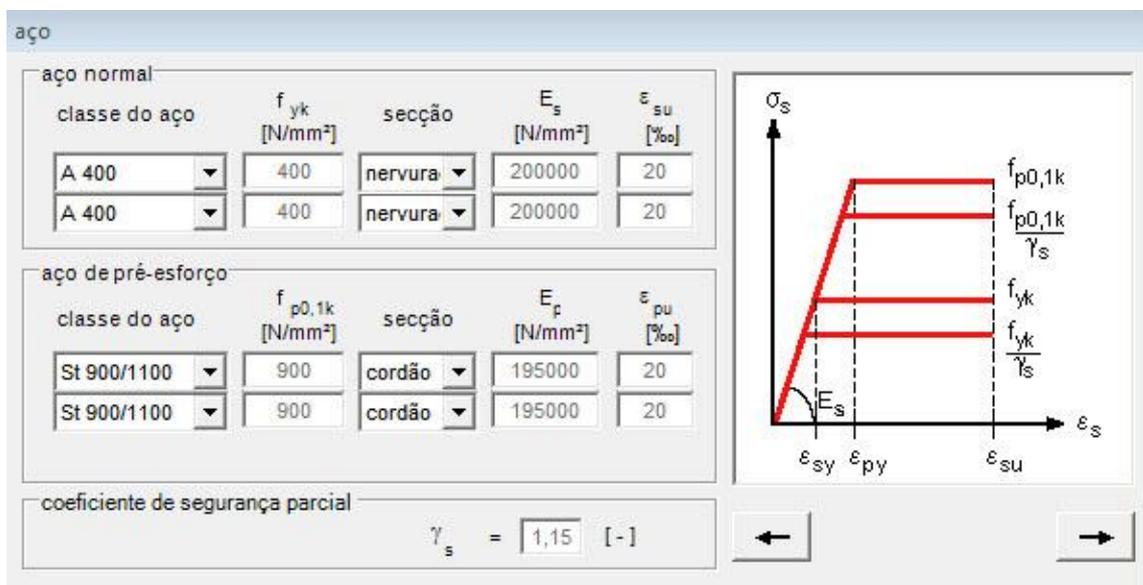


Figura 15. Propriedades do aço.

No quadro seguinte, Figura 16, introduz-se a armadura de flexão, onde se entra com a área da secção transversal de cada uma das armaduras existentes A_s , a posição das armaduras medida desde o topo da peça até ao eixo da armadura z_s e a classe do aço. Caso haja pré-esforço é necessário introduzir a tensão de pré-esforço σ_{p0} após todas as perdas ($t=\infty$) e se o cabo é aderente ou não. Por fim é pedida a espessura de recobrimento dos estribos c_w . A posição da armadura dos momentos positivos foi calculada da seguinte forma: $z_s = h - c - \phi_{est} - \phi_l/2 = 50 - 3 - 0,6 - 1 = 45,4$ cm, e a dos momentos negativos: $z_s = c + \phi_{est} + \phi_l/2 = 3 + 0,6 + 0,6 = 4,2$ cm.

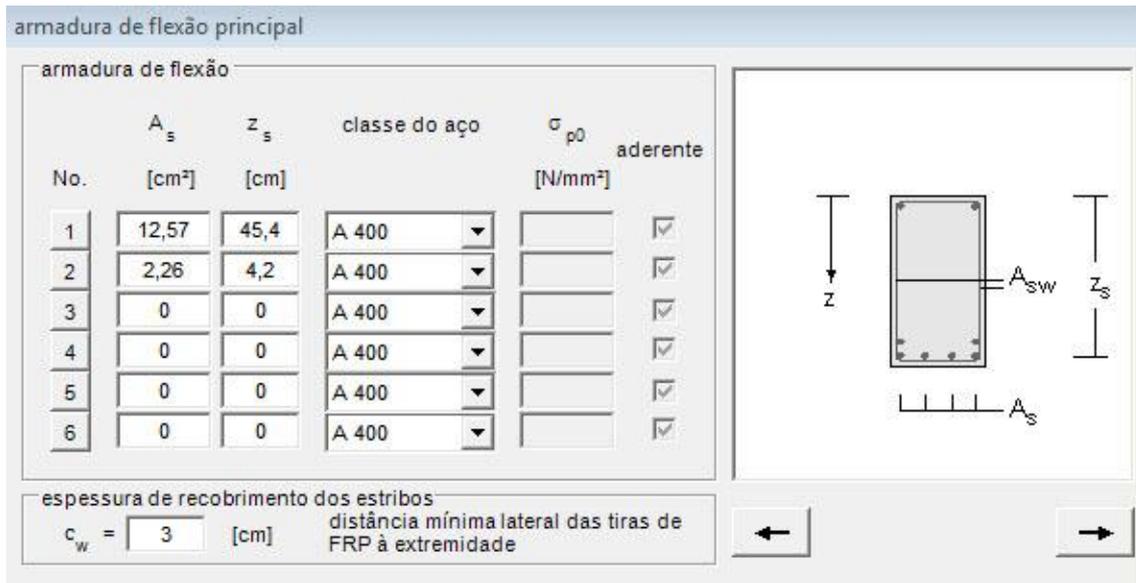


Figura 16. Armadura de flexão.

Os detalhes das armaduras existentes nos apoios são introduzidos na janela de armadura de flexão no apoio, Figura 17. Estas informações são necessárias para verificar a ancoragem na extremidade. Neste quadro, quase todos os valores são assumidos do quadro anterior, apenas sendo necessário introduzir o comprimento de ancoragem no apoio $l_{s,A}$ e o coeficiente de eficiência da ancoragem $\alpha_{1..5}$. No caso desta viga o comprimento de ancoragem no apoio é de 22 cm.

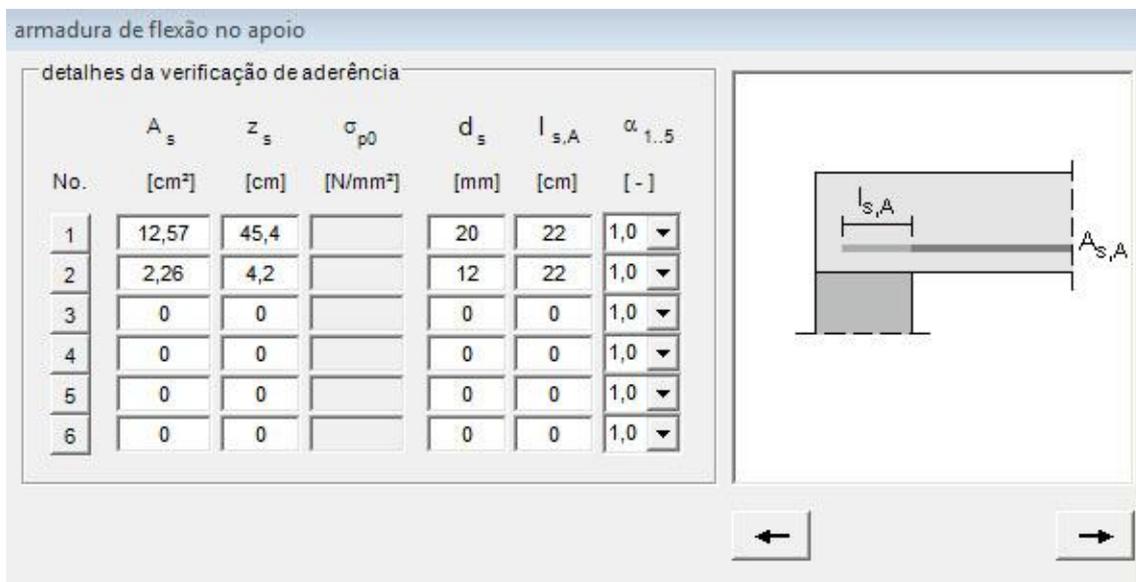


Figura 17. Armadura de flexão no apoio.

A janela de entrada dos dados das solicitações pré-reforço, Figura 18, define as cargas instaladas antes do reforço com FRP. As tensões geradas na estrutura em betão são tidas em

consideração nos cálculos. Nesta fase, escolhe-se o momento, positivo ou negativo, para o qual se quer dimensionar o reforço. Introduce-se o valor do respectivo momento flector característico M_{Ek0} , em que apenas se considera as cargas permanentes aplicadas na estrutura antes do reforço. Caso a estrutura esteja sujeita a esforço axial N_{Ek0} este também é introduzido neste momento, assim como se o esforço é de compressão ou de tracção. Outro valor solicitado é o da força e momento de pré-esforço N_p e M_{p0} , respectivamente, caso haja. É ainda necessário definir se a zona flexo-traccionada da secção transversal se encontra fissurada ou não fissurada. Os elementos de betão armado, em serviço, estão geralmente fissurados. Quanto aos elementos pré-esforçados já depende do grau de pré-esforço.

$$M_{Ek0}^{CP} = \frac{24,13 \times 5^2}{8} = 75,4 \text{ kNm}$$

Figura 18. Solicitações anteriores ao reforço com FRP.

A janela seguinte, Figura 19, é referente às solicitações após o reforço, e aqui introduzem-se os momentos flectores presentes na estrutura depois desta ter sido reforçada e ter recebido a nova carga para a qual se reforçou. Aqui se a estrutura estiver sujeita a esforço axial externo introduz-se o seu valor, assim como o do momento de cálculo M_{Edf} para as cargas esperadas, considerando factores de segurança parcial para cargas permanentes e variáveis, neste caso foram considerados 1,35 e 1,5, respectivamente. Em estado de serviço seleccionou-se a opção exacto e introduziu-se o valor da combinação rara de acções.

$$M_{Edf} = \frac{(1,35 \times 24,13 + 1,5 \times 20) \times 5^2}{8} = 195,55 \text{ kNm}$$

$$M_{Ekf} = \frac{24,13 \times 5^2}{8} + \frac{20 \times 5^2}{8} = 137,91 \text{ kNm}$$

solicitações pós-reforço

estado limite último

momento no vão (positivo) força de compressão

momento no apoio (negativo) força de tracção

$M_{Edf}^* = 195,55$ [kNm] $N_{Edf} = 0$ [kN]

* incluindo o momento secundário do pré-esforço

estado de serviço

exacto $M_{Ekf} = \frac{M_{Edf}}{\gamma_{M,m}}$ $N_{Ekf} = \frac{N_{Edf}}{\gamma_{N,m}}$

aproximado

$M_{Ekf}^* = 137,91$ [kNm] $N_{Ekf} = 0$ [kN]

coeficiente de segurança parcial

$\gamma_{M,m} = 1,42$ [-] $\gamma_{N,m} = 0$ [-]

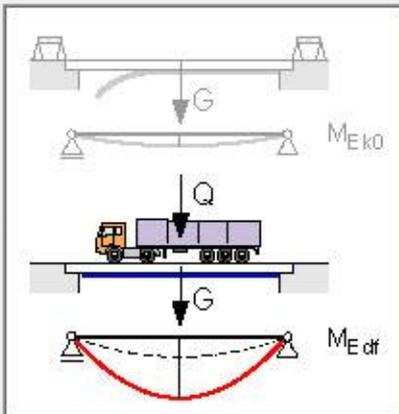


Figura 19. Solicitações posteriores ao reforço com FRP.

Na janela seguinte finalmente escolhe-se o sistema FRP que se vai usar no reforço, Figura 20, e se este vai ser externamente aderido à estrutura ou se os laminados são inseridos na zona de recobrimento das armaduras. Todas as propriedades do sistema FRP escolhido são automaticamente preenchidas, podendo de qualquer forma serem alteradas. No caso em estudo o sistema que se vai escolher é o laminado CFK 150/2000.

sistema FRP

sistema FRP

S&P CFK 150/2000 externamente aderido

S&P Resin 220 laminados inseridos

propriedades

$E_{fk} = 165000$ [N/mm²]

$f_{fk} = 2500$ [N/mm²] $\epsilon_{fu} = 15$ [%]

coeficiente de segurança parcial

$\gamma_f = 1,2$ [-] $\epsilon_{f,limite} = 12,5$ [%]

$k_\epsilon = 1$ [-]

deformação máxima de cálculo de acordo com o guideline

$\epsilon_{f,limite} = 7,5$ [%]

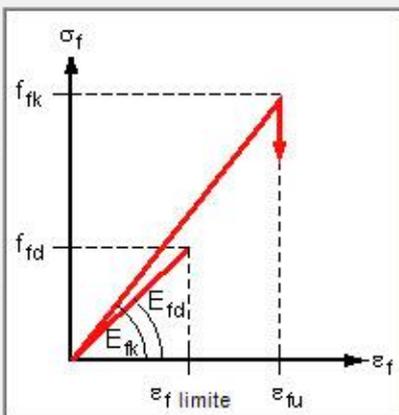


Figura 20. Selecção do sistema FRP.

Na janela da secção transversal do FRP, Figura 21, vai-se introduzir o número e a disposição dos produtos FRP, é necessário ter em atenção o espaçamento máximo e mínimo. Nesta janela deve-se começar por clicar no botão de cálculo, para determinar a área de secção transversal de FRP necessária. Introduce-se o número de camadas de laminados que se vão sobrepor n_f , sendo nesse caso apenas uma camada. Introduce-se ainda o número de laminados que se vão colocar lado a lado m_f , nesta viga optou-se por um. O espaçamento s_f entre faixas é automaticamente calculado, assim como a área de secção transversal A_f . É necessário ainda introduzir a distância z_f do reforço FRP medida desde o topo da peça, neste caso o reforço encontra-se na face inferior da peça, sendo $z_f = 50\text{cm}$. É necessário garantir que a distância lateral a_r das faixas de reforço FRP à extremidade lateral da peça é superior à distância mínima $a_{r,\min}$.

secção transversal do FRP

reforço de FRP

No.	secção [mm/mm]	n_f [pcs]	m_f [pcs]	s_f [cm]	A_f [cm ²]	z_f [cm]
1	50 / 1.2	1	1	25	0,6	50
2	50 / 1.2	1	0	0	0	0
3	50 / 1.2	1	0	0	0	0

$s_{f,\max}$

$z_{f,\min}$

distancia até a extremidade

$a_r =$ [cm] $a_{r,\min} =$ [cm]

← cálculo →

Figura 21. Secção transversão do FRP.

Na Figura 22, temos a janela com a apresentação dos resultados do dimensionamento. Aqui é apresentada a área da secção transversal do FRP necessária $A_{f,nec}$, a respectiva área efectiva $A_{f,efet}$, e o momento flector resistente da secção reforçada M_{Rdf} , em que este tem que ser superior ao momento flector actuante M_{Edf} , anteriormente calculado. É também os valores do momento resistente da secção não reforçada M_{Rd0} , e do momento resistente característico da mesma secção M_{Rk0} . O nível de reforço η_M indica o rácio entre o momento de cálculo actuante M_{Edf} da peça em estado reforçado e o momento resistente M_{Rd0} da secção não reforçada, e este não deve exceder o valor 2,0 para o reforço com FRP externamente aderidos. O programa de cálculo indica ainda o factor de segurança γ_{Me} remanescente em caso de perda do reforço. O momento resistente da secção não reforçada M_{Re0} em combinação de acções para situações acidentais (determinado com $\gamma_c = 1,3$ e $\gamma_s = 1,0$) será comparado com o momento actuante característico de serviço M_{Ekf} .

dimensionamento

a dimensionar

secção transversal do FRP momento flector

$A_{f,nec} = 0,33$ [cm²] $M_{Edf} = 195,6$ [kNm]

$A_{f,efet} = 0,6$ [cm²] $M_{Rdf} = 208,9$ [kNm]

M Rdf > M Edf

secção não reforçada

$M_{Rd0} = 179,3$ [kNm]

$M_{Re0} = 206,3$ [kNm]

nível de reforço

$\eta_M = \frac{M_{Edf}}{M_{Rd0}} = 1,09$ [-]

factor de segurança em caso de perda do reforço

$\gamma_{Me} = \frac{M_{Re0}}{M_{Ekf}} = 1,5$ [-]

Figura 22. Dimensionamento.

Na janela de saída de resultados das extensões em estado limite último (ELU), Figura 23, exhibe os valores e diagramas das extensões antes e depois do reforço. Os diagramas de extensões são exibidos à escala real.

As extensões na situação de pré-reforço são resultantes do momento flector inicial M_{EK0} . Na situação de pós-reforço as extensões são resultantes do momento flector em estado limite último M_{Edf} .

A extensão do betão é dada por ϵ_c e a do aço por ϵ_s , o valor de x é a posição da linha neutra. Na situação de pós-reforço temos mais uma extensão, que é referente ao material FRP ϵ_f .

extensões em estado limite último (ELU)

situação pré-reforço

$\epsilon_c = -0,386$ [‰]

$x = 15,48$ [cm]

$\epsilon_p =$ [‰]

$\epsilon_s = 0,746$ [‰]

situação pós-reforço

$\epsilon_c = -2,809$ [‰]

$x = 12,57$ [cm]

$\epsilon_p =$ [‰]

$\epsilon_s = 7,333$ [‰]

$\epsilon_f = 7,5$ [‰]

Figura 23. Extensões em estado limite último (ELU).

Na janela seguinte temos as tensões e extensões em estado limite de serviço (ELS), Figura 24.



Figura 24. Extensões e tensões em estado limite de serviço (ELS).

O passo seguinte é verificar a amarração por força de tracção na extremidade das faixas de reforço com o FRP, Figura 25. Para tal é necessário indicar o tipo de apoio. Temos ainda que indicar se é usado um sistema de ancoragem, que apenas está disponível para laminados colados externamente. Neste caso não se vai usar sistema de ancoragem. A distância f é referente à distância entre o final do laminado e a face do apoio, para prevenir a delaminação do reforço esta distância não deve exceder os 5 cm. Como se pode ver no desenho esquemático a distância a_i é a distância entre a linha teórica do apoio e a face do apoio. O deslocamento horizontal das forças de tracção a_L é dado, este corresponde à média altura útil efectiva das armaduras e da faixa de FRP externa.

Nos sistemas de FRP aplicados externamente, é necessário inserir a tensão de aderência do substrato f_{csm} . Este valor deve ser aferido por um determinado número de ensaios pull-off. O valor mínimo para laminados pré-fabricados é de $1,5 \text{ N/mm}^2$, e para mantas de carbono é de $1,0 \text{ N/mm}^2$. Como não foram feitos ensaios, foi assumido o valor mínimo. O valor médio de resistência à compressão $f_{cm,cube}$ deve ser testado e verificado em obra.

A verificação da ancoragem é feita no ponto E ilustrado no gráfico da Figura 25. Para a verificação da ancoragem na extremidade do apoio o programa calcula a distância x_E do ponto E. Com esta distância, através do programa Ftool, determinou-se o momento flector actuante de calculo no ponto E.

amarração do FRP na extremidade

características do apoio

apoio extremo $f = 5$ [cm]

apoio intermédio $a_i = 12,5$ [cm]

sistema de ancoragem S&P $a_L = 19,76$ [cm]

resistência do substrato em testes

$f_{csm} = 1,5$ [N/mm²] $f_{cm,cube} = 33$ [N/mm²]

forças internas no ponto E

$x_E = 61,75$ [cm] $M_{Edf,E} = 84$ [kNm]

$N_{Edf,E} = 0$ [kN]

armadura no ponto E

armadura de flexão variável ao longo do vão

← verificação →

Figura 25. Introdução de dados para amarração do FRP na extremidade.

Após o preenchimento da janela anterior é nos apresentada uma nova janela de saída de resultados da amarração do FRP na extremidade, Figura 26. É necessário verificar que a força de tensão instalada no FRP, $F_{fd,E}$, é inferior à força de rotura da amarração do sistema FRP escolhido, $F_{bd,Max}$.

Para a verificação da ancoragem dos sistemas FRP externamente aderidos é aplicado o comprimento de amarração $l_{b,Max}$ relacionado com a máxima força de aderência $F_{bd,Max}$. Este valor é calculado para cada faixa de reforço de FRP dependendo da secção transversal escolhida. O valor $l_{b,Max}$ deve ser sempre considerado como o mínimo de comprimento de ancoragem. É dada a indicação que apenas é necessária a ancoragem mínima no caso em estudo.

amarração do FRP na extremidade

forças de tensão no FRP		força de amarração	comprimento de amarração			
No.	$F_{fd,E}$ [kN]	$F_{bd,max}$ [kN]	$l_{b,max}$ [cm]	f_{max} [cm]	recomendado l_b [cm]	f [cm]
1	9,38	10,62	24,49			5
2						
3						

$F_{fd,E} < F_{bd,max}$ apenas o mínimo de ancoragem é requerida

Figura 26. Amarração do FRP na extremidade.

Apenas para as vigas é exibida uma janela para as exigências de cintagem mínima na extremidade, Figura 27.

A força do estribo no ponto E equilibra a força de tracção do FRP $F_{fd,E}$ no referido ponto. É determinada a área da secção transversal necessária $A_{w,Nec}$ do estribo externo no ponto E e comparada com a área efectiva $A_{w,efet}$, e verifica-se que esta é suficiente.

É dada a força de tracção mobilizada por cada ramo F_{wd} , sendo assim possível calcular as amarrações, se for necessário fazer a amarração na zona de compressão. Para a verificação da amarração de aderência dos estribos, o comprimento de aderência dos estribos l_{bw} , é automaticamente considerado com sendo a altura da viga. A força de aderência de cálculo F_{bd} do adesivo é calculada e comparada com a força de tracção por ramo F_{wd} .

aderência do FRP - cintagem mínima do reforço à flexão no ponto E

força de calculo no ponto E $F_{fd,E} = 9,38$ [kN]	tensão de um estribo $F_{wd} = 4,69$ [kN]
secção mínima dos estribos externos no ponto E material $A_{w,nec} = 0,23$ [cm ²] $t_w = 1 \times 0,117$ [mm] $A_{w,efet} = 0,7$ [cm ²] $b_w = 300$ [mm]	força aderencia de um estribo $F_{bd,max} = 18,26$ [kN] $l_{bw} = 50$ [cm] $F_{bd} = 18,26$ [kN]
aderência suficiente	$F_{wd} < F_{bd}$

Figura 27. Cintagem mínima do reforço à flexão no ponto E.

Na janela de amarração da armadura de flexão no apoio, Figura 28, temos que escolher o tipo de apoio, que é indirecto neste caso. Com a ajuda do programa Ftool foi calculado o esforço transversal no apoio. A verificação feita nesta janela apenas é necessária para o reforço de momentos positivos.

amarração da armadura de flexão no apoio

tipo de apoio
 apoio directo
 apoio indirecto
 $a_i = 12,5$ [cm]

aderência de amarração na extremidade do reforço de FRP
 colada externamente $f_{csm} = 1,5$ [N/mm²]
 inserida na extremidade $f_{cm} = 33$ [N/mm²]

forças internas no apoio
 $V_{Edf,A} = 156,4$ [kN] $N_{Edf,A} = 0$ [kN]

armadura no apoio
 verificar varões no apoio

← verificação →

Figura 28. Dados para determinação da amarração da armadura de flexão no apoio.

Na janela de saída de resultados da amarração da armadura de flexão no apoio, Figura 29, pode-se observar que não é necessário o uso de FRP para reforçar a amarração da armadura de flexão no apoio, uma vez que a força de tracção da armadura interna $F_{s,A}$ é superior à necessária e assim garante a boa amarração na zona do apoio.

amarração da armadura de flexão no apoio

força de amarração

força requerida $F_{A,nec} = 75,65$ [kN]
 armadura interna $F_{s,A} = 148,96$ [kN]
 reforço FRP
 $F_{f,A,nec} = 0$ [kN]
 $F_{f,A,efet} = 0$ [kN]
 $A_{f,A,nec} = 0$ [cm²]

comprimento de ancoragem do FRP

No.	$l_{f,A}$ [cm]	$F_{fd,A}$ [kN]	$l_{b,max}$ [cm]	$F_{bd,max}$ [kN]
1	0	0		
2				
3				

$F_{f,A,efet} > F_{f,A,nec}$ ancoragem suficiente no suporte

Figura 29. Amarração da armadura de flexão no apoio.

Na janela de esforço transversal - armadura e cargas, Figura 30, é onde se insere a armadura de corte existente bem como as cargas impostas no estado de pós-reforço. Escolhe-se a classe de aço, neste caso A400, e introduz-se a área da armadura dos estribos internos, a tensão de cedência característica f_{yk} é automaticamente calculada. Como a armadura de flexão é constante ao longo do vão, não se assinala nada nesta zona.

O ponto X é o ponto mais desfavorável relativamente ao esforço transversal, sendo assim, a distância x_x , que é medida desde a linha teórica do apoio, é de 12,5 cm. Determinou-se com recurso ao Ftool que o esforço transversal nesse ponto $V_{Edf,x}$ é de 148,8 kN e o momento flector $M_{Edf,x}$ é de 19,6 kNm.

A inclinação da bielas comprimidas está pré-definida com um de 45°.

esforço transversal - armadura e cargas

armadura interna de corte

estribos $a_{sw} = 5,65$ [cm²/m]

classe do aço $f_{yk} = 400$ [N/mm²]

armadura longitudinal na secção X

armadura de flexão variável ao longo do vão

forças internas no ponto X

$x_x = 12,5$ [cm] $M_{Edf,x} = 19,6$ [kNm]

$V_{Edf,x} = 156,4$ [kN] $N_{Edf,x} = 0$ [kN]

inclinação das bielas comprimidas

$\cot \theta = 1$ [-] $\theta = 45$ [°]

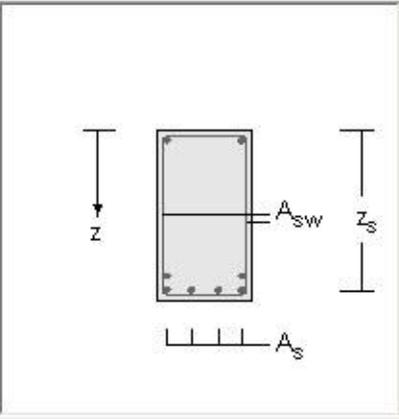


Figura 30. Armadura e cargas de esforço transversal.

Na janela de reforço ao corte, Figura 31, são definidas as propriedades dos materiais de reforço para o reforço ao esforço transversal. Pode-se escolher entre mantas S&P C-sheets ou chapas de aço, neste caso optou-se por S&P C-sheets 240 (200g/m²). Todos os campos seguintes são automaticamente preenchidos consoante o material escolhido.

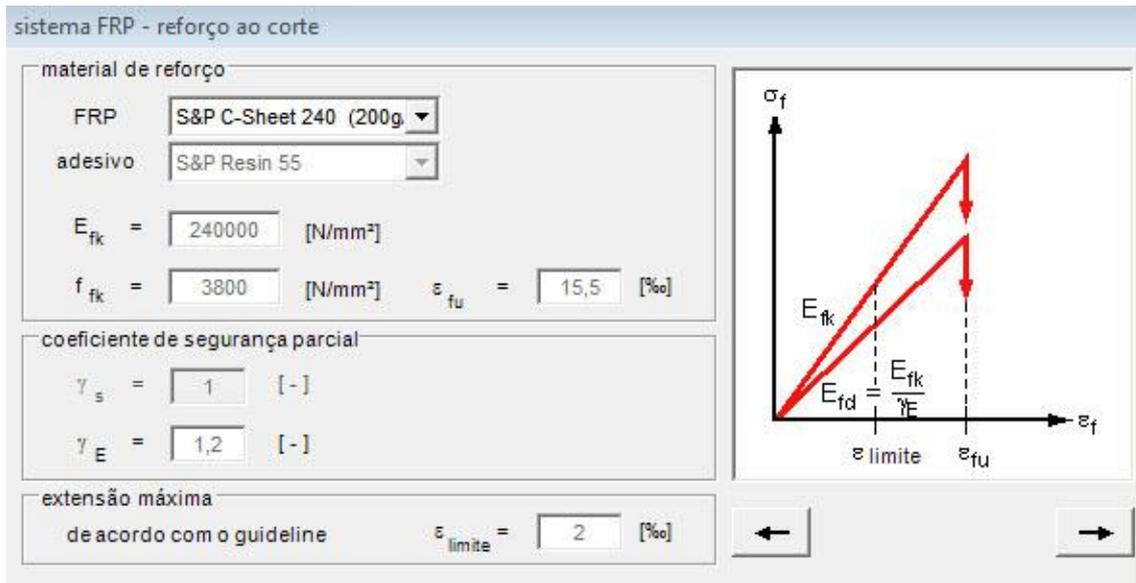


Figura 31. Escolha do sistema FRP para reforço do esforço transverso.

Na janela seguinte, Figura 32, introduz-se as dimensões dos estribos adicionais.

A espessura nominal t_w é tirada da janela anterior, onde se escolheu o tipo de FRP para este reforço. Escolhe-se o número de camadas de FRP n_w , no caso de serem mantas de carbono é possível colocar até cinco camadas, neste caso iremos usar apenas uma camada. Optou-se por uma largura de estribos b_w de 50 cm. Estando estes espaçados de 25 cm.

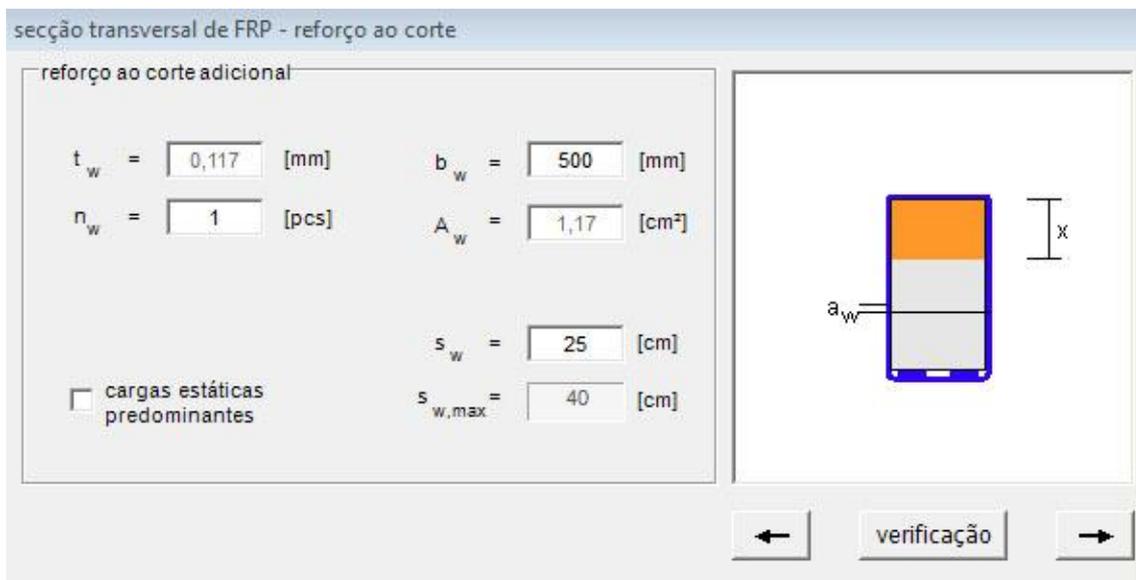


Figura 32. Definição da secção transversão do FRP para reforço ao esforço transverso.

Na janela seguinte são apresentados os resultados dos esforços resistentes ao corte, Figura 33, como a resistência ao corte provida pelo betão $V_{Rd,c}$, a resistência ao corte da secção de armadura de corte interna $V_{Rd,s}$, a resistência ao corte máxima $V_{Rd,max}$, a capacidade parcial resistente ao corte ΔV_{wd} , e o seu valor mínimo $\Delta V_{w,min}$, a força de corte de cálculo V_{Edf} , assim como a força resistente de corte V_{Rdf} , por fim é dada a força máxima admissível $V_{Rdf,limite}$. É necessário garantir que a força resistente de corte V_{Rdf} é superior à força de corte de cálculo V_{Edf} , assim como que a força a força máxima admissível $V_{Rdf,limite}$ é superior à força de corte de cálculo V_{Edf} . Por fim é indicado que o reforço deve ser amarrado na zona do banzo comprimido.

reforço ao corte	
situação pré-reforço	
$V_{Rd,c}$	= 68,8 [kN]
$V_{Rd,s}$	= 77,38 [kN]
$V_{Rd,max}$	= 446,97 [kN]
resistência ao corte dos estribos externos	
ΔV_{wd}	= 82,32 [kN]
$\Delta V_{w,min}$	= 79,02 [kN]
situação pós-reforço	
V_{Edf}	= 156,4 [kN]
V_{Rdf}	= 159,71 [kN]
$V_{Rdf,limite}$	= 296,33 [kN]
$V_{Rdf} > V_{Edf}$ $V_{Edf} < V_{Rdf,limite}$	
amarrar no banzo comprimido!	

Figura 33. Esforços resistentes ao corte.

Por fim na janela referente à amarração dos estribos externos adicionais, Figura 34, é nos apresentada a resistência ao corte dos estribos externos $\Delta V_{wd,eff}$, a força de tracção a ser ancorada em cada face F_{wd} e a mesma força desta vez por metro f_{wd} . Por último é nos dada a distância do eixo neutro, ou seja a zona das compressões, onde os estribos terão de ser ancorados.

esforço transversal – amarração de estribos externos adicionais	
resistência ao corte dos estribos externos	
$\Delta V_{wd,eff}$	= 75,16 [kN]
força de tracção a ser ancorada em cada face	
F_{wd}	= 21,36 [kN]
f_{wd}	= 85,45 [kN/m]
banzo comprimido	
x	= 17,98 [cm]
aderência adesiva dos estribos externos adicionais	
f_{csm}	= [] [N/mm ²]
$f_{cm,cube}$	= [] [N/mm ²]
$F_{bd,max}$	= [] [kN]
l_{bw}	= [] [cm]
F_{bd}	= [] [kN]
F_{wd}	= [] [kN]
amarrar no banzo comprimido!	

Figura 34. Amarração dos estribos externos adicionais.

O dimensionamento do sistema FRP para o reforço da viga está concluído, sendo a solução o uso de uma faixa de laminados S&P CFK 150/2000 com a secção de 50/1,2 [mm/mm] ao longo da viga, para reforço à flexão. É ainda necessária colocação de mantas S&P C-sheets 240 (200g/m²) com 50 cm de largura e espaçadas de 25 cm de forma a envolver a viga transversalmente e reforçar assim a viga ao esforço transversal. Estas mantas têm de ser amarradas na zona de compressão da viga, ou seja no mínimo a 32 cm da base da viga. Esta ancoragem para uma melhor eficiência pode ser feita na zona da laje, ficando ancorada pela própria laje.

4.2.2. FRP-Analysis

O programa disponibilizado pela empresa Sika, com o nome FRP-Analysis tem uma utilização mais simples e prática que o programa usado anteriormente.

No primeiro quadro que se pode ver na Figura 35, começa-se por se preencher os diversos campos referentes à viga em estudo, sendo eles, a geometria e dimensões, a classe de betão, as propriedades do material de reforço FRP, quantidades de aço e suas propriedades, e por fim os momentos flectores, momento flector durante o reforço M_0 , momento de cálculo após o reforço M_{sd} , momento flector relativo à combinação de acções raras $M_{serv,r}$ e o momento flector relativo à combinação de acções quase-permanentes $M_{serv,q-p}$.

FLEXURAL STRENGTHENING	SHEAR STRENGTHENING	CONFINEMENT	
Data Input			
	Concrete <input checked="" type="radio"/> Strength class: C 25/30 <input type="radio"/> Mean strength: $f_{cm} = 33,20$ [N/mm ²] Creep coefficient: $\phi = 2,5$		
	Composite Materials Elastic modulus: $E_f = 165$ [kN/mm ²] Limiting strain: $\epsilon_{f,lim} = 0,008$ [-] Sika CarboDur Properties		
Type of Cross Section <input type="radio"/> T-beam <input checked="" type="radio"/> Rectangular beam	Steel Reinforcement Elastic modulus: $E_s = 200$ [kN/mm ²] Characteristic yield stress: $f_{yk} = 400$ [N/mm ²] Top: $A_{s2} = 226$ [mm ²] at distance $d_2 = 0,042$ [m] Bottom: $A_{s12} = 0$ [mm ²] at distance $d_{12} = 0$ [m] Bottom: $A_{s11} = 1257$ [mm ²] at distance $d_{11} = 0,046$ [m]		
Cross Section Geometry Width: $b = 0,25$ [m] Effective width: $b_{eff} = 0$ [m] Height: $h = 0,50$ [m] Slab thickness: $h_f = 0$ [m]	Bending Moments Bending moment during strengthening: $M_o = 75,4$ [kNm] Required design moment after strengthening: $M_{sd} = 195,55$ [kNm] Acting moment - Rare load: $M_{ser,r} = 137,91$ [kNm] Acting moment - Quasi-permanent load: $M_{ser,q-p} = 100,41$ [kNm]		
About ... Exit		Options Open Solution Help Save New Input	
Project:	Name:	Company:	20-10-2010 18:01

Figura 35. Introdução de dados para o cálculo do reforço à flexão.

Após o preenchimento do quadro anterior é apresentado um outro quadro, com os resultados dos momentos resistentes e as áreas das secções de FRP necessárias. Como se pode ver na Figura 36, a área da secção do FRP que é necessário garantir é a maior área das três apresentadas, que neste caso é a área relativa ao Estado Limite Último, que é de 37,26 mm².

Ultimate Limit State Resisting design moment before strengthening: $M_{rd,o} = 176,57$ [kNm] Required FRP cross section for ULS: $A_f = 37,26$ [mm ²] Resisting design moment after strengthening: $M_{rd} = 195,55$ [kNm] Degree of strengthening: $\frac{M_{rd}}{M_{rd,o}} = 1,108$	Serviceability Limit State - Quasi-permanent Load Moment capacity before strengthening: $M_{ser,q-p,o} = 152,66$ [kNm] Required FRP cross section for SLS: $A_f = 0,00$ [mm ²] Moment capacity: $M_{ser,q-p} = 100,44$ [kNm] Steel stress: $f_{s11} = 209,95 \leq 0,8 \times f_{yk} = 320,00$ [N/mm ²] Concrete stress: $\sigma_c = 7,36 \leq 0,45 \times f_{ck} = 11,25$ [N/mm ²]
Serviceability Limit State - Rare Load Moment capacity before strengthening: $M_{ser,r,o} = 137,54$ [kNm] Required FRP cross section for SLS: $A_f = 8,26$ [mm ²] Moment capacity: $M_{ser,r} = 137,90$ [kNm] Steel stress: $f_{s11} = 273,31 \leq 0,8 \times f_{yk} = 320,00$ [N/mm ²] Concrete stress: $\sigma_c = 15,00 \leq 0,6 \times f_{ck} = 15,00$ [N/mm ²]	Flexural Strengthening - Final Design is controlled by: Ultimate Limit State Final required FRP cross section: $A_f = 37,26$ [mm ²]
Bond check Print Help	Cross section strain profile Input of FRP dimensions Return Exit

Figura 36. Momentos resistentes e áreas necessárias pós-reforço.

CAPÍTULO 4. CÁLCULO COM RECURSO A SOFTWARE

No quadro seguinte, Figura 37. Diagramas de tensões/extensões, são apresentados os diagramas das tensões/extensões para os diferentes estados limites. Por fim é verificada a ductilidade.

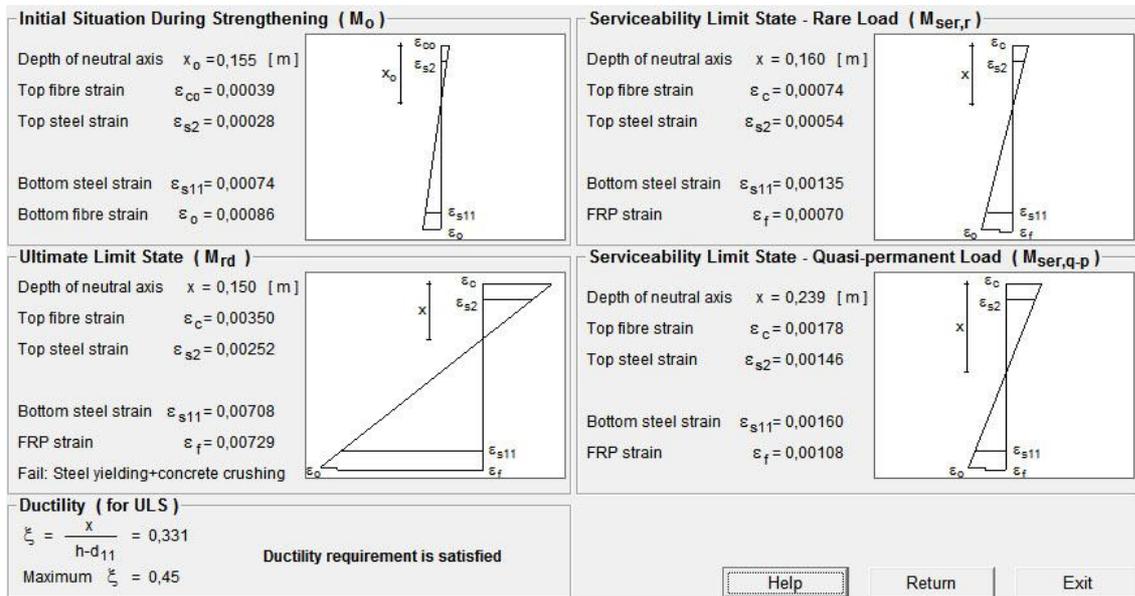


Figura 37. Diagramas de tensões/extensões.

O passo seguinte é determinar o número de laminados necessários para garantir a área necessária. Neste caso, é necessário apenas uma tira de laminado de FRP para esta área estar garantida, como se pode ver na Figura 38. Determinação do número de tiras de FRP necessárias.

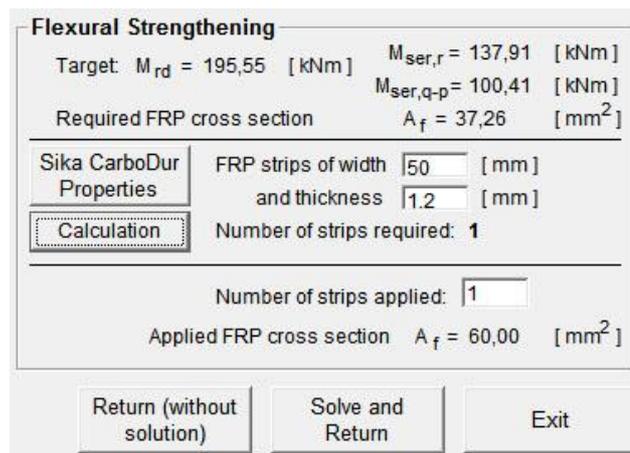


Figura 38. Determinação do número de tiras de FRP necessárias.

No quadro seguinte, Figura 39, pretende-se verificar a amarração. Para tal é necessário indicar o momento flector no ponto crítico, $M_{sd,A} = 84$ kNm, como foi calculado no exemplo anterior, o aço no ponto crítico e o número de camadas de FRP. O programa devolve a força máxima que pode ser suportada pelo número total de faixas de FRP $N_{bd,max}$, a força de tensão suportada por cada faixa $N_{fd,A}$ e o comprimento de amarração l_{bd} .

Data Input

Diagram showing a beam cross-section with FRP strips (red) and steel reinforcement (blue). Key parameters labeled include d_2 , d_{s12} , d_{s11} , l_{bd} , a_r , A_{s2} , A_{s12} , A_{s11} , and $M_{sd,A}$. The diagram also shows an "envelope line".

Section's Properties

Substrate tensile strength $f_{ctm} = 2,56$ [N/mm²]
 Design moment at section A $M_{sd,A} = 84$ [kNm]

Steel Reinforcement at Section A

Elastic modulus $E_s = 200$ [kN/mm²]
 Characteristic yield stress $f_{yk} = 400$ [N/mm²]

Top $A_{s2} = 226$ [mm²] at distance $d_2 = 0,042$ [m]
 Bottom $A_{s12} = 0$ [mm²] at distance $d_{12} = 0$ [m]
 Bottom $A_{s11} = 1257$ [mm²] at distance $d_{11} = 0,046$ [m]

FRP Arrangement

Total number of 1 strips is placed in 1 layers

Bond Check

Calculation $N_{fd,A} = 6,01 < N_{bd,max} = 17,79$ [kN] Check is OK
 $l_{bd,A} = 38$ [mm] $l_{bd,max} = 204$ [mm]

Buttons: Help, Return, Exit

Figura 39. Verificação da amarração.

Com o reforço à flexão verificado, é a vez de verificar o esforço transversal. No quadro seguinte, Figura 40, é necessário introduzir o tipo de ancoragem do material de reforço, as dimensões da secção transversal da viga, o ângulo dos estribos de FRP a aplicar, a classe de betão, as propriedades do FRP e as suas dimensões. Após indicar o esforço transversal ao qual está sujeita a viga pode-se calcular a espessura da manta de FRP necessária e determinar o número de camadas necessárias, Figura 41. Como a espessura máxima das mantas é de 1,4 mm são necessárias 2 camadas para verificar o esforço transversal da viga.

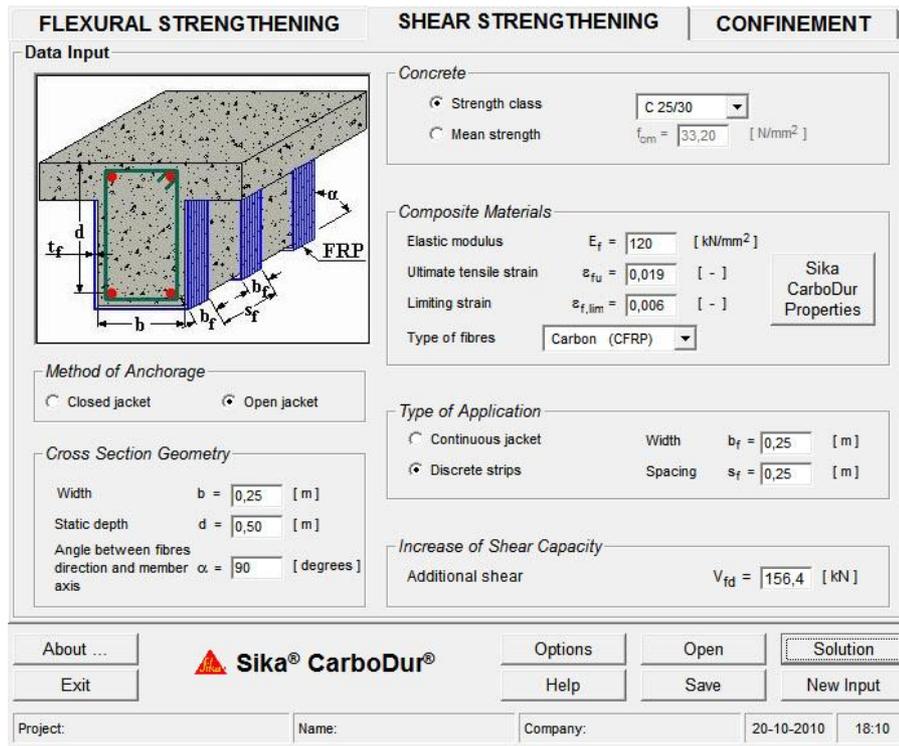


Figura 40. Verificação do esforço transverso.

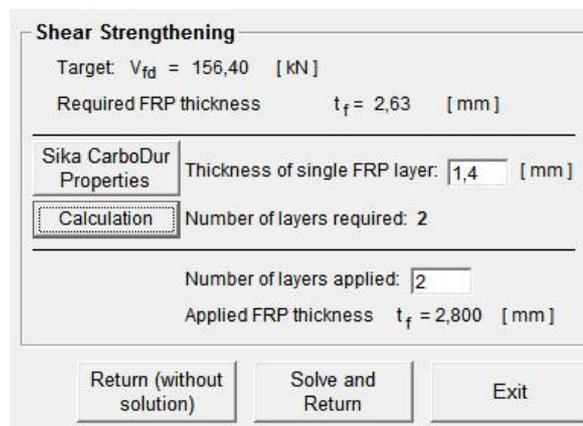


Figura 41. Determinação das camadas para esforço transverso.

O dimensionamento do sistema FRP para o reforço da viga está concluído, para solução optou-se pelo uso de uma faixa de laminado CarboDur S512 com a secção de 50 x 1,2 [mm x mm] ao longo da viga, para reforço à flexão. Quanto ao reforço transversal optou-se pela colocação de 2 camadas de mantas Carboshear 4/20/50 com 15 cm de largura e espaçadas de 35 cm de forma a envolver a viga transversalmente e reforçar assim a viga ao esforço transverso.

4.2.3. Conclusão

Após o uso destes dois programas de cálculo é fácil perceber que o FRP-Analysis da Sika, é mais básico, prático e rápido, relativamente ao FRP Lamella da S&P Reinforcement. No entanto este último tende a ser mais rigoroso, e é mais fácil de entender, para o utilizador, o que o programa está a fazer quando nos dá os resultados.

Relativamente aos resultados obtidos, estes não são muito diferentes de um programa para o outro. As tensões e extensões resultantes são muito semelhantes quando comparadas entre os dois programas. As soluções devido ao momento flector são iguais, em ambos chegou-se a uma solução de uma faixa de laminado com 50 x 1,2 [mm x mm]. Já no reforço transversal da viga os resultados foram diferentes, no FRP Lamella a solução é uma camada de mantas de 50 cm de largura espaçadas de 25 cm. No FRP-Analysis teve-se que optar por duas camadas de mantas com 15 cm de largura e espaçadas de 35 cm. O programa não deixou escolher uma solução igual à anterior porque não permite que o espaçamento s_f seja superior a 80% da altura útil da viga.

Capítulo 5

CONCLUSÕES FINAIS

Hoje em dia cada vez mais se assume maior importância na nossa sociedade a recuperação do património arquitectónico existente, sendo obrigatório o uso de soluções de técnicas avançadas, com recurso a produtos e processos inovadores que permitam adaptar as estruturas existentes às novas necessidades. O uso de fibras têxteis é uma boa resposta a esta necessidade.

As fibras têxteis assumem hoje um papel importante na execução de reforços estruturais, combinando produtos inovadores e tecnologicamente avançados com práticas de aplicação expeditas e rápidas, garantindo assim a execução de um reforço efectivo das características mecânicas dos elementos estruturais, sem necessidade de trabalhos de demolição ou estruturas secundárias. Actualmente a aplicação de fibras têxteis tem evoluído, devido ao investimento na investigação, nomeadamente pela introdução de novos tecidos, permitindo o envolvimento de qualquer secção, e proporcionando-lhe elevada resistência à tracção, corte e confinamento.

Os têxteis têm vindo a substituir o uso de outras técnicas, como é o caso do uso de chapas de aço, tendo a possibilidade de diversas aplicações como, projectos de reabilitação e reforço estrutural, alteração de condições de utilização de edifícios ou estruturas, adaptação a novas exigências regulamentares ou de funcionamento, correcção de erros de projecto e dimensionamento, reparação estrutural de pontes ou outras estruturas de grande porte, reforço de paredes ou pilares em edifícios, depósitos de água, etc., melhoria do comportamento da estrutura face a acções sísmicas, aplicações em túneis, canais, condutas, silos, reservatórios e tanques de armazenamento, reforço de chaminés, etc.

O uso de têxteis à base de fibras artificiais, como os compósitos, é sem dúvida o mais frequente, mas actualmente com a crescente preocupação ecológica, tende-se a usar e criar novos materiais, com base em produtos naturais. Isto faz com que muitas vezes se aproveite material ao qual não era dado qualquer valor sendo desperdiçado, deitado fora ou até queimado. Hoje em dia tudo se procura reaproveitar conseguindo assim, por vezes, produzir novos produtos a baixo custo e com grande utilidade.

Apesar do crescente uso e aplicação de sistemas têxteis no reforço estrutural, não existe um documento em Portugal que regule o seu dimensionamento. Na Europa existem alguns documentos e normas, mas não existe nenhum Eurocódigo que sirva de suporte ao dimensionamento de reforços com têxteis. Não havendo a obrigatoriedade de todos os projectistas se regerem pelas mesmas regras, a maior parte deles opta por recorrer aos programas de cálculo desenvolvidos e disponibilizados pelos produtores destes sistemas.

Referências Bibliográficas:

1. da Costa, Anibal Guimarães e Juvantes, Luis Filipe Pereira. *Reforço e reabilitação de estruturas*. s.l. : FEUP, 2002.
2. Pombo, Maria Orvide. *Matérias primas e processos de transformação*. Covilhã : Universidade da Beira Interior, 1991.
3. Guillén, Joaquín Gacén. *Fibras textiles, propiedades y descripción (Curso Básico)*. Terrassa : Universitat Politècnica de Catalunya, 1991.
4. Pereira, José Carlos. *Curso de projecto estrutural com materiais compostos*. s.l. : Universidade Federal de Santa Catarina.
5. Furtado, Samuel Cezinando Ribeiro. *Cálculo estrutural numérico e experimental da carenagem de um veículo*. s.l. : Instituto Superior Técnico, 2009.
6. Miller, WS. *Recent development in aluminium alloys for the automotive industry*. 2000. pp. 37-49.
7. Silva, Flávio de Andrade. *Tenacidade de materiais compósitos não convencionais*. Rio de Janeiro : Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2004.
8. Smook, G. A. *Handbook for Pulp & Paper Technologists*. 1989. p. 395.
9. Guimarães, S. S. *Some experiments in vegetable fiber cement composites. Symposium on Building Materials for Low Income Housing*. Bagkok : s.n., 1987.
10. Sinha, U. N., et al. Possibilities of replacing asbestos in asbestos cement sheets by cellulose pulp. *Indian Concrete Journal*. 1975.
11. Savastano, Holmer. *Materiais à base de cimento reforçados com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo*. São Paulo : Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.
12. Persson, H. e Skarendahl, A. *Natural fibre concrete for roofing sheets and other purposes*. Stockholm : s.n., 1984.
13. Chand, N., Tiwary, R. K. e Rohatgi, P. K. Resorurce structure properties of natural cellulosic fibres. *Journal of Materials Science*, v.23. 1988.
14. Tôledo Filho, R. D. *Materiais Compósitos Reforçados com Fibras Naturais: Caracterização Experimental*. Rio de Janeiro : Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1997.

15. **Beaudoin, J. J.** *Handbook of fiber-reinforced concrete: principles, properties and applications*. New Jersey : Noyes Publications, 1990.
16. **Hillis, W. E. e Bown, A. G.** *Eucalyptus for wood production*. Sydney : CSIRO/Academic press, 1984.
17. **Fordos, Z. e Tram, B.** *Natural fibers as reinforcement in cement-based composites*. s.l. : Third International Symposium on Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete, v.1, 1986.
18. **D'Almeida, J. R. M.** Propriedades mecânicas de fibras de juta. *Ciência e Cultura*. n. 11, 1987, Vol. 39.
19. **Chawla, K. K. e Bastos, A. C.** *The mechanical properties of jute fibers and polyester/jute composites*. Cambridge : International Conference on Mechanical Behavior of Materials III, v.3, 1979.
20. **Azis, M. A., Paramasivam, P. e Lee, S. L.** *Natural fibre reinforced composite building materials for low-income housing*. Banckok : Symposium on Building Materials for Low Incoming Housing, 1987.
21. —. *Concrete reinforced with natural fibres*. Glasgow : SWAMY, R.N., 1984.
22. **Paramasivam, P., Nathan, G. K. e Das Gupta, N. C.** Coconut fibre reinforced corrugated slabs. *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, v.6, n.1. 1984.
23. **Kulkarni, A. G., Satyanarayana, K. G. e Sukkumaran.** Mechanical behaviour of coir fibres under tensile load. *Journal of Materials Science*. 1981, Vol. 16.
24. <http://www.ebah.com.br/fibra-de-malva-ppt-a51344.html>. [Online] [Citação: 20 de Julho de 2010.]
25. <http://www.ceplac.gov.br/radar/piacava.htm>. [Online] [Citação: 20 de Julho de 2010.]
26. **CEPA, Instituto.** *Perspectivas para a Agricultura Familiar. Horizonte 2010*. s.l. : Secretaria de Estado do desenvolvimento Rural e da Agricultura, 2004.
27. **Sika Services Ag.** *Design and use of externally bonded fibre reinforced polymer*. Lausanne, Switzerland : International Federation for Structural Concrete, 2001.
28. *Continuous Fiber Reinforced Concrete*. **Japan Concrete Inst, Tokyo, Jpn.** s.l. : Nippon Konkurito Kogaku Kyokai Ronbunshu, 1998.

Referências Bibliográficas

29. **Rodrigues, Carlos Chastre.** *Comportamento às Acções Cíclicas de Pilares de Betão Armado Reforçados com Materiais Compósitos.* Lisboa : Universidade Nova de Lisboa, 2005.
30. **Reinforcement, S&P.** *Guide for the application of S&P FRP Systems.* Outubro 2006.
31. **Evangelista, Luís Manuel Rocha.** *Betão reforçado com fibras de aço, Aplicação em pavimentos industriais.* Oeiras : Construlink Press, 2003.
32.
http://civil.fe.up.pt/pub/apoio/Mestr_Estr/NovosMateriais/apontamentos/teorica/Betao%20com%20fibras.pdf. [Online] [Citação: 23 de Setembro de 2010.]