

REFORÇO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO COM COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO

GUSTAVO GABRIEL PÉREZ

Relatório de Estágio para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil – Ramo
Construções

Orientador: Engenheiro José Manuel Martins Soares de Sousa

Coorientador: Engenheiro Michel Haddad (Sika Brasil)

Porto, 15 de Setembro de 2014

Dedico este trabalho à minha família, que foi, é e será o meu maior suporte na vida.

Agradecimentos

Aproveito este espaço para expressar o meu sentimento de gratidão a todos os que permitiram a concretização deste trabalho.

Agradeço à família Pérez, em especial ao meu pai José e mãe Mercedes, por me terem apoiado sempre e em especial nos momentos mais difíceis. Sem vocês nada disto seria possível e não encontro as palavras para descrever a alegria que sinto em fazer parte desta família.

Ao meu orientador, Engenheiro José Sousa, agradeço todo o apoio fornecido neste trabalho e durante o meu percurso académico. Pela motivação dada para realizar o estágio no estrangeiro, pela dedicação de trabalho em tantos fins de semana devido ao fuso horário e pelos conselhos que só ele sabe dar, deixo o meu profundo agradecimento.

À empresa Sika Brasil, em especial ao Engenheiro José Soares (Diretor Geral da Sika Brasil) e ao Engenheiro Michel Haddad (Co-orientador de estágio), o meu sincero obrigado. Sem esta oportunidade e sem as ferramentas fornecidas este trabalho não seria possível.

Ao Engenheiro João Batista, Engenheiro Dirceu Silva, Sr. Ivan Eduardo, Sr. Ricardo Cardoso e Sr. Luciano Alves, quero agradecer por todo o apoio prestado e pela oportunidade de acompanhar projetos e aplicações. Sem dúvida uma grande fonte de conhecimento.

Agradeço ao grupo de Trainees da Sika Brasil e restantes colaboradores, que desde o início me integraram na equipa e me deram todo o apoio desde a minha chegada ao Brasil. Por todas as horas que convivemos e por toda a amizade, muito obrigado. Em especial, quero agradecer ao meu amigo Leonardo Clavijo, que me acompanhou com verdadeira camaradagem desde o início desta jornada.

Por fim, quero agradecer a todos os meus amigos que acompanharam o meu percurso académico, que me ajudaram a ultrapassar as adversidades e que marcaram a minha passagem pelo ISEP de forma fantástica. Não posso deixar de agradecer a amizade sincera da Ana Ramos, que sempre esteve ao meu lado e que palavras não são suficientes para expressar a gratidão que sinto.

Resumo

O relatório resulta do estágio realizado na empresa Sika Brasil, no âmbito da Unidade Curricular de DIPRE do Mestrado de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia do Porto. A área de especialidade incidiu na recuperação e reforço de estruturas (Target Market Refurbishment), onde se deu a oportunidade de aprofundar conhecimentos em reforço estrutural através do sistema de reforço com compósitos de fibra de carbono (CFRP) colado exteriormente (EBR - Externally Bonded Reinforcement). O estágio realizado permitiu uma abordagem com a gama de produtos de recuperação e reforço da Sika Brasil, sendo que houve um foco muito grande nos produtos que respeitam ao reforço estrutural com compósitos de fibra de carbono.

Este documento visa várias etapas do estágio, relacionadas diretamente com o reforço estrutural com CFRP. Foi feito um levantamento teórico das características dos compósitos de fibra de carbono, dando a conhecer os materiais envolvidos no sistema, as suas propriedades mecânicas e o seu âmbito de aplicação.

No sentido de ter um diálogo profícuo com os projetistas e aplicadores de sistemas compósitos de fibra, foi realizada uma análise do procedimento de cálculo para o dimensionamento de reforço CFRP, à luz do Bulletin 14 *fib:01* (2001), bem como uma análise da situação de incêndio para os sistemas compósitos.

Consta neste documento uma análise feita entre os principais fornecedores de sistemas de CFRP no Brasil, baseando-se a mesma no conteúdo das fichas técnicas de produto relativas ao sistema de reforço EBR e respetiva comparação com a informação necessária para dimensionamento, de acordo com o Bulletin 14 *fib:01* (2001).

É relatado um reforço estrutural, como caso de estudo, tendo-se dado a oportunidade de se acompanhar desde a sua fase de projeto até à fase de execução.

Por fim, este documento contém a simulação de dois programas da Sika para dimensionamento de reforço CFRP. A simulação foi feita para uma viga submetida a esforço de flexão, com as características geométricas e solicitações previamente definidas.

PALAVRAS-CHAVE: Betão Armado, Reforço estrutural, Compósitos de fibra de carbono (CFRP), Técnica EBR.

Abstract

The following report is a result of the internship experience in the company Sika Brazil in agreement with the course unit DIPRE which belongs to the Civil Engineering Master's program of the Institute of Engineering of Porto (ISEP).

The work developed at Sika Brazil S.A was focused in repair and reinforcement of structures within the framework of the Target Market Refurbishment. The work was concentrated in structural reinforcement using Carbon-Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) and its application using the Externally Bonded Reinforcement (EBR) technique.

This document contain different stages of the internship which were related with the use of CFRP for structural reinforcement. The first approach was doing a theoretical study of the carbon fiber material (as a combination of other various materials) including its main characteristics, and introducing its mechanical properties and fields of application.

In order to develop further knowledge in CFRP systems, it was necessary to enquire designers and applicators with experience in the field to get a real perspective of the application and dimensioning of the reinforcement material in the structure. This work was done having in mind that a previous preparation was necessary for developing a productive conversation with the engineers. For that reason, it was required to study the calculus guide *Bulletin 14.fib:01 (2001)* so as to familiarize with the process of dimensioning of CFRP, and to explore the analysis of reinforced structures with carbon fiber under a fire situation. As a result of the discussions with the experienced engineers, there was a proposal to follow-up a real project since the design stage to the execution stage, consequently there is a full description in this document regarding this activity.

The report include a comparative analysis between the main suppliers of CFRP systems in Brazil, based only in Product Data Sheet of the companies. Finally, a comparison was made between two Sika design software using CFRP solutions. The comparison was done through simulations of a predefined beam with a specific geometry, steel reinforcement and a certain load request.

KEYWORDS: Reinforced Concrete, Structural Reinforcement, Carbon Fiber Reinforced Polymer, EBR Technique.

Índice Geral

Agradecimentos.....	v
Resumo	vii
Abstract.....	ix
Índice de figuras.....	xv
Índice de tabelas.....	xx
Lista de acrónimos.....	xxi
Simbologia.....	xxiii
1 Introdução, Motivação de pesquisa, Objetivos e Estrutura do documento.....	1
1.1 Introdução.....	1
1.2 Motivação de pesquisa.....	3
1.3 Objetivos.....	4
1.4 Estrutura do documento.....	5
2 Reforço de estruturas de betão.....	8
2.1 Introdução.....	8
2.2 Considerações gerais.....	8
2.3 Aumento de secção de betão armado.....	10
2.4 Armaduras metálicas.....	12
2.5 Armaduras não metálicas.....	15
3 Compósitos de FRP.....	19
3.1 Introdução.....	19
3.2 Materiais compósitos.....	20
3.3 Matriz polimérica ou laminado.....	21
3.4 Fibras.....	24

ÍNDICE

3.5	Fibra de carbono.....	28
3.6	Adesivos.....	30
4	Aplicação de compósitos de fibra de carbono.....	35
4.1	Propriedades mecânicas básicas dos FRP's.....	35
4.2	Soluções de fibra de carbono para colagem exterior.....	39
4.2.1	Manta/tecido de fibra de carbono.....	39
4.2.2	Lâminas de fibra de carbono	41
4.3	Sequência de aplicação do sistema.....	43
4.3.1	Distinção entre primário, camada de regularização e adesivo	49
4.4	Requisitos dos sistemas compósitos.....	50
4.4.1	Compatibilidade entre os materiais	51
4.4.2	Durabilidade.....	52
4.5	Aplicações práticas dos sistemas compósitos.....	52
5	<i>Bulletin 14 fib:01 Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures</i> – abordagem de cálculo.....	60
5.1	Introdução.....	60
5.2	Documentação Internacional atual	61
5.2.1	América do Norte.....	61
5.2.2	Japão.....	61
5.2.3	Europa	62
5.3	Introdução do Bulletin 14 <i>fib:01</i>	62
5.4	Conceitos genéricos para dimensionamento.....	63
5.5	Reforço de FRP à flexão	64
5.5.1	Estado inicial.....	67
5.5.2	Estados Limites Últimos (ELU)	69
5.5.3	Estados Limites de Serviço (ELS)	77
5.6	Reforço de FRP ao corte.....	83

5.7	Comentário de dimensionamento na prática.....	86
6	Situação de incêndio.....	88
6.1	Contextualização e opinião crítica.....	88
6.2	Posição corporativa para a situação de incêndio.....	91
6.3	Sistemas de proteção ao fogo.....	93
6.3.1	Revestimentos à base de vermiculite.....	94
6.3.2	Placas de gesso	95
6.3.3	Placas de silicato de cálcio	96
6.3.4	Projeção de fibras minerais.....	97
6.3.5	Mantas de fibras cerâmicas e placas de lã de rocha	98
7	Dados Técnicos dos Principais Fabricantes no Brasil.....	100
7.1	Introdução	100
7.2	Análise de informação de lâminas.....	101
7.3	Análise de informação de tecidos	104
8	Ensaio de referência	107
8.1	Ensaio de tração laminado pré-fabricado.....	107
8.2	Ensaio em laboratório de Sikawrap 530 c.....	111
9	Reforço estrutural – Caso de estudo	122
9.1	Apresentação.....	122
9.2	Dimensionamento.....	124
9.2.1	Introdução.....	124
9.2.2	Considerações do projeto	125
9.2.3	Resultados do dimensionamento.....	125
9.2.4	Desenhos de projeto	126
9.3	Processo de execução de reforço.....	129
9.3.1	Sequência de aplicação	129

ÍNDICE

9.3.2	Sequência fotográfica de aplicação.....	130
9.4	conclusões de acompanhamento de reforço.....	135
10	Software de Dimensionamento SikaCarboDur.....	138
10.1	Introdução.....	138
10.2	Simulação com o software	138
10.2.1	Simulação com software “FRP Analysis”	139
10.2.2	Simulação com o software “Sika CarboDur”	142
10.3	Comparação de simulações.....	145
10.4	Validade de aplicabilidade do Software	147
11	Conclusões e Observações	149
	Referências bibliográficas	153
	Documentação consultada.....	154
	Anexos.....	i
	ANEXO I – Fichas técnicas S&P Clever Reinforcement Company.....	ii
	ANEXO II – Fichas técnicas Viapol	vi
	ANEXO III – Fichas técnicas MC-Bauchemie.....	xii
	ANEXO IV – Fichas técnicas Sika	xvii

Índice de figuras

Figura 1 - Aumento de secção de betão armado na face inferior de viga.....	10
Figura 2 - Aumento de secção de betão armado na altura da viga	11
Figura 3 - Exemplo de pilar com aumento de secção de betão armado.....	11
Figura 4 - Laje com armadura metálica de reforço.....	13
Figura 5 - Pilar com armadura metálica de reforço	13
Figura 6 - Reforço de laje com lâminas de fibra de carbono	16
Figura 7 - Reforço com CFRP em viga e pilar	16
Figura 8 - Cadeia de polímero termoplástico.....	22
Figura 9 - Matriz polimérica por ampliação microscópica e esquemática	23
Figura 10 - Características básicas das principais fibras de reforço	25
Figura 11 - Diagrama tensão-deformação das fibras e do aço.....	27
Figura 12 - Gráfico do comportamento de matriz dúctil e frágil.....	30
Figura 13 - Embalagem resina epóxi para lâminas (Sikadur 30 - componente A + B)	32
Figura 14 - Embalagem de resina epóxi para tecidos (Sikadur 330 - componente A + B).....	32
Figura 15 - Variação de volume de elementos de um compósito e respetiva influência.....	36
Figura 16 - Gráfico de tensão-deformação para várias percentagens de fibra e espessura.....	38
Figura 17 - Tecido de fibra de carbono unidirecional.....	40
Figura 18 - Esquema de lâmina de fibra de carbono.....	42
Figura 19 - Lâmina de fibra de carbono	42
Figura 20 - Recuperação da superfície de betão e armaduras	44

ÍNDICE

Figura 21 - Injeção de fissuras	45
Figura 22 - Soluções de limpeza da superfície de betão	46
Figura 23 - Aplicação da primeira camada de adesivo.....	46
Figura 24 - Corte da fibra para aplicação conforme projeto	47
Figura 25 - Aplicação da fibra de carbono na superfície	48
Figura 26 - Aplicação da segunda camada de adesivo	49
Figura 27 - Reforço de viga à flexão e ao corte.....	54
Figura 28 - Reforço de laje à flexão nas duas direções para momentos positivos	55
Figura 29 - Reforço de laje à flexão nas duas direções para momentos negativos.....	55
Figura 30 - Reforço de pilar e chaminé (flexão e encamisamento).....	57
Figura 31 - Reforço por encamisamento de pilar.....	57
Figura 32 - Reforço por encamisamento de reservatório	59
Figura 33 - Reforço interior de túneis.....	59
Figura 34 - Situação inicial de secção de betão armado antes do reforço	68
Figura 35 - Secção de betão armado reforçado com FRP para ELU	71
Figura 36 - Esquema de fendilhação por corte na zona de ligação.....	74
Figura 37 - Secção de betão armado reforçada com FRP para ELS	78
Figura 38 - Diagrama de esforço transversal (cálculo de dispensa de reforço ao corte).....	85
Figura 39 - Efeito de proteção do sistema compósito.....	92
Figura 40 - Placa de vermiculite exposta ao fogo.....	95
Figura 41 - Superfície de revestimento de vermiculite.....	95

Figura 42 - Placas de gesso sobre o CFRP	96
Figura 43 - Placas de silicato de cálcio.....	97
Figura 44 - Projeção de argamssa com fibras minerais.....	98
Figura 45 - Rolo de manta de fibra cerâmica.....	98
Figura 46 - Placas de lã de rocha.....	99
Figura 47 - Principais propriedades de lâminas Sika.....	107
Figura 48 - Provete de laminado para ensaio à tração.....	108
Figura 49 - Equipamento de ensaio à tração para lâmina.....	108
Figura 50 - Lâmina em rotura no respetivo equipamento.....	109
Figura 51 - Pormenor de rotura do laminado por tração.....	110
Figura 52 - Resultados de três provetes ensaiados.....	110
Figura 53 - Gráfico de tensão-deformação resultante do ensaio.....	111
Figura 54 - Esquema de provete para ensaio à tração].....	112
Figura 55 - Impregnação do tecido de fibra de carbono.....	114
Figura 56 - Remoção de adesivo excedente.....	114
Figura 57 - Tecido impregnado com o comprimento pretendido para ensaio.....	114
Figura 58 - Aplicação de cola na aba para extremidades.....	115
Figura 59 - Colagem da aba inferior no laminado.....	115
Figura 60 - Colagem da aba superior no laminado.....	115
Figura 61 - Prensa das abas para melhorar as condições de colagem.....	116
Figura 62 - Corte do corpo de prova com a largura pretendida para ensaio.....	116

ÍNDICE

Figura 63 - Aspeto final de provete para ensaio	116
Figura 64 - Equipamento de ensaio à tração.....	117
Figura 65 - Provete na máquina de tração antes da rotura.....	118
Figura 66 - Provete na máquina de tração após a rotura.....	118
Figura 67 - Resultados de ensaio de 10 provetes.....	120
Figura 68 - Gráfico tensão-deformação dos provetes.....	120
Figura 69 - Valores médios calculados após o ensaio	120
Figura 70 - Localização do elevador	123
Figura 71 - Planta com a respetiva localização do elevador	124
Figura 72 - Planta de reforço com a respetiva tipologia de projeto.....	127
Figura 73 - Corte da viga V1 com o respetivo reforço.....	127
Figura 74 - Corte das vigas V2 e V3 e o respetivo reforço	128
Figura 75 - Corte da viga V4 e o respetivo reforço.....	128
Figura 76 - Inspeção dos elementos a reforçar.....	130
Figura 77 - Marcação da área de lixagem.....	131
Figura 78 - Lixagem da superfície a reforçar.....	131
Figura 79 - Remoção da nata de cimento para recuperação da superfície	132
Figura 80 - Recuperação da superfície com argamssa polimérica.....	132
Figura 81 - Corte do tecido de fibra de carbono	133
Figura 82 - Aplicação da 1ª camada de adesivo.....	133
Figura 83 - Aplicação do tecido de fibra de carbono.....	134

Figura 84 - Melhoria de aderência com rolo plástico	134
Figura 85 - Aplicação da 2ª camada de adesivo	135
Figura 86 - Resultado final de reforço	135
Figura 87 - Secção transversal da viga T (medidas em mm)	139
Figura 88 - Introdução de dados no programa FRP Analysis.....	140
Figura 89 - Resultado inicial de dimensionamento pelo FRP Analysis	141
Figura 90 - Ajuste de solução com medidas comerciais	141
Figura 91 - Resultados com solução final de reforço	142
Figura 92 – Definição da secção de viga, resistência do betão e coeficiente de segurança	143
Figura 93 - Definição da armadura interna.....	144
Figura 94 - Introdução dos momentos para dimensionamento.....	144
Figura 95 - Solução final de reforço pelo programa Sika CarboDur.....	145

Índice de tabelas

Tabela 1 - Propriedades básicas de resinas termoendurecíveis.....	24
Tabela 2 - Fator de redução de fibra.....	67
Tabela 3 - Fabricantes e produtos em comparação	101
Tabela 4 - Informação técnica das lâminas dos diferentes fabricantes	102
Tabela 5 - Informação técnica dos tecidos dos diferentes fabricantes	105
Tabela 6 - Leitura das tensões para as extensões respectivas assumidas para ensaio	119
Tabela 7 - Módulo de elasticidade calculado com os diferentes intervalos de extensão	121
Tabela 8 - Dimensões dos elementos a reforçar.....	123
Tabela 9 - Dimensionamento de CFRP para cada elemento.....	126
Tabela 10 - Resultados para ELU e ELS nos dois programas	146

Lista de acrónimos

ABNT NBR - Associação Brasileira de Normas Técnicas - Norma Brasileira

ACI – American Concrete Institute

AFRP - Aramid Fiber Reinforced Polymer

ASTM – American Society for Testing and Materials

CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polymer

DIPRE - Dissertação, Projeto e/ou Estágio

EBR - Externally Bonded Reinforcement

EC2 – Eurocódigo 2

ELS – Estados Limites de Serviço

ELU – Estados Limites Últimos

EMPA – Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology

EN ISO – European Standard of International Organization of Standardization

EUA – Estados Unidos da América

FHWA - Federal Highway Agency

fib - Fédération International du Béton

FRP – Fiber Reinforced Polymer

GFRP – Glass Fiber Reinforced Polymer

ISEP - Instituto Superior de Engenharia do Porto

ISIS – Intelligent Sensing for Innovate Structures

JBDPA - Japan Building Disaster Prevention Association

JSCE - Japanese Society of Civil Engineers

L1 – Laje 1

Lista de Acrónimos

NSM – Near Surface Mounted

PAN – Poliacrilato

PRFA – Polímero Reforçado com Fibras de Aramida

PRFC – Polímero Reforçado com Fibras de Carbono

PRFV – Polímero Reforçado com Fibras de Vidro

PVC – Policloreto de vinila

rpm – Rotações por minuto

SLS – Serviceability Limit State

ULS – Ultimate Limit State

V1 – viga 1

V2 – viga 2

V3 – viga 3

V4 - viga 4

1D – Uma dimensão

2D – Duas dimensões

3D – Três dimensões

Simbologia

A – área (simbologia geral de área)

a – Flecha para cargas em serviço para combinação de ações quase-permanentes

a_1 – Flecha em estado não fendilhado

a_2 – Flecha em estado fendilhado

$A_{c,eff}$ – Área efetiva de betão tracionado

A_f – área de secção do compósito

$A_{f,aplicada}$ – Área de secção do compósito aplicada

A_{fib} – área da secção de fibra

$A_{f,requerida}$ – Área de secção do compósito requerida para ELU

a_L – Comprimento desde apoio até profundidade de fenda

A_m – área de secção da matriz

A_{s1} – Área de armadura longitudinal inferior

A_{s2} – Área de armadura longitudinal superior

b – Largura do elemento a reforçar (secção transversal reta)

b_l – Largura do laminado

b_w – Largura máxima da secção transversal

c_1 – Constante de calibração experimental

c_2 – Constante de calibração experimental

d – Distância de armadura longitudinal inferior ao eixo neutro

d – Altura útil do elemento a reforçar (secção transversal reta)

d_s – Diâmetro médio dos varões de armadura interior

d_2 – Distância da armadura superior à extremidade superior do elemento

Simbologia

E – Módulo de elasticidade

E_{cm} – Módulo de elasticidade médio do betão

E_f – Módulo de elasticidade do compósito

E_{fib} – Módulo de elasticidade da fibra

E_{fk} – Módulo de elasticidade característico do compósito

E_{fu} – Módulo de elasticidade último do compósito

E_L – Módulo de elasticidade de rotura do provete de ensaio

E_l – Módulo de elasticidade calculado através de ensaio

E_m – Módulo de elasticidade da matriz

E_s – Módulo de elasticidade do aço

F – Força (simbologia geral de força)

f_{cbd} – Tensão de rotura ao corte do betão

f_{ck} – Tensão de rotura à compressão característica do betão

f_{ctm} – Tensão de rotura à tração média do betão

f_f – tensão de rotura do compósito

f_{fd} – Tensão de tração de cálculo do compósito

f_{fib} – tensão de rotura da fibra

f_{fk} – Tensão de tração característico do compósito

f_{Lu} – tensão de rotura do provete de ensaio

f_m – tensão de rotura da matriz

f_{yd} – Tensão de cedência de cálculo da armadura

h – Altura do elemento a reforçar (secção transversal reta)

I_2 – Momento de inércia da secção fendilhada

I_{02} – Momento de inércia da secção homogeneizada fendilhada

k_b – Fator geométrico

k_c – Fator de qualidade do betão

k_M – Coeficiente de limitação da extensão no material compósito

L – Comprimento do elemento

$l_{b,máx}$ – Comprimento máximo de ancoragem

M_0 – Momento de serviço

M_{cr} – Momento de fendilhação

M_k – Momento atuante característico após o reforço

M_{Rd} – Momento resistente da secção reforçada

$M_{Rd,reforço}$ – Momento resistente após o reforço para ELU

M_{Rd0} – momento resistente do elemento não reforçado

$M_{Rk,0}$ – Momento resistente característico do elemento não reforçado

M_{sd} – Momento atuante de cálculo

M_{sdf} – momento atuante na secção crítica em ELU

$M_{ser,q-p}$ – Momento resistente após o reforço para ELS para combinação de ações quase-permanentes

$M_{ser,q-p,0}$ – Momento resistente antes do reforço para ELS para combinação de ações quase-permanentes

$M_{ser,r}$ – Momento resistente após o reforço para ELS para combinação de ações características

$M_{ser,r,0}$ – Momento resistente antes do reforço para ELS para combinação de ações características

M_{skf} – Momento atuante para combinação de ações quase-permanentes

$N_{fa,máx}$ – Força máxima de tração no compósito

P_{sd} – Carga inicial atuante

P_{sd}' - carga atuante após o reforço

Simbologia

R – Razão entre M_{sdf} e M_{Rd0}

R_n – Resistência nominal do elemento

$R_{n\theta}$ – Nível de resistência ao fogo

S_{DL} – Valor de ações permanentes

S_{LL} – Valor de ações variáveis

s_{rm} – Espaçamento médio entre fendas

t_f – Espessura do compósito

T_g – Temperatura de transição vítrea

t_l – Espessura do laminado

u_f – Perímetro de aderência do reforço FRP

V_{cd} – Contribuição do betão para resistência do elemento ao corte

V_{fd} – Contribuição do FRP para resistência do elemento ao corte

V_{fib} – Volume de fibra

V_m – Volume da matriz

V_{Rd1} – Esforço de corte resistente

V_{Rd2} – Esforço transversal resistente máximo

V_{sd} – Esforço de corte atuante

V_{wd} – Contribuição da armadura para resistência do elemento ao corte

w_k – Valor característico da largura de fenda

x – Profundidade do eixo neutro após o reforço

x_e – Profundidade do eixo neutro para ELS

x_0 – Profundidade do eixo neutro inicial

α – Fator de redução para força de tração máxima no compósito

α – Ângulo da direção principal das fibras em relação ao eixo longitudinal do elemento

α_f – Coeficiente de homogeneização entre o betão e o compósito

α_s – Coeficiente de homogeneização entre aço e betão

β – Coeficiente de correlação entre valores médio e característico de abertura de fendas

β_1 – Coeficiente de aderência das armaduras

β_2 – Coeficiente do tipo de carga atuante

γ_c – Coeficiente de segurança do betão

γ_f – Fator de segurança do material compósito

δ_G – Fator de afetação da altura da linha neutra da secção

ε – Extensão

$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_c$ – Deformação última do betão

ε_{c0} – Extensão inicial do betão

ε_f – Extensão do compósito

ε_{fd} – Extensão de cálculo do compósito

$\varepsilon_{fd,e}$ – Extensão efetiva de cálculo do FRP

$\varepsilon_{f,lim}$ – Extensão limite de rotura do compósito

ε_{fud} – Extensão limite última de cálculo para o compósito

ε_{fue} – Extensão última expectável *in situ*

ε_{fuk} – Extensão de rotura característica do compósito

ε_{fum} – Extensão do compósito obtida em ensaio de tração uniaxial

ε_{Lu} – Extensão de rotura do provete de ensaio

ε_{s1} – Extensão da armadura longitudinal inferior

ε_{s2} – Extensão na armadura longitudinal superior

ε_2 – Extensão de armadura em regime fendilhado

Simbologia

ζ_b – Coeficiente de distribuição de tensões

θ – Ângulo de fendas diagonais em relação ao eixo longitudinal do elemento

ρ_{eq} – Relação longitudinal equivalente de armadura

ρ_f – Percentagem de reforço FRP

σ – tensão

σ_c – Tensão no betão

σ_f – Tensão de tração do compósito

σ_s – Tensão no aço

τ_b – Tensão de corte na interface betão/compósito

τ_{fm} – Tensão média de aderência do reforço FRP

τ_{Rk} – Tensão de corte resistente característica

τ_{sm} – tensão média das armaduras ordinárias

Ψ – Fator de limitação da tensão de compressão no betão

1 Introdução, Motivação de pesquisa, Objetivos e Estrutura do documento

1.1 INTRODUÇÃO

A construção assumiu, desde sempre, um papel preponderante no desenvolvimento da sociedade, que promove a procura de soluções construtivas que maximizem a sua eficiência, seja a nível económico, de durabilidade ou ambiental.

Como se sabe, todas as construções têm um período de vida útil que pode variar em função de múltiplos fatores fazendo, muitas vezes, com que o período estimado não corresponda com o efetivo. Fatores estes que se prendem com degradação da estrutura por fraca qualidade dos materiais, erros de projeto e construção, envelhecimento e degradação dos seus materiais, desgaste mecânico, alteração das condições de apoio, alteração das condições de utilização, cargas excessivas, sismos, fogo ou acidentes.

Os fatores externos referidos anteriormente, juntamente com a idade da estrutura, podem culminar numa estrutura com um nível de degradação elevado, que poderá pôr em causa a sua funcionalidade resistente. Por este motivo, muitas vezes é necessário avaliar o risco de colapso da estrutura em função das cargas aplicadas, pelo que se podem tomar diferentes medidas em função da avaliação. Se se pretender estabelecer os valores de resistência inicial da estrutura, realiza-se por norma um processo de recuperação, sem fazer alterações na geometria da estrutura. Se se pretender aumentar a capacidade de carga resistente, poder-se-á fazer um processo de reforço estrutural, com soluções que variam em modo de aplicação e material de reforço utilizado.

A necessidade de recuperação, assim como a necessidade de reforço de estruturas, para recuperarem as suas características iniciais ou para assegurar novas funções da mesma, está na base do interesse por parte da indústria da construção no desenvolvimento contínuo de novas soluções. A procura de soluções mais vantajosas a nível económico, garantindo igualmente a finalidade do reforço, abriu caminho para a aplicação de novos sistemas de reforço em substituição dos sistemas de reforço convencionais. O conceito de reforço estrutural foi naturalmente evoluindo, sendo que numa fase inicial passava pelo aumento da secção de betão a reforçar, posteriormente pela colagem ou fixação mecânica de chapas metálicas nas secções críticas (armaduras metálicas) e mais recentemente sob o ponto de vista da construção, sensivelmente há 30 anos, o reforço estrutural por intermédio de polímeros de fibras (FRP – Fiber Reinforced Polymer) tem sido campo de pesquisas e desenvolvimento de soluções mais eficientes (armaduras não metálicas) (Tarso, 2005).

Um polímero de fibra, ou compósito, consiste na criação de uma matriz que agrega as características de todos os componentes que dela fazem parte. Especificamente, a constituição do sistema de reforço com compósitos será explorada nos seguintes capítulos deste documento.

A questão da durabilidade das estruturas foi ficando sempre para segundo plano, pelo que nos dias de hoje, muitas soluções estruturais estão a atingir os seus limites de vida útil afetando conseqüentemente a durabilidade global da estrutura. Situações como o reforço estrutural por via de colagem de armaduras metálicas nas superfícies do betão apresentam prematuramente efeitos de corrosão ou degradação do adesivo de colagem, representando novos investimentos na estrutura anteriormente reforçada. Tendo, também, o mercado da construção, a noção de que é imperativa a busca de soluções sustentáveis a longo prazo, é papel fundamental dos engenheiros o desenvolvimento de soluções e mais ainda, o da implementação efetiva das mesmas (Juvandes, 2002).

Em muitas situações de reforço estrutural, o projetista é confrontado com limitações arquitetônicas de projeto, estéticas, entre outras, que limitam naturalmente as possíveis soluções de reforço. É neste contexto que surge a necessidade de introdução de soluções inovadoras que permitam manter os requisitos exigíveis para as estruturas, mas ao mesmo tempo que consigam contornar as limitações existentes de projeto. A combinação das condicionantes do projeto, orçamento disponível para o reforço e facilidade de aplicação têm feito do reforço com compósitos de fibras, doravante designado por FRP (do inglês *Fiber Reinforced Polymer*), uma escolha preferencial. Como exemplo, refere-se o reforço de edificações destinadas a equipamentos sensíveis sob o ponto de vista eletromagnético, onde o reforço com materiais metálicos influencia negativamente a funcionalidade dos mesmos (Juvandes, 2002).

Argumentado pelo que previamente foi referido, pode dizer-se que materiais convencionais, como o betão e o aço, iniciam um processo de inadaptabilidade perante algumas situações, obrigando a substituição com soluções alternativas. Apesar de existirem documentos internacionais que auxiliam o dimensionamento do reforço FRP, existe ainda muita aplicação deste tipo de reforço através do conhecimento empírico e da experiência dos projetistas. Negligenciar o processo de dimensionamento poderá resultar num dimensionamento escasso ou num sobredimensionamento do reforço, que neste último caso poderá culminar em rotura por colapso, como se referirá ao longo deste documento. Uma vez que os requisitos sejam bem estabelecidos e as propriedades dos materiais constituintes do sistema bem conhecidas, poder-se-á afirmar com toda a certeza as vantagens e desvantagens deste sistema, sem necessidade de recurso contínuo ao conhecimento empírico (Tarso, 2005).

1.2 MOTIVAÇÃO DE PESQUISA

No âmbito da disciplina DIPRE, do segundo ano curricular do Mestrado de Engenharia Civil, surgiu a oportunidade da realização de estágio na Sika Brasil, no departamento técnico-comercial na área de Refurbishment (reforço e recuperação estrutural). A Sika, além de ter uma gama de produtos que abranje vários mercados da construção, é um dos principais fornecedores de produtos para reforço estrutural de fibra de carbono (CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polymer), pelo que a oportunidade de investigar na área de reforço estrutural com novas soluções se tornou, sem dúvida, um dos fatores influenciadores mais importantes para a pesquisa nesta área. À medida que foi avançando a pesquisa sobre reforço estrutural com CFRP, a motivação, para continuar o trabalho, foi alicerçada pela curiosidade de acompanhar situações reais de reforço e comparar os modelos de cálculo utilizados e as técnicas de aplicação.

Existe a necessidade crescente de preservar e recuperar o património existente. O reforço estrutural através dos polímeros de fibra permite uma abordagem temática atual, relativamente recente e com muitas conclusões ainda por definir. Alguns engenheiros afirmam que em determinados casos, a fibra como material de reforço não se verifica viável, havendo disparidade de conclusões retiradas de testes laboratoriais. Significa isto, que ainda há muito para investigar para se obter em conclusões vinculativas e regulamentares (Tarso, 2005).

A falta de consenso, entre os peritos a nível mundial, exige dos engenheiros um maior foco sobre esta temática e ser definitivamente abordada como uma técnica de reforço que se baseia nos conceitos primordiais das estruturas. Tentar-se-á com este trabalho analisar detalhes de dimensionamento que constam nos guias de dimensionamento, verificar a sua real aplicabilidade em projetos, verificar a aplicabilidade de ferramentas auxiliares de dimensionamento, entender os pontos de divergência entre os peritos e adquirir conhecimentos de uma matéria recente.

A escassez de conhecimento profundo, sobre o funcionamento de sistemas de reforço com compósitos de fibra, abre portas para a motivação de pesquisa sobre este tema. Tendo uma ligação direta com o campo da reabilitação, sendo uma área do meu total interesse, reforça-se a motivação pela aprendizagem do reforço com FRP. Além de mais, o estágio realizado no Brasil, permite obter outro tipo de visões sobre a engenharia e a realidade das construções brasileiras. A possibilidade de início de carreira numa área que envolve reforço e recuperação de estruturas, deu motivação para o estudo aprofundado de uma tecnologia, ainda não muito avançada, para promover melhorias nos próprios sistemas.

Como último fator motivador, não sendo por isto o menos importante, foi o de ter a responsabilidade da implementação de uma novo software de dimensionamento de CFRP para

elementos de betão armado sob esforços de flexão, esforços de corte e encamisamento, designado por *Sika Carbodur*.

1.3 OBJETIVOS

Apesar do reforço estrutural através de compósitos de fibras ter sido implementado oficialmente no mercado da construção no início dos anos 80, ainda não é vista, por todos os elementos envolvidos na engenharia civil, como uma técnica científica, da qual se podem tirar muitos benefícios, se aplicada devidamente.

Parece ainda haver um sentimento de divergências acerca dos benefícios deste tipo de reforço em determinadas situações (Azevedo, 2008). Assim sendo, este trabalho tem o principal objetivo de explorar documentos que sustentam o dimensionamento de CFRP, definir as vantagens e desvantagens deste tipo de reforço através de evidências de casos de projeto, entender o processo de dimensionamento teórico e prático do reforço e avaliar as divergências de opinião acerca desta solução.

Pretende-se, acima da especificação teórica de dimensionamento, observar como é feito o cálculo de reforço na prática pelos projetistas e que tipos de soluções poderão ser implementadas com o sistema de FRP.

Este documento pretende também avaliar quais as informações fundamentais que devem constar da ficha técnica de um produto integrante do sistema, fazendo comparação com quatro grandes fornecedores no Brasil.

Para ser possível a realização do referido estudo, foi necessário delinear as etapas de pesquisa por forma a não ocorrer dispersão temática, uma vez que o âmbito de reforço FRP é demasiado extenso. Sendo que as etapas são:

- Caracterização dos materiais envolvidos na criação de um compósito de fibra de carbono;
- Estudo de técnicas de aplicação para reforço externo com compósitos de fibra de carbono;
- Abordagem do documento guia para dimensionamento, usado no Brasil e na Europa (*Externally Bonded FRP Reinforcement for RC structures* – *Bulletin 14* (2001));
- Contextualização e verificação das divergências de dimensionamento de estruturas de betão armado entre Portugal e Brasil, respetivamente Eurocódigo 2 e ABNT NBR 6118;
- Estudo do dimensionamento de reforço de CFRP de elementos à flexão e ao corte com base no *Bulletin 14.fib:01*;
- Acompanhamento de projetos e execução com CFRP de produtos da Sika;

- Análise dos produtos da concorrência e respetivas fichas técnicas;
- Estudo e implementação de software de dimensionamento criado pela Sika e comparação com resultados teóricos.

No fim deste trabalho, pretende-se a aquisição de novos conhecimentos na área de reforço estrutural, que permitam a criação de uma visão crítica sobre a tecnologia de reforço com compósitos. É importante saber distinguir os pontos fortes e os pontos fracos desta tecnologia, mas sobretudo, saber como se podem melhorar os pontos fracos para a mesma ter maior aceitação no mercado. O estágio realizado na Sika Brasil pressupõe que haja conclusões a apresentar à empresa, nomeadamente na procura de novas soluções de mercado, pelo que no fim da aprendizagem do sistema existente na empresa, existe a necessidade de entender quais as vantagens que o produto apresenta no mercado e a definição de novos produtos para introduzir na gama de produtos da Sika Brasil, para reforço com FRP.

1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

O relatório de estágio será dividido em 11 capítulos, que permitem dividir o conteúdo deste documento de forma clara e de fácil leitura.

Este relatório de estágio não pretende descrever unicamente as atividades que foram desenvolvidas durante o estágio, mas sim fazer uma análise de uma solução e explorá-la tecnicamente no âmbito do Mestrado de Engenharia Civil. A solução escolhida foi o reforço estrutural com compósitos de fibra de carbono, pelo que a estrutura do documento passa pelo estudo da solução em termos teóricos e práticos.

O Capítulo 1 faz referência à introdução do tema do relatório de estágio, à motivação de pesquisa, aos objetivos e à estrutura do documento. Pretende-se com este capítulo, uma abordagem de contextualização da necessidade de inovar em soluções sob o ponto de vista da sustentabilidade.

O Capítulo 2 inicia a matéria teórica que envolve a questão do reforço estrutural, fazendo uma pequena abordagem histórica do surgimento da nova tecnologia, alvo de conteúdo deste documento. São apresentadas, nesse capítulo, as tecnologias de reforço convencionais, como o aumento de secção de betão e reforço com armaduras metálicas e a tecnologia de reforço com armaduras não metálicas, mais especificamente, o reforço com compósitos de fibras. São destacadas as vantagens e desvantagens de cada uma delas e as suas respetivas características.

O Capítulo 3 desenvolve o conceito de compósito de FRP (Fiber Reinforced Polymer), fazendo destaque aos elementos que constituem o mesmo. Expõe-se a definição de material compósito, os fatores a considerar para o bom comportamento do compósito, as características técnicas dos

elementos, a análise teórica das propriedades das fibras e em particular a importância de cada um dos elementos para o processo de reforço.

O Capítulo 4 pretende mostrar a aplicabilidade dos compósitos de FRP, isto é, a que tipo de estruturas se aplica e a que tipo de esforços se pode reforçar com compósitos de fibra. No conteúdo deste capítulo são referidos os principais esforços que devem ser avaliados, os cuidados na consideração das propriedades mecânicas, com especial atenção à tensão de tração e ao módulo de elasticidade, a sequência de aplicação de compósitos e abordagem de dois sistemas de reforço compósito externo.

O Capítulo 5 tem como objetivo permitir que o leitor conheça quais os documentos vigentes que existem para o dimensionamento de soluções com FRP. Referem-se os principais países que têm avançado na tecnologia FRP, bem como a documentação originária de cada um deles. Neste capítulo, faz-se um estudo do modelo de dimensionamento à flexão e ao corte, baseado no Bulletin 14 *fib*:01, por ser um documento utilizado na Europa e no Brasil. No final do capítulo faz-se um comentário comparativo entre o dimensionamento teórico e o dimensionamento na prática.

O Capítulo 6 faz referência a um dos aspetos mais controversos nos sistemas de reforço com compósitos de fibra de carbono. Após a leitura e estudo de documentos científicos e artigos publicados, é apresentada a situação de verificação de incêndio em estruturas reforçadas com FRP. São também apresentadas algumas soluções comuns de proteção de sistemas compósitos ao fogo.

O Capítulo 7 baseia-se numa tarefa que foi solicitada no plano de trabalhos do estágio curricular. Foi solicitada uma comparação dos produtos da empresa com os produtos da principal concorrência no Brasil. Neste capítulo constam apenas os principais aspectos técnicos, sendo que por questões de confidencialidade, as conclusões comerciais não puderam ser apresentadas neste documento. A comparação referida neste documento diz respeito única e exclusivamente à leitura e interpretação das fichas técnicas de produto fornecidas pelos fabricantes, e sendo esses documentos do domínio público, não houve necessidade de omitir as empresas comparadas.

O Capítulo 8 apresenta dois ensaios de referência com sistemas de reforço da empresa Sika. O primeiro ensaio foi apresentado por Juvandes (2002), em que é feito um ensaio à tração de um laminado pré-fabricado (lâmina) para comparação dos resultados da tensão de rotura, extensão de rotura e módulo de elasticidade obtidos experimentalmente e os valores divulgados na ficha técnica da Sika. O segundo ensaio foi realizado pela Sika Services AG, em que foi ensaiado um tecido (unidirecional impregnado com adesivo) à força de tração, com o objetivo de determinar o módulo de elasticidade e extensão, de acordo com os requisitos estipulados na EN ISO 527-5:2009.

O Capítulo 9 apresenta um caso de estudo de reforço, onde se teve a oportunidade de acompanhar a fase de conceção do projeto e a execução do respetivo reforço. São apresentadas as dificuldades que se encontram na maioria dos casos de reforço, o processo de dimensionamento realizado em gabinete de projeto e todos os detalhes na execução da aplicação do reforço FRP.

O Capítulo 10 faz menção a dois programas de dimensionamento de FRP. Ambos da autoria da Sika, sendo um deles a versão atual e o outro uma versão que se pretende implementar em substituição. São apresentadas as simulações realizadas em ambos os programas e a análise dos resultados obtidos. O ponto mais importante deste capítulo é avaliar a viabilidade no uso de programas de dimensionamento.

O Capítulo 11 apresenta as conclusões gerais de todo o processo de estágio e do conhecimento adquirido através do mesmo. São feitas conclusões pontuais, consideradas de maior relevância. São também apresentados os resultados para a companhia da realização do estágio e considerações para futuros trabalhos no campo do reforço estrutural com compósitos de fibras.

2 Reforço de estruturas de betão

2.1 INTRODUÇÃO

De forma a criar um espírito crítico, relativamente à comparação entre sistemas de reforço de convencionais e recentes, é importante fazer uma prévia referência geral dos mesmos.

Este capítulo tem o propósito de introduzir o conceito de reforço através de aumento de secção de betão, reforço de estruturas por colagem estrutural com armaduras metálicas (chapas metálicas) e de reforço de estruturas por colagem estrutural com armaduras não metálicas (FRP). Tem também o propósito de apresentar as vantagens e desvantagens dos sistemas para uma análise mais assertiva e apresentar as características fundamentais de cada um dos sistemas.

As técnicas de reforço dividem-se, de forma geral, segundo a seguinte classificação:

- Adição de novos elementos resistentes (ex.: adição de betão armado);
- Reforço a elementos resistentes existentes:
 - Encamisamento com betão armado;
 - Encamisamento com chapas metálicas;
 - Encamisamento com CFRP (compósito de fibra de carbono);
 - Adição de armadura exterior com chapas metálicas;
 - Adição de armadura exterior com colagem de CFRP;
- Introdução de pré-esforço.

Neste capítulo serão abordados os sistemas já referidos, como o encamisamento com betão armado, adição de armadura exterior com chapas metálicas e adição de armadura com colagem de CFRP.

2.2 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O desenvolvimento de novas soluções de reforço estrutural tem tido um foco bastante positivo por parte da indústria de construção e por parte dos engenheiros de quem ela depende, mas ainda precisa de mais incentivo.

O reforço estrutural prevê, para a estrutura, que os seus objetivos passem por aumentar a resistência, aumentar a rigidez, aumentar a ductilidade, reduzir a fissuração, reduzir a deformação e melhorar o comportamento dinâmico. Dentro do cenário de reforço estrutural, verifica-se que as cargas repetidas e agentes agressivos podem originar a fragilização mecânica das estruturas

durante o seu período de vida útil. Os materiais utilizados no reforço, bem como os planos de manutenção, devem ser projetados para garantir a longevidade expectável para a estrutura. O caso de reabilitação de pontes é um caso latente de que é necessário ajustar as técnicas de reabilitação e de reforço de estruturas, devido à falta de manutenção das soluções convencionais e economia. Em exemplo, nos EUA, foram substituídos 250.000 dos 578.000 tabuleiros de pontes, com custos avaliados no dobro dos iniciais. No Reino Unido, os custos de reparação de cerca de 165.000 pontes, no período de 1988 e 1999, foram estimados em 1.25 biliões de libras por Weaver (1995) (Juvandes, 2002). De acordo com a FHWA – *Federal Highway Agency*, cerca de 35% das obras de arte norte-americanas encontram-se com necessidades de intervenção estrutural considerável, sendo que em muitos casos se encontram estruturas em risco de colapso. “Em Portugal, de acordo com a Estradas de Portugal, S.A., foram lançados 21 concursos num total de 18 milhões de euros, bem como concluídas 30 intervenções em obras de arte no território nacional no ano de 2009 no valor de 20 milhões de euros, sendo que em 12 situações, a necessidade de intervenção foi imediata, dado o facto de terem decorrido de situações de alertas decorrentes do Plano de Inspeções de Rotina.” (Carvalho, 2011). No Brasil, deu-se, a 3 de julho de 2014, o colapso do viaduto de Belo Horizonte – Minas Gerais, causando 22 feridos e dois mortos, por falta de manutenção e reforço atempado.

Métodos de aumento de secção do betão, diminuição de vãos ou pré-esforço externo, são soluções convencionais, bem estabelecidas, mas que requerem recursos financeiros e físicos elevados para a respetiva implementação. Outra técnica de reforço convencional é a colagem estrutural de chapas metálicas nas superfícies de vigas ou lajes solicitadas a esforços de flexão e/ou corte ou o encamisamento de pilares para esforços de flexão e/ou compressão.

O reforço por colagem estrutural com chapas metálicas, um dos métodos convencionais mencionados, é o que apresenta um fator económico mais conveniente, no entanto soluções deste carácter têm uma durabilidade estimada de quinze anos, por efeitos de corrosão do aço ou degradação do adesivo. (Leite, 2010)

Uma solução apontada para aumentar a durabilidade do reforço é a aplicação de sistemas FRP, pois não apresentam inconvenientes de corrosão e têm elevada resistência química, para além das suas características mecânicas. No capítulo 3 serão abordadas as propriedades dos compósitos com mais destaque.

De acordo com Rodrigues (2013), perante a situação de uma estrutura visivelmente degradada e com necessidade de recuperação ou reforço, podem ser tomadas decisões como:

- Não intervir de imediato;

- Reavaliar a capacidade resistente da estrutura;
- Prevenir futuras deteriorações sem melhoria da resistência da estrutura;
- Reparar toda ou parte da estrutura repondo as propriedades iniciais;
- Reforçar a estrutura repondo ou aumentando a sua capacidade de carga;
- Reconstruir toda ou parte da estrutura;
- Demolir toda ou parte da estrutura.

O tipo de decisão implementada varia consoante a definição de metodologia de reparação, afetada pelo:

- Tipo de utilização e período de vida da estrutura;
- Requisitos de desempenho estrutural (estética, impermeabilidade, etc);
- Manutenção prevista para a estrutura;
- Possibilidade de realizar operações de reparação futuras;
- Aplicabilidade das técnicas de reparação à deterioração em causa;
- Condições de acesso;
- Custos.

2.3 AUMENTO DE SECÇÃO DE BETÃO ARMADO

O encamisamento com betão armado é um exemplo de reforço com aumento de secção da estrutura original (ver figuras 1, 2 e 3). É considerado um processo de reforço convencional, mas ainda muito utilizado nas técnicas de reforço.

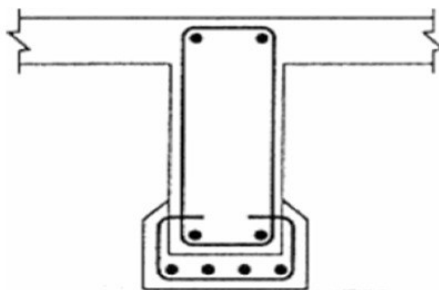


Figura 1 - Aumento de secção de betão armado na face inferior de viga

[Fonte: Documentos da disciplina de Inspeção e Reforço de Estruturas(ISEP); Rodrigues, Carlos (2013)]

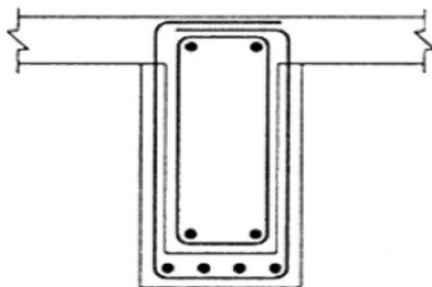


Figura 2 - Aumento de secção de betão armado na altura da viga

[Fonte: Documentos da disciplina de Inspeção e Reforço de Estruturas(ISEP); Rodrigues, Carlos (2013)]



Figura 3 - Exemplo de pilar com aumento de secção de betão armado

[Fonte: Documentos da disciplina de Inspeção e Reforço de Estruturas(ISEP); Rodrigues, Carlos (2013)]

Tem como principais vantagens:

- Simplicidade de execução;
- Utilização de técnicas e materiais correntes;
- Maior garantia na qualidade dos trabalhos e economia;
- Boa proteção ao fogo e corrosão de armaduras suplementares.

E como desvantagens:

- Aumento da dimensão dos elementos reforçados;
- Impacto arquitetónico;
- Tempo de espera necessário para a presa e endurecimento do betão.

A técnica de aumento de secção de betão armado exige determinados cuidados na sua execução que devem ser privilegiados, sob o risco do reforço não atuar convenientemente aos pressupostos para o qual foi projetado.

O betão novo deve ter as propriedades que verifiquem os fins para os quais foi projetado o reforço, isto é, por exemplo deve cumprir os requisitos de resistência mecânica para as ações aplicadas à estrutura a reforçar. A ligação entre o betão novo e o betão original é uma das características mais importantes neste tipo de reforço, pois só com a total aderência de um substrato com o outro é que se consegue uma trabalhabilidade do conjunto. Para a execução de uma boa ligação, devem remover-se as zonas com betão deteriorado ou desintegrado, tornando o substrato o mais homogêneo e consistente possível (Apontamentos teóricos da disciplina de Inspeção e Reforço de Estruturas do ISEP, 2013).

Existem várias tecnologias de aplicação do reforço com aumento de secção de betão armado. Nomeadamente, aplicação do betão com cofragem, aplicação do betão projetado ou aplicação do betão manualmente.

No que respeita ao material de reforço, o mesmo deve cumprir as seguintes especificações:

- Apresentar boa aderência ao substrato;
- Boa resistência à compressão;
- Baixa retração;
- Boa trabalhabilidade;
- Módulo de elasticidade e coeficiente de dilatação térmica semelhante ao do betão existente.

É importante referir, que num reforço passivo, não é eficiente o uso de materiais que possuam características muito melhores que os materiais existentes, sob o risco do reforço e a estrutura existente não funcionarem como um sistema.

2.4 ARMADURAS METÁLICAS

Segundo Juvandes (2002), a técnica de colagem de armaduras metálicas surgiu em França nos finais dos anos 60, com os primeiros ensaios sobre vigas de betão reforçadas com chapas metálicas, por L'Hermite (1967) e por Bresson (1971).

A maioria dos casos de reforço com colagem de chapas metálicas foi praticamente à flexão (figura 4), devido ao facto de ser o primeiro esforço a ser estudado para reforço. Posteriormente, foram estudadas soluções de reforço para esforços de corte e compressão (figura 5).

Em média, as estruturas reforçadas com chapas metálicas têm uma duração de quinze anos até se verificarem processos de deterioração da estrutura de reforço, conforme mencionado por Juvandes (2002).



Figura 4 - Laje com armadura metálica de reforço

[Fonte: Documentos da disciplina de Inspeção e Reforço de Estruturas(ISEP); Rodrigues, Carlos (2013)]



Figura 5 - Pilar com armadura metálica de reforço

[Fonte: Documentos da disciplina de Inspeção e Reforço de Estruturas(ISEP); Rodrigues, Carlos (2013)]

Existem fatores que devem ser considerados, pelo projetista, para a maximização do sistema de colagem de chapas metálicas na superfície de betão. De acordo com Appleton et al. (1997), referido por Juvandes (2002), os fatores de referência podem ser resumidos nos seguintes pontos transcritos:

- “A técnica é adequada quando há deficiência nas armaduras existentes e só se as dimensões e a qualidade do betão dos elementos estruturais forem desejáveis”;
- “Devem utilizar-se aços de resistência baixa ou média, como o Fe 360, de modo a não ser necessária uma deformação elevada para mobilizar a sua capacidade resistente”;
- “Requer-se uma cuidadosa preparação das superfícies do betão e das chapas para garantir condições de boa ligação entre as chapas de reforço e o betão existente”;
- “Os problemas da transmissão de forças ao longo da interface de colagem podem ser atenuados, desde que se opte por um adesivo de epóxido com boa resistência ao corte (15 a 25 MPa) e se controle o nível das tensões de corte na interface, para não exceder a capacidade do betão que, geralmente, é o material condicionante do sistema (Täljsten, 1994). Citando Appleton et al. (1997), a ligação pode e deve ser complementada com buchas metálicas”;
- “Aconselha-se a aliviar a estrutura de todas as ações variáveis e permanentes removíveis na execução do reforço, de modo a garantir-se que as chapas adicionadas sejam mobilizadas para as cargas de serviço”;
- “As armaduras coladas devem ser protegidas contra a corrosão e a ação do fogo, de forma a que neste último caso resista ao fogo durante 30 minutos, no mínimo.”

A aplicação de chapas metálicas, no exterior da superfície de betão, apresenta as seguintes vantagens:

- Facilidade e rapidez de execução;
- Pequena perturbação nas dimensões arquitetónicas;
- Aumento de rigidez.

Citando Juvandes (2002), os principais inconvenientes do uso da aplicação de armaduras metálicas são:

- “A dificuldade de montagem *in situ* do sistema, demasiado pesado, de colagem das chapas metálicas e agravado com a acessibilidade limitada nalguns casos (ex: pontes)”;
- “O risco de corrosão na superfície da junta de ligação do aço ao adesivo”;

- “A necessidade de criação de juntas de ligação entre chapas, devido às limitações das dimensões para o seu transporte.”

2.5 ARMADURAS NÃO METÁLICAS

Devido ao processo de melhoria contínua, inerente à necessidade de criar soluções mais vantajosas em todos os aspetos, foram crescendo, ao longo dos anos, soluções de reforço que vieram a eliminar as desvantagens da aplicação de reforço com chapas metálicas, que até ao início dos anos 80 era a mais desenvolvida.

A importância dos metais, no reforço estrutural, foi diminuindo em prol do crescimento de soluções de compósitos. Este crescimento criou automaticamente uma competitividade no mercado, o que permitiu um desenvolvimento de soluções e o estudo das mesmas, por entidades académicas e até mesmo comerciais.

Inicialmente, o desenvolvimento de conhecimentos na aplicação de compósitos de FRP não foi com o propósito de uso na construção (figuras 6 e 7), mas sim para soluções militares, aeroespaciais, náuticas e automobilísticas. Porém, o interesse por parte dos intervenientes na construção surgiu em diferentes zonas do mundo, principalmente no Japão, na América do Norte e na Europa (Azevedo, 2008). O estudo de soluções de compósitos teve por base propósitos diferentes, mas que igualmente se complementaram. No caso do Japão, o propósito era a melhoria das edificações para a situação de sismo; no caso da América do Norte, o propósito era o aumento de durabilidade das estruturas e na Europa, o propósito era a preservação e reabilitação do património histórico e cultural (Juvandes, 2002).

Não se sabe com total certeza onde se deram os primeiros ensaios laboratoriais do sistema de reforço com compósitos de fibra colados exteriormente. No entanto, presume-se que em 1984 se deu o primeiro teste numa estrutura reforçada com a técnica de colagem de armaduras não metálicas, no “Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research” (EMPA) na Suíça. Após o primeiro teste em laboratório, referido anteriormente, sucederam-se vários ensaios em todo o mundo, destacando as frentes de pesquisa da Alemanha, dos EUA, Canadá e Japão (Juvandes, 2002).

Com as sucessivas aplicações de referência a nível internacional, conseguiu definir-se um padrão experimental de resultados e da eficiência deste sistema, porém o conhecimento teórico de dimensionamento deste reforço ficava aquém do exigível pela engenharia civil. Devido a essa escassez informativa, foram desenvolvidos documentos auxiliares para o dimensionamento e para os processos de aplicação, tendo destaque os documentos desenvolvidos pelo ACI – American

Concrete Institute (EUA), *fib* – Fédération Internationale du Béton (Europa) e JSCE – Japanese Society of Civil Engineers (Japão).

“Segundo Meier (1997-a), a primeira aplicação de um sistema de reforço com FRP deu-se na Europa, na ponte “Kattenbusch Bridge” (Alemanha) entre 1986 e 1987, onde se utilizaram 20 tiras de laminados de polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP)” (Juvandes 2002). A ponte “Ibach Bridge” (Suíça), foi o exemplo pioneiro de reforço com fibras de carbono (CFRP) através de uma resina de epóxido (Juvandes, 2002).

Apesar de muitos esforços terem sido alinhados no sentido de criar modelos exatos de dimensionamento, ainda não se conseguiu o consenso de opiniões em torno do tema e muitos reforços a nível mundial são realizados meramente pelo conhecimento empírico (Tarso, 2005).



Figura 6 - Reforço de laje com lâminas de fibra de carbono

[Fonte: Documentos da disciplina de Inspeção e Reforço de Estruturas(ISEP); Rodrigues, Carlos (2013)]

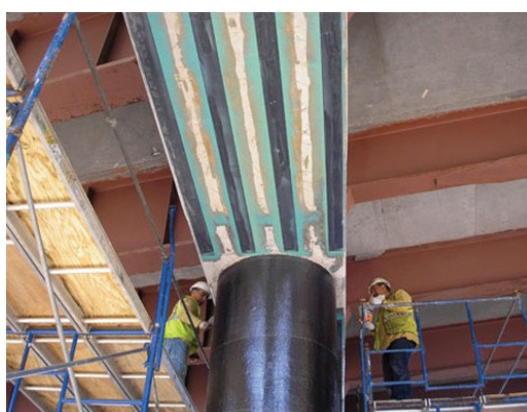


Figura 7 - Reforço com CFRP em viga e pilar

[Fonte: Documentos da disciplina de Inspeção e Reforço de Estruturas(ISEP); Rodrigues, Carlos (2013)]

Igualmente, a qualquer tipo de reforço estrutural, as condicionantes para aplicação de um sistema externo de armaduras não metálicas devem ser bem definidas e estabelecidas. Sendo reconhecido o risco potencial do reforço por colagem, a viabilidade do mesmo é dada após se verificarem as seguintes medidas adicionais de segurança, segundo Juvandes (2002):

- O betão deve estar em boas condições, com aderência na superfície superior a 1,5 MPa para laminado de fibra de carbono e 1,0 MPa para tecidos de fibra de carbono;
- Um reforço à flexão deve ter a capacidade para mobilizar uma camada de compressão efetiva e a resistência ao esforço transversal, através da armadura existente ou por adição de outra exteriormente;
- Selecionar um sistema de reforço suficientemente conhecido no mercado;
- Intervenção de técnicos com experiência a nível do projeto, da execução/aplicação e do acompanhamento no tempo.

Tem-se verificado, ao longo dos anos, que as soluções com compósitos de FRP apresentam elevada durabilidade em relação aos sistemas de colagem com chapas metálicas. Apesar dos materiais serem mais dispendiosos no primeiro sistema, existe uma redução do custo global pela necessidade reduzida de manutenção e reabilitação dos sistemas de reforço (Manzano, 2012 e Azevedo, 2008).

Um reforço de FRP contempla as seguintes vantagens:

- Aumento de resistência à flexão;
- Aumento da resistência ao corte;
- Redução da deformação;
- Confinamento do betão comprimido;
- Controlo de fendilhação;
- Razão elevada resistência/peso;
- Espessura reduzida;
- Geometricamente flexível;
- Leve;
- Fácil de instalar;
- Imune à corrosão;
- Elevada capacidade de dissipação de energia.

Um FRP também apresenta as suas desvantagens como:

- Material sem patamar de cedência (rotura em regime elástico);
- Material novo e ainda pouco conhecido;
- Sofre envelhecimento por raios ultravioleta;
- Requer mão-de-obra especializada;
- Ausência de normas nacionais (caso de Portugal e Brasil);
- Baixa resistência ao fogo.

3 Compósitos de FRP

3.1 INTRODUÇÃO

Focando o objetivo deste documento, este capítulo pretende fazer uma exposição acerca dos conceitos de um compósito de FRP, incidindo fundamentalmente no compósito de fibra de carbono.

Apesar da evolução tecnológica não ser tão visível quando comparada com outro tipo de tecnologias, os sistemas de reforço com compósitos têm revolucionado o mundo da construção, no que diz respeito ao reforço estrutural de elementos de betão armado. Por norma, o uso de fibras na construção pressupõe o reforço de uma estrutura já existente, que é submetida a novos esforços, que sofreu danos acidentais, danos consequentes da idade da estrutura ou até mesmo má conceção original, que obriga a reparações estruturais para posterior reforço estrutural.

Técnicas como o aumento da secção com acréscimo de betão ou a colocação de chapas metálicas na estrutura são realmente consideradas como tradicionais, no entanto, existem soluções que se podem tornar mais viáveis sob o ponto de vista económico e de facilidade/tempo de aplicação, permitindo igualmente um aumento de capacidade resistente do elemento, maioritariamente com uma razão de capacidade de carga superior às soluções tradicionais.

Sugere-se, neste documento, a utilização de soluções de reforço estrutural a partir do uso de fibras como sendo uma solução que tende a ser a mais favorável a nível económico e a nível estrutural. É de salientar, no entanto, que as características dos materiais utilizados num reforço estrutural são bastante diferentes daquelas que são apresentadas pela grande maioria dos fornecedores nas suas fichas técnicas, salvo raras exceções, pelo que, entender os vários elementos de um sistema compósito é fundamental para avaliar se as informações divulgadas pelos fornecedores se verificam suficientes e coerentes.

Um sistema de reforço com compósitos de fibra de carbono através de colagem exterior (EBR – Externally Bonded Reinforcement) compreende os seguintes elementos:

- Betão Armado;
- Matriz polimérica;
- Adesivo (resina).

A matriz polimérica tem na sua composição os seguintes elementos:

- Fibra de carbono;
- Adesivo ou resina polimérica.

Note-se que um sistema compósito pressupõe a junção dos vários materiais intervenientes no mesmo. Enquanto que produto para reforço pressupõe uma referência independente do sistema. Isto é, produto compreende os elementos necessários como a fibra e o adesivo, enquanto que o sistema é a fusão dos dois produtos aplicados no betão.

3.2 MATERIAIS COMPÓSITOS

Por definição, um material compósito é aquele que resulta da junção de dois materiais independentes que dão lugar a um único produto. Os dois elementos unificados passam a responder em conjunto às suas propriedades físicas, mecânicas e químicas e as propriedades individuais deixam de ser contempladas como valores finais a introduzir em cálculo.

Pode dizer-se que o betão, por si só, é um elemento compósito que resulta da unificação de várias matérias primas como a água, areia, cimento, brita e/ou aditivos. Analogamente, também se pode considerar que o betão armado é um elemento compósito pela fusão do betão com o aço, o que cria um elemento novo e com características diferentes aos seus materiais de origem. No entanto, a nível das suas propriedades mecânicas, o betão armado continua a ser analisado em separado em algumas circunstâncias, isto é, para flexão e tração vigoram as propriedades do aço e para compressão vigoram as propriedades do betão, sendo exemplo a força de tração do betão assumida como desprezável.

A ação conjunta acontece com o reforço através de compósito de fibra, que uma vez fixado na superfície de betão armado cria um novo compósito, que é compreendido pelo conjunto betão armado/compósito de fibra.

Sucintamente, a eficiência de um compósito de FRP é verificada quando as fibras do compósito resistem a elevadas tensões transmitidas pela matriz polimérica, na qual se encontram as fibras. Em suma, o comportamento de um compósito FRP depende dos materiais que o constituem, do teor e da disposição das fibras, da interação entre os materiais e os processos de fabrico.

Segundo Juvandes et al. (1996-a), são considerados os seguintes fatores intervenientes no bom comportamento do compósito:

- Orientação;

- Comprimento;
- Forma;
- Composição das fibras;
- Propriedades mecânicas da resina da matriz;
- Adesão/ligação entre as fibras e a matriz.

A análise da secção transversal através do equilíbrio das forças internas é o método universalmente utilizado para definir a quantidade de compósito a ser aplicado na estrutura a reforçar.

No sentido de fornecer os dados corretos para dimensionamento, os fornecedores deveriam disponibilizar os dados do conjunto fibra mais resina, uma vez que as propriedades mecânicas do compósito são notoriamente diferentes das propriedades da fibra isolada. Acontece que, pela impregnação de um adesivo na fibra, esta baixa as suas características mecânicas, principalmente no seu valor de módulo de elasticidade e resistência à tração, como será demonstrado adiante neste documento. O projetista deverá ter em conta o efeito negativo que o adesivo provoca na fibra e deverá projetar soluções viáveis para esse mesmo efeito, isto porque, o valor que consta na maioria das fichas técnicas dos produtos não é coincidente com a realidade de aplicação.

3.3 MATRIZ POLIMÉRICA OU LAMINADO

A matriz polimérica ou laminado é, como o próprio nome indica, um polímero composto por dois elementos que são as fibras e a resina polimérica. É responsável pela distribuição das tensões entre as fibras, de forma uniforme e também assume um papel importante na proteção das mesmas em relação aos agentes exteriores. A matriz de um sistema compósito garante a total coesão entre as fibras unificando os fios soltos como se encontra, por exemplo, num tecido de fibra de carbono.

A matriz polimérica pode pertencer a um dos dois grupos:

- Termoplásticos;
- Termoendurecíveis.

As resinas termoplásticas têm na sua constituição molecular, ligações fracas com pontes de hidrogénio, não possuindo as ligações covalentes. Após a polimerização, possuem moléculas predominantemente lineares, o que permite uma alta variabilidade e instabilidade do seu estado físico com variação de temperatura. São exemplos de um termoplástico, o polipropileno, a poliamida, o polietileno, o polibutileno e o PVC (policloreto de vinila). Pela sua característica

polimérica, as resinas termoplásticas permitem a reciclagem e reutilização das mesmas, pelo facto destas não cristalizarem numa estrutura definitiva.

Um das características mais importantes das resinas é a temperatura de transição vítrea (T_g), que consiste na temperatura limite que proporciona a passagem de um estado vítreo e frágil para um estado sólido elástico e dúctil (Marques, 1982).

A capacidade, das resinas termoplásticas, de transformar o seu estado físico com temperaturas reduzidas (quando comparadas com outras resinas), é uma desvantagem no que diz respeito à sua utilização no reforço estrutural, pois detém uma temperatura de transição vítrea (T_g) reduzida, provocando instabilidade e insegurança ao sistema de reforço. Pode entender-se a cadeia de um polímero termoplástico pela sequência da figura 8:

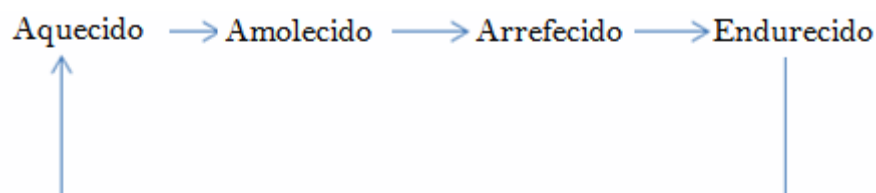


Figura 8 - Cadeia de polímero termoplástico

As resinas termoendurecíveis, ao contrário das resinas termoplásticas, através do seu processo químico de polimerização, têm na sua composição química ligações moleculares covalentes, que lhes garante uma estrutura quimicamente resistente. São exemplos de resinas termoendurecíveis as de poliéster, de viniléster, epóxicas e fenólicas. Devido à sua resistência química, estas resinas não podem ser recicladas e/ou reutilizadas. São caracterizadas pela sua baixa viscosidade, o que permite uma boa capacidade de impregnação nos elementos onde é aplicada. A sua temperatura de transição vítrea (T_g) é bastante superior à das resinas termoplásticas, o que faz deste tipo de resina uma preferência para o reforço estrutural com compósito de fibra no sistema EBR (Externally Bonded Reinforcement).

Geralmente, a matriz polimérica de um sistema compósito de reforço estrutural pertence ao grupo das matrizes termoendurecíveis. A grande diferença com a matriz termoplástica, é que, por ser termoendurecível, se torna num produto termicamente estável, enquanto que uma matriz termoplástica se torna num produto plástico quando aquecido e num produto rígido quando arrefecido, não transferindo estabilidade ao sistema face a variações térmicas. Uma resina com temperatura de transição vítrea (T_g) baixa, apresenta também baixa ductilidade, o que para uma resina de colagem para reforço estrutural não é, naturalmente, tomado como uma vantagem, sendo que são necessárias tensões menores para atingir a rotura, em relação a uma resina com

elevada ductilidade, além de que um material com comportamento frágil atinge a tensão de rotura de forma imprevisível.

O uso de uma matriz termoendurecível permite adquirir no sistema as seguintes vantagens:

- Maior resistência aos agentes químicos pelo seu processo de produção;
- Reduzida fluência e perda de tensões por relaxação;
- Estabilidade face a ações térmicas variáveis;
- Baixa viscosidade que facilita a impregnação nas fibras.

Em suma, a matriz polimérica assume um papel fundamental na constituição do sistema, sendo que tem que garantir as seguintes funções:

- Aglutinação das fibras;
- Proteção das fibras de abrasão e de agressões ambientais;
- Transferência de tensões para as fibras;
- Compatibilidade química, térmica e mecânica com as fibras;
- Impedir deslocamentos horizontais e transversais das fibras;
- Resistência à encurvadura das fibras quando solicitadas a esforços de compressão.

Na figura 9 pode verificar-se a constituição de uma matriz polimérica de fibra de carbono, através de uma ampliação microscópica e de uma figura ilustrativa.

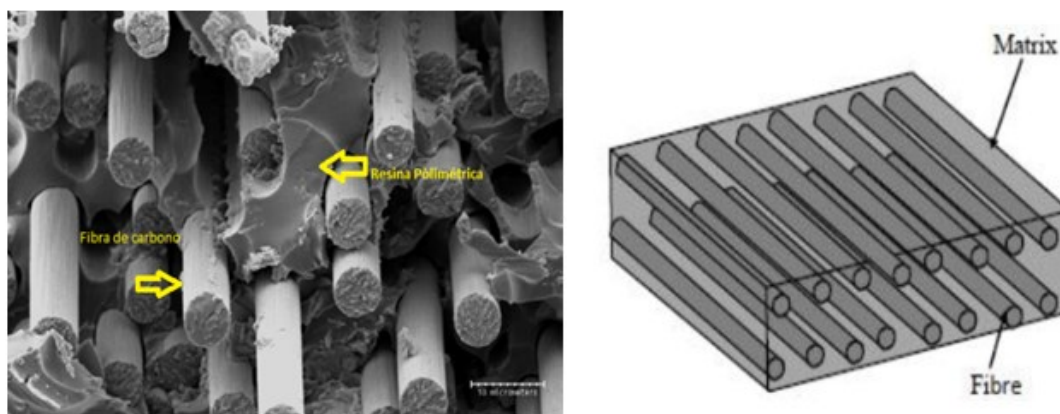


Figura 9 - Matriz polimérica por ampliação microscópica e esquemática

[Fonte: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAABouwAK/materiais-compositos-com-matriz-ceramica> (consulta atualizada a 04-09-2014); Documentos da disciplina de Inspeção e Reforço de Estruturas(ISEP); Rodrigues, Carlos (2013)]

Conforme referido, as resinas termoendurecíveis são de uso mais comum no âmbito da construção devido às suas características físicas e químicas. A tabela 1 permite a comparação dos valores médios das características mecânicas entre as diferentes resinas termoendurecíveis.

As resinas epóxicas, inseridas no grupo das termoendurecíveis, estão associadas à fibra de carbono para o compósito de reforço de FRP. O compósito de FRP com fibra de carbono colado com resina epóxi, geralmente é utilizado quando se pretende garantir elevada resistência à flexão e tração, estabilidade térmica da resina e boas características de deformação para assumir um comportamento compatível ao da fibra.

Tabela 1 - Propriedades básicas de resinas termoendurecíveis

Propriedade	Unidades	Poliéster	Epóxicas	Viniléster	Fenólica
Resistência à tração	MPa	20 - 100	55 - 130	68 - 90	30 - 50
Módulo de Elasticidade	GPa	2.0 - 4.1	2.0 - 4.1	3.5 - 5.2	3.6
Extensão na rotura	%	1.0 - 5.0	1.0 - 8.0	3.0 - 4.0	1.8 - 2.5
Massa volúmica	g/cm ³	1.20 - 1.30	1.20 - 1.30	1.12 - 1.16	1.00 - 1.25
Temperatura de transição vítrea	°C	55 - 120	50 - 270	102 - 280	220 - 250

As resinas epóxicas, além das suas características resistentes, apresentam também baixa retração térmica, que garante estabilidade geométrica ao sistema de reforço. Naturalmente, a resina de epóxi apresenta custos relativamente mais elevados que as restantes, no entanto, permite suprir com segurança e durabilidade um sistema de reforço estrutural.

3.4 FIBRAS

Na construção, e principalmente no que diz respeito ao reforço de estruturas, podem encontrar-se soluções com três tipos de fibras, sendo elas a fibra de carbono (C - Carbon), a fibra de vidro (G - Glass) e a fibra de aramida (A - Aramid).

As fibras são o principal elemento de um FRP (Fiber Reinforced Polymer), constituindo a maior percentagem do compósito, partilhada com a resina que permite a ligação da fibra com o betão e a mobilização de tensões quando o material compósito é solicitado, fazendo com que as tensões que são transmitidas ao betão sejam absorvidas pelo compósito. O funcionamento mecânico das fibras é semelhante ao dos varões de aço numa estrutura de betão armado. Quando a carga é aplicada numa estrutura, o primeiro elemento a ser solicitado é o betão, posteriormente a armadura interna (varões de aço) e finalmente as fibras do compósito. O diagrama de tensões, em análise de

equilíbrio interno de forças, mostra que as fibras funcionam a uma tensão de tração, na mesma direção que os varões de aço, contrariando a ação de compressão exercida sobre o betão. Este assunto será abordado no capítulo 5, dedicado à análise de dimensionamento.

As fibras permitem uma extensão, combinada com uma elevada resistência à tração, que permite que o elemento estrutural não perca ductilidade, absorvendo contudo as tensões com extensões limitadas variando em função da regulamentação utilizada. Note-se que um uso excessivo de fibra poderá diminuir a ductilidade do elemento, a ponto de o converter em elemento frágil, pelo que se devem respeitar os limites para transmissão de tensões (Bulletin 14 *fib*:01, 2001).

Os três tipos de fibras apresentam características diversas entre si, conforme se pode verificar na figura 10.

Material	Elastic modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Ultimate tensile strain (%)
Carbon			
High strength	215-235	3500-4800	1.4-2.0
Ultra high strength	215-235	3500-6000	1.5-2.3
High modulus	350-500	2500-3100	0.5-0.9
Ultra high modulus	500-700	2100-2400	0.2-0.4
Glass			
E	70	1900-3000	3.0-4.5
S	85-90	3500-4800	4.5-5.5
Aramid			
Low modulus	70-80	3500-4100	4.3-5.0
High modulus	115-130	3500-4000	2.5-3.5

Figura 10 - Características básicas das principais fibras de reforço

[Fonte: Bulletin 14 *fib*:2001: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures]

A fibra de carbono é a que apresenta melhores características mecânicas para reforço estrutural sendo, por este motivo, o tipo de fibra mais aconselhável para reforço estrutural (Carvalho, 2011). É comum encontrar reforço estrutural com utilização de fibra de vidro, uma vez que é mais económica que as restantes, no entanto apresenta valores de módulos de elasticidade bastante inferiores ao da fibra de carbono e elevados valores de deformação máxima. Note-se que quanto maior o módulo de elasticidade da fibra (E), menor é a sua extensão máxima (ϵ).

A relação pode ser entendida pela expressão genérica do cálculo de tensão:

$$\sigma = E \times \varepsilon$$

Poder-se-ia, inicialmente, interpretar que uma fibra com maior capacidade de extensão seria a melhor solução para um reforço, mas se uma fibra permitisse uma grande capacidade de extensão não estaria a contrariar as ações para as quais foi dimensionada, provocando fendilhação no betão antes do compósito de fibra de carbono ser solicitado.

Conclui-se portanto, que uma fibra adequada para reforço é aquela que apresenta uma capacidade elevada de tensão e apresenta uma extensão reduzida ao mesmo tempo. Note-se também, que uma fibra com elevado módulo de elasticidade é uma fibra com rigidez elevada, pelo que pode ocorrer rotura frágil quando solicitada a elevadas tensões.

A fibra de vidro (compósito GFRP – Glass Fiber Reinforced Polymer), pode apresentar várias categorias. Existem quatro categorias comuns de fibra de vidro com as designações E, S, AR, C. Todas elas apresentam valor de módulo de elasticidade semelhante, e diferenciam-se pelo valor de resistência mecânica, resistência à corrosão e a diversos químicos. Como consta no quadro comparativo da figura 10, estando apenas fibras de vidro tipo E e tipo S, a fibra de vidro apresenta valores muito reduzidos de módulo de elasticidade, quando comparados com as restantes fibras.

A fibra de aramida (compósito AFRP –Aramid Fiber Reinforced Polymer), apresenta um módulo de elasticidade considerável quando comparado com a fibra de vidro. A sua desvantagem prende-se com a dificuldade da sua fabricação e nos custos inerentes à mesma. O custo elevado de mercado fez com esta fibra de reforço não contemplasse a grande maioria dos reforços estruturais.

Na figura 11, pode verificar-se a relação tensão/deformação dos três compósitos resultantes das fibras referidas anteriormente, sendo:

- PRFC (CFRP) – Polímero Reforçado com Fibra de Carbono;
- PRFA (AFRP) – Polímero Reforçado com Fibra de Aramida;
- PRFV (GFRP) – Polímero Reforçado com Fibra de Vidro.

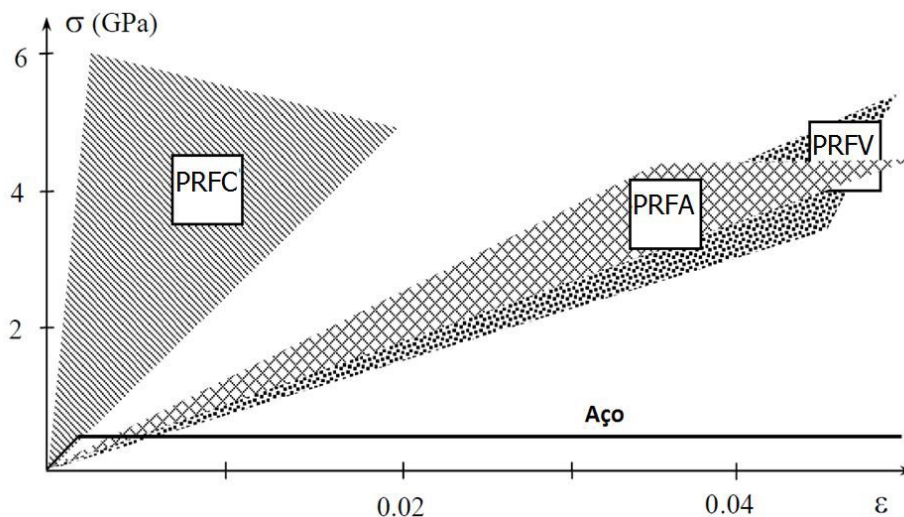


Figura 11 - Diagrama tensão-deformação das fibras e do aço

[Fonte: Bulletin 14 *fib*:2001: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures]

Os intervalos de valores que se obtêm através da interpretação da figura 11, são os considerados pela *fib* - (Fédération Internationale du Béton) no seu documento de dimensionamento para reforço externo de elementos de betão armado (Bulletin 14 *fib*:01). Como são baseados em ensaios laboratoriais, podem encontrar-se ligeiras diferenças nos intervalos da figura 10, em função do tipo e da qualidade da fibra ensaiada.

Pela observação, pode concluir-se que as fibras de reforço apresentam um comportamento linear até à rotura, necessitando de tensões consideravelmente superiores às do aço para atingir a rotura. Dos três tipos de fibras, a fibra de vidro é a que apresenta maiores valores de extensão. Este facto não agrega mais valor à fibra de vidro em relação às restantes, uma vez que existem extensões máximas a ser consideradas no reforço estrutural por questões de ductilidade, conforme já foi referido anteriormente.

O elevado módulo de elasticidade das fibras de carbono permite que as mesmas absorvam tensões elevadas com extensão reduzida (comportamento com tendência rígida), fator este que se apresenta como uma grande vantagem para contrariar as cargas exercidas na estrutura de betão, desde que não sejam ultrapassados os valores máximos de tensão de tração, sob o risco de ocorrer rotura frágil.

É de salientar que o risco de rotura frágil na fibra de carbono é predominante no sistema laminado (lâminas), uma vez que o sistema de manta de fibra de carbono (tecido impregnado), apesar de ter um elevado módulo de elasticidade e uma capacidade de deformação elevada, apresenta um valor

de resistência à tração bastante superior às lâminas. A distinção entre laminado e tecido de fibra de carbono será abordada no capítulo 4 do presente texto.

Independentemente da diferença entre tecido ou laminado, as fibras têm um comportamento linear até à rotura, apresentam um comportamento perfeitamente elástico, sem patamar de tensão de cedência e deformação plástica. Desta análise, conclui-se a necessidade de avaliar a capacidade resistente do compósito para minimizar ao máximo o risco de rotura frágil iminente.

3.5 FIBRA DE CARBONO

A fibra de carbono é um compósito filamentosos, que resulta de um tratamento térmico de materiais orgânicos ricos em carbono, como a seda celulósica de *Rayon* (fabricada a partir da polpa da madeira ou do línter do algodão), o poliácrlonitrilo ou o alcatrão de hulha. O derivado mais comum é o poliácrlonitrilo, pelas suas características, resultados as fibras PAN (Carvalho, 2011).

O tratamento térmico controlado, designado também por pirólise, permite a obtenção de uma gama de fibras de carbono variável nas suas propriedades mecânicas. Se o processo variar entre os 1000°C e os 1500°C considera-se que se produzem fibras de carbono e se o processo atingir temperaturas até os 3000°C considera-se que existe produção de grafite. No entanto, este preciosismo é desprezado e genericamente considera-se toda a gama como fibra de carbono, que se organiza em classes em função do seu módulo de elasticidade (Lebrão, 2008). Existem as fibras de *high strength* (resistência elevada), *ultra high strength* (resistência ultra elevada), *high modulus* (módulo de elasticidade elevado) e *ultra high modulus* (módulo de elasticidade ultra elevado).

Em termos de fabrico, a fibra em laminado é considerada um compósito, no entanto em contexto de reforço estrutural, o material “fibra” é entendido como uma “matéria-prima” e o compósito é a junção da fibra com a resina de colagem, como será referido mais pormenorizadamente nos pontos 4.2.1 e 4.2.2.

A aplicabilidade da fibra de carbono na construção é diversa, podendo ser usada em estruturas sujeitas a grandes esforços, sejam elas comerciais, residenciais, pontes, reservatórios, etc. Aquando do aparecimento do reforço com fibra de carbono, dir-se-ia que a aplicação não era vantajosa na relação custo/benefício. Atualmente, o custo de aplicação de fibra de carbono, em reforço estrutural, representa 25% do valor que era praticado na fase inicial do aparecimento desta solução estrutural. (Fonte: Sika, Engenheiro Michel Haddad)

Os fios de carbono são manipulados no seu fabrico, podendo ser fabricados tecidos unidirecionais ou bidirecionais ou lâminas de carbono. E, geralmente, são aplicados com auxílio de adesivos epoxídicos ou vulgarmente designados por resinas epoxídicas.

A aplicação de um reforço com compósito de fibra de carbono apresenta as seguintes características (Bulletin 14, *fib*:01, 2001):

- Elevada resistência mecânica;
- Boa rigidez;
- Bom comportamento à fadiga e à atuação de cargas cíclicas;
- Elevada resistência a ataques químicos;
- Não são afetados pela corrosão por se tratar de um produto inerte;
- Extrema leveza devido ao baixo peso específico do sistema.

O comportamento mecânico da fibra de carbono, após a aplicação do adesivo de polimerização ou adesivo de colagem, no caso de manta de fibra de carbono, é analisado pelo conjunto compósito e depende do estado de tensão-deformação da fibra-matriz, das frações volumétricas das fases, da direção e do valor da carga aplicada. Considerando um comportamento de fibra frágil e matriz dúctil, quando é aplicada a tensão numa primeira fase, a matriz e a fibra deformam-se elasticamente. Numa segunda fase de deformação, a matriz deforma-se plasticamente e a fibra continua a sua deformação elástica (Filho et al., 2009).

No que diz respeito à distribuição de tensões de tração, a matriz polimérica tem obrigatoriamente de possuir uma capacidade de alongamento de rotura maior que o alongamento de rotura que ocorre na fibra de carbono, para que a mesma continue a possuir capacidade de carga mesmo após a fibra atingir a sua tensão de rotura, impedindo a rotura frágil da estrutura. Para que isso aconteça, os dois elementos do compósito devem trabalhar segundo dois critérios de rotura distintos. A fibra de carbono deverá ser solicitada segundo o critério de rotura frágil e a matriz polimérica segundo o critério de rotura dúctil. Conforme se pode verificar na figura 12, a matriz segundo o critério dúctil apresenta um alongamento bastante superior ao da fibra, enquanto que a matriz, segundo o critério frágil, apresenta um alongamento quase 50% inferior ao alongamento da fibra (Machado).

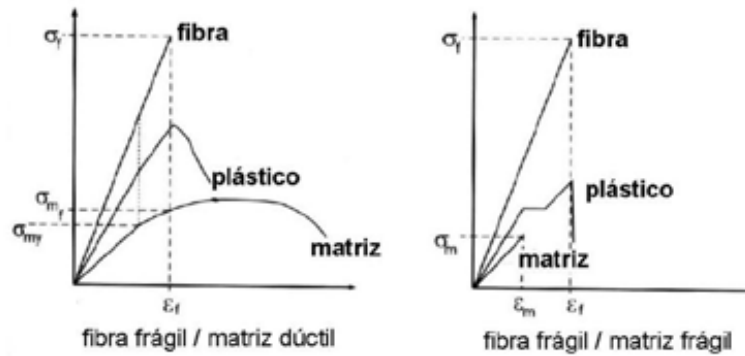


Figura 12 - Gráfico do comportamento de matriz dúctil e frágil

[Fonte: Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono; Machado, Ari de Paula]

3.6 ADESIVOS

A seleção de um sistema de FRP inclui, para além do compósito de FRP, a definição correta do agente responsável pela sua colagem aos elementos a reforçar, designado por adesivo ou cola Juvandes (2002).

O adesivo permite a interface entre a fibra e a superfície do elemento, tendo um papel fundamental na transmissão de tensões do betão para a fibra. O adesivo ou resina, normalmente é utilizado em sistemas de reforço estrutural colado exteriormente, podendo ser utilizado em outras técnicas.

A título de informação adicional, existe também o sistema de reforço estrutural com barras de carbono inseridas na zona de recobrimento de armaduras. Esta técnica tem a designação universal de NSM (Near Surface Mounted), em que a fixação no interior do recobrimento pode ser feita com adesivo para melhorar a sua eficiência. A técnica abordada neste trabalho é a de reforço por colagem exterior (EBR - Externally Bonded Reinforcement), por ser do âmbito de aplicação da Sika Brasil.

No sistema EBR, é de toda a importância garantir a qualidade do adesivo utilizado para a fixação da fibra de carbono, seja ele através de lâminas de carbono ou de tecido de fibra de carbono. Deve inclusive, debruçar-se com a mesma importância sobre as características da fibra de carbono e as características do adesivo, pois dele depende a boa transferência de carga por aderência, não se podendo negligenciar a sua importância. A capacidade resistente que o adesivo tem de fixar a fibra de carbono no elemento de betão é a que garante a funcionalidade do sistema, garantindo ou não que a fibra não inicia o seu descolamento a tensões não previstas.

Em projeto devem ser previstas as condições de aderência do adesivo no sentido da sua otimização e prevenção de destacamento da matriz polimérica. Habitualmente, faz-se um teste de arrancamento do adesivo (*pull-out*), sendo que a situação ótima é o destacamento da matriz polimérica com a superfície de betão, habitualmente designada por falha no betão. A tensão de aderência do agente de colagem é determinada de acordo com a EN 12188:1999 (CEN 1999 b), devendo ser superior a 15N/mm^2 a 20°C (Bulletin 14 *fib*:01, 2001).

A resistência do adesivo ao corte deve ser superior a 12 N/mm^2 a 20°C , podendo ser determinada de acordo com a EN 12188:1999 (CEN 1999 b) (Bulletin 14 *fib*:01, 2001).

Em termos de escolha do adesivo, conforme já mencionado, podem encontrar-se no mercado adesivos epóxi, poliéster, vinil ou fenólicos, sendo estes últimos não muito comuns. Geralmente, é utilizado o adesivo epóxido por ter melhores propriedades mecânicas, excelente durabilidade, boa capacidade de cura à temperatura ambiente. Apesar do seu custo ser significativamente maior que os outros adesivos, possui maior resistência à tração, boa estabilidade dimensional, boas propriedades a altas temperaturas e uma forte resistência aos produtos químicos, com exceção dos ácidos.

As principais vantagens de um adesivo epóxi são:

- Boas propriedades de impregnação para várias bases;
- Cura com elevada coesão;
- Baixa retração em comparação com poliésteres, acrílicos e vinis;
- Baixa fluência;
- Pode ser feito com características tixotrópicas para aplicação em superfícies verticais;
- Capacidade para acomodar superfícies de colagem irregulares.



Figura 13 - Embalagem resina epóxi para lâminas (Sikadur 30 - componente A + B)

[Fonte: <http://www.batimatghana.com/?q=productdisplay/sikadur-30> - consulta atualizada em 04-09-2014]



Figura 14 - Embalagem de resina epóxi para tecidos (Sikadur 330 - componente A + B)

[Fonte: <http://www.doradiceramic.ro/construction/consolidari-structurale/sikadur-330> - consulta atualizada em 04-09-2014]

No sistema laminado, a resina para produção do laminado é diferente do adesivo utilizado para fixar as lâminas na superfície (figura 13). Nos sistemas curados *in situ*, a resina de impregnação é o próprio agente de colagem na superfície (figura 14), podendo a fibra ser impregnada antes ou após da sua colocação na superfície de betão.

As principais características de um adesivo epóxico não endurecido consistem na viscosidade, no tempo de utilização, no tempo de cura, na toxicidade e no endurecimento em contacto com a humidade ou água (Ribeiro,1996).

Num adesivo, é fundamental ter em consideração o tempo de utilização e o tempo de contacto, que devem constar na ficha técnica de produto.

O tempo de utilização (Pot Life), é o intervalo de tempo, após a mistura entre a resina base e endurecedor, durante o qual o adesivo permanece no estado líquido e pode ser aplicado sem dificuldade. Após ultrapassar o tempo de utilização, o adesivo perde as suas características de aderência, pelo que não se deve ultrapassar o Pot Life estipulado para o produto (Juvandes, 2002).

O tempo de contacto (Open Time), é o intervalo de tempo, após a aplicação na superfície, em que o adesivo inicia o seu processo de endurecimento até que fica impedido de se efetuar a colagem da fibra. A aplicação do adesivo na superfície e a aplicação da fibra deve ser compreendida no intervalo de tempo de contacto para garantir as características de aderência desejáveis (Juvandes, 2002).

O sucesso do adesivo depende da correta preparação e aplicação da mistura, tendo como referência as especificações do fornecedor. Por ser um componente de grande importância no sistema colado de reforço através de fibra de carbono, as respetivas fichas técnicas de produto devem ser o mais completas possível para minimizar erros de aplicação ou erros de escolha do material em função de informações pouco claras. Por este motivo, as informações técnicas que devem constar numa ficha técnica são as seguintes:

- Densidade;
- Extrusão;
- Viscosidade;
- Espessura máxima para camada;
- Retração pelo efeito de calor;
- Temperatura de transição vítrea;
- Temperatura de aplicação;
- Temperatura de serviço;
- Resistência à compressão;
- Resistência à tração;
- Resistência ao corte;
- Capacidade de aderência;
- Módulo de elasticidade (na compressão);
- Módulo de elasticidade (na tração);
- Pot Life;
- Consumo;
- Tempo de espera entre camadas.

No mercado, quando se refere a adesivo, entende-se pelo conjunto de dois componentes, que são a resina base e o endurecedor. O endurecedor é aplicado sobre a resina base e é misturado com uma misturadora de baixa rotação (cerca de 300 rpm) durante o tempo especificado pelo fabricante. É a partir da mistura entre os dois componentes que se inicia a contagem do Pot Life do adesivo.

Seja o adesivo aplicado num sistema pré-fabricado ou num sistema *in situ*, a polimerização do epóxido (fase de endurecimento) é traduzida pela reação química entre o oxigénio da resina e o hidrogénio das aminas no endurecedor. O endurecimento dá-se perfeitamente se forem cumpridas as condições ideais de tempo de aplicação, temperatura ambiente e humidade (Juvandes, 2002).

Uma vez que o adesivo passa do seu estado líquido para o estado sólido (ou endurecido), o adesivo deve atender a determinadas características essenciais, como a resistência mecânica (tração, flexão e compressão), aderência às superfícies do betão e da fibra, retração térmica durante a cura, módulo de elasticidade, extensão na rotura, coeficiente de dilatação térmica, resistência química, resistência à temperatura e comportamento a longo prazo.

4 Aplicação de compósitos de fibra de carbono

4.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS BÁSICAS DOS FRP'S

Conforme referido anteriormente, os compósitos de fibra não possuem propriedades independentes dos seus constituintes, pelo que se deverão estabelecer as características do compósito com base nas seguintes expressões:

$$E_f = E_{fib} \times V_{fib} + E_m \times V_m \text{ (Bulletin 14 fib:01, 2001)}$$

$$f_f \approx f_{fib} \times V_{fib} + f_m \times V_m \text{ (Bulletin 14 fib:01, 2001)}$$

onde,

E_f – módulo de elasticidade do compósito na direção das fibras;

E_{fib} – Módulo de elasticidade da fibra;

E_m – Módulo de elasticidade da matriz;

V_{fib} – Percentagem de fibra;

V_m – Percentagem de matriz;

f_f – Tensão de tração do compósito;

f_{fib} – Tensão de tração da fibra;

f_m – Tensão de tração da matriz.

Desta forma, obtém-se um valor de módulo de elasticidade e tensão de tração homogeneizado, correspondendo a um valor realista para base de cálculo de dimensionamento.

Como exemplo, expõe-se no Bulletin 14 fib:01 (2001) a figura 15 que permite a verificação da influência da variação de quantidades, de fibra e adesivo, no módulo de elasticidade do compósito (E_f) e na tensão de tração do compósito (f_f):

Chosen properties for constituent materials of FRP composite:								
$E_{fib}=220$ GPa			$f_{fib} = 4000$ MPa					
$E_m = 3$ GPa			$f_m = 80$ MPa					
Cross-sectional area			FRP-properties				Failure load	
A_{fib} (mm ²)	A_m (mm ²)	A_f^* (mm ²)	V_{fib} (%)	E_f [eq. (2-1)] (MPa)	f_f [eq. (2-2)] (MPa)	Ultimate strain (%)	(kN)	(%)
70	0	70	100	220000	4000	1.818	280.0	100.0
70	30	100	70	154900	2824	1.823	282.4	100.9
70	70	140	50	111500	2040	1.830	285.6	102.0

* In case of a strip with a width of 100 mm dividing this value by 100 mm gives the thickness of the strip (resp. 0.7 mm, 1.0 mm and 1.4 mm).

Figura 15 - Variação de volume de elementos de um compósito e respetiva influência

[Fonte: Bulletin 14, *fib*:2001: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures]

Nota: Nos exemplos que se seguem, a quantidade de fibra de carbono e de adesivo é medida pela secção transversal reta da lâmina, sendo que nas expressões utilizadas os valores de V_{fib} e V_m representam a percentagem de quantidade de fibra e adesivo, respetivamente.

Seguindo as expressões anteriores:

Para o 1º exemplo:

$$A_{fib} = 70 \text{ mm}^2 ; A_m = 0 \text{ mm}^2 ; A_f = 70 \text{ mm}^2$$

$$V_{fib} = 100 \% \text{ e } V_m = 0 \%$$

$$E_f = E_{fib} \times V_{fib} + E_m \times V_m \leftrightarrow E_f = 220 \times 10^3 \times 100 + 3 \times 10^3 \times 0 = 220\,000 \text{ MPa}$$

$$f_f \approx f_{fib} \times V_{fib} + f_m \times V_m \leftrightarrow f_f = 4000 \times 100 + 80 \times 0 = 4000 \text{ MPa}$$

Cálculo teórico de extensão pela lei de Hooke:

$$\sigma = E \times \varepsilon \leftrightarrow 4000 = 220000 \times \varepsilon \leftrightarrow \varepsilon = 1.82 \%$$

Para o 2º exemplo:

$$A_{fib} = 70 \text{ mm}^2 ; A_m = 30 \text{ mm}^2 ; A_f = 100 \text{ mm}^2$$

$$V_{fib} = 70 \% \text{ e } V_m = 30 \%$$

$$E_f = E_{fib} \times V_{fib} + E_m \times V_m \leftrightarrow E_f = 220 \times 10^3 \times 70 + 3 \times 10^3 \times 30 = 154\,900 \text{ MPa}$$

$$f_f \approx f_{fib} \times V_{fib} + f_m \times V_m \leftrightarrow f_f = 4000 \times 70 + 80 \times 30 = 2824 \text{ MPa}$$

Cálculo teórico de extensão pela lei de Hooke:

$$\sigma = E \times \varepsilon \leftrightarrow 2824 = 154900 \times \varepsilon \leftrightarrow \varepsilon = 1.82 \%$$

Para o 3º exemplo:

$$A_{fib} = 70 \text{ mm}^2 ; A_m = 70 \text{ mm}^2 ; A_f = 140 \text{ mm}^2$$

$$V_{fib} = 50 \% \text{ e } V_m = 50 \%$$

$$E_f = E_{fib} \times V_{fib} + E_m \times V_m \leftrightarrow E_f = 220 \times 10^3 \times 50 + 3 \times 10^3 \times 50 = 111\,500 \text{ MPa}$$

$$f_f \approx f_{fib} \times V_{fib} + f_m \times V_m \leftrightarrow f_f = 4000 \times 50 + 80 \times 50 = 2040 \text{ MPa}$$

Cálculo teórico de extensão pela lei de Hooke:

$$\sigma = E \times \varepsilon \leftrightarrow 2040 = 111500 \times \varepsilon \leftrightarrow \varepsilon = 1.83 \%$$

Fazendo uma breve análise aos exemplos, nota-se que o aumento da percentagem de matriz (necessariamente aumento de adesivo), sendo que a área de fibra é constante, diminui o módulo de elasticidade e a tensão de tração do sistema compósito. Apesar desta diminuição verificam-se pequenas subidas na extensão máxima e carga de rotura, mas tal facto deve-se ao aumento da quantidade de adesivo para uma mesma quantidade de fibra de carbono. Não significa, portanto, que o aumento percentual de adesivo melhora as características mecânicas do compósito pelas suas características, mas sim devido a um aumento de secção transversal do laminado.

Do conceito geral de tensão, para a força aplicada numa determinada área, tem-se:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Tendo como base o módulo de elasticidade resultante das expressões acima demonstradas e o aumento de secção devido ao aumento de adesivo, demonstra-se o cálculo teórico da força de rotura para os três exemplos.

Para o 1º exemplo: $\sigma = 4000 \text{ MPa}$ e $A = 70 \text{ mm}^2$

$$\sigma = \frac{F}{A} \leftrightarrow 4000 \times 10^{-3} = \frac{F}{70} \leftrightarrow F = 280,00 \text{ kN}$$

Para o 2º exemplo: $\sigma = 2824 \text{ MPa}$ e $A = 100 \text{ mm}^2$

$$\sigma = \frac{F}{A} \leftrightarrow 2824 \times 10^{-3} = \frac{F}{100} \leftrightarrow F = 282,40 \text{ kN}$$

Para o 3º exemplo: $\sigma = 2040 \text{ MPa}$ e $A = 140 \text{ mm}^2$

$$\sigma = \frac{F}{A} \leftrightarrow 2040 \times 10^{-3} = \frac{F}{140} \leftrightarrow F = 285,60 \text{ kN}$$

O gráfico da figura 16, extraído do documento Bulletin 14, *fib:01* (2001), demonstra a relação de tensão/deformação de um mesmo compósito com diferentes volumes de fibra e diferentes espessuras. O aumento de espessura deve-se ao aumento de adesivo para formação da matriz do laminado.

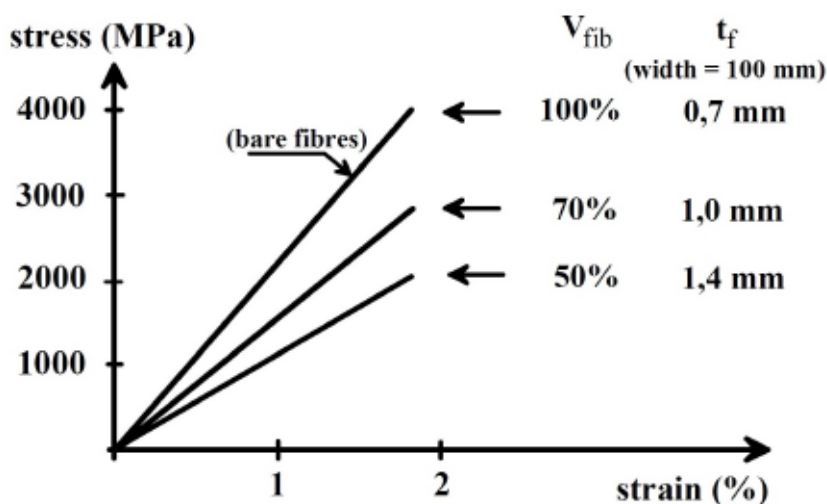


Figura 16 - Gráfico de tensão-deformação para várias percentagens de fibra e espessura

[Fonte: Bulletin 14, *fib:2001*: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures]

O gráfico permite confirmar os dados no quadro de exemplo. Como se pode constatar, a diminuição de percentagem de fibra, ou seja, aumento de matriz epóxi, resulta numa necessidade de tensão inferior para uma mesma deformação elástica. Conclui-se, portanto, que a junção da fibra com o adesivo diminui a capacidade resistente da própria fibra, pelo que deverá ser um fator a ter em conta, em qualquer ponderação de dimensionamento.

O módulo de elasticidade de um adesivo é bastante inferior ao módulo de elasticidade da fibra, conforme foi possível verificar nos exemplos citados do Bulletin 14 *fib*:01 (2001). Apresentando, também, valores de extensão bastante reduzidos, tendo o adesivo um comportamento de rotura frágil por si só, mas quando adicionado à fibra, a matriz polimérica resultante tem um comportamento dúctil pelo aumento de extensão verificada nos exemplos.

4.2 SOLUÇÕES DE FIBRA DE CARBONO PARA COLAGEM EXTERIOR

Existem múltiplas soluções nas quais a fibra de carbono é apresentada no mercado para reforço estrutural. Pode encontrar-se fibra de carbono sob formato de tecido/manta, lâminas retangulares com diferentes secções geométricas, barras circulares com diferentes diâmetros.

A escolha do tipo de solução dependerá do tipo de reforço e da viabilidade da sua aplicação. No caso do reforço estrutural com compósitos de fibra de carbono colado exteriormente (EBR), são usados os tecidos de fibra de carbono (unidirecional (1D), bi-direcional (2D) ou multi-direcional (3D)) ou as lâminas de fibra de carbono (assumindo diferentes dimensões em função do reforço).

A aplicação de tecidos de fibra de carbono constitui o sistema de reforço *in situ* e a aplicação de laminado de fibra de carbono constitui o sistema de reforço pré-fabricado, como será referido nos pontos 4.2.1 e 4.2.2.

4.2.1 MANTA/TECIDO DE FIBRA DE CARBONO

Os tecidos/mantas de fibra de carbono (figura 17) constituem grande parte das soluções de fibra de carbono em reforço estrutural no Brasil. São considerados quando se pretende reforçar um elemento à flexão, ao corte ou por encamisamento. O uso desta solução permite contemplar múltiplos cenários que não poderiam ser admitidos com soluções como aumento de secção de betão, chapas metálicas ou até mesmo lâminas de fibra de carbono. Sendo o tecido uma peça maleável e adaptável no que concerne às suas características geométricas, pode ser utilizado no reforço de lajes, vigas, pilares, chaminés, silos, paredes, reservatórios, entre outros.



Figura 17 - Tecido de fibra de carbono unidirecional

[Fonte: <http://www.aviacao.org/article/materias-compositos/3/> - consulta atualizada em 04-09-2014]

O sistema de aplicação de tecidos de fibra de carbono é o sistema curado *in situ*. Consiste na aplicação de mantas/tecidos em estado seco ou pré-impregnado, sobre uma primeira camada de adesivo colocado na superfície a reforçar. A polimerização do conjunto compósito é feita no momento de aplicação do reforço, isto é, este sistema só é considerado compósito aquando do endurecimento do adesivo na estrutura (Azevedo, 2008).

O resultado final da mistura entre a fibra e o adesivo endurecido forma o compósito de fibra de carbono, com espessura muito difícil de determinar, rondando valores decimais de milímetros na grande maioria dos casos, pelo que em termos de dimensionamento é considerada a espessura do tecido (Bulletin 14.fib:01, 2001).

As mantas/tecidos de fios de carbono têm variações significativas nas propriedades mecânicas, pois dependem do modo de aplicação, na direção e comprimento dos fios de carbono e até mesmo das propriedades mecânicas do adesivo de colagem. Sendo então importante fazer notar que, muitas vezes, as características mecânicas efetivas do reforço CFRP (da literatura internacional *Carbon Fiber Reinforced Polymer*) são omitidas pelo fabricante, dando-se ênfase às características isoladas da fibra de carbono. Esta omissão tem provocado algumas conclusões exageradas das características mecânicas dos compósitos, em que se afirma prematuramente que determinados compósitos proporcionam valores de resistência à tração, módulos de elasticidade, deformação de rotura bastante superiores aos que efetivamente se verificam em laboratório e na prática. No que diz respeito à análise das características técnicas de um tecido de fibra de carbono, deve considerar-se, como já referido, o efeito negativo que o adesivo provoca no mesmo. Assim sendo, não faz sentido fazer-se uma análise isolada do tecido, mas sim num conjunto tecido mais adesivo (Tarso, 2005).

O produto SikaWrap 300 C é um exemplo de uma manta de fibra de carbono, unidirecional que permite a realização de reforço com o sistema *in situ*. A ficha técnica deste produto considera a

influência negativa do adesivo nas características mecânicas da fibra, onde consta o valor de resistência à tração de 4000 MPa para fibra seca e o valor de resistência à tração mínimo de 3200 MPa, para a fibra impregnada com adesivo da mesma gama. Considera-se uma perda de 20% de resistência à tração com a aplicação de adesivo, que num reforço estrutural é um dado representativo e importante.

No capítulo 7 será aprofundada a comparação dos líderes de mercado brasileiro e as informações técnicas fornecidas pelos mesmos.

Nas fichas técnicas deverá ser colocada toda a informação vital para assegurar a boa funcionalidade de um sistema de reforço por fibra de carbono. Os dados que se consideram relevantes num tecido de fibra de carbono são os seguintes:

- Direção dos fios de carbono;
- Gramagem;
- Espessura do tecido;
- Densidade;
- Resistência à tração (fibra seca);
- Módulo de Elasticidade (fibra seca);
- Alongamento (fibra seca);
- Módulo de elasticidade (fibra impregnada com adesivo);
- Resistência à tração (fibra impregnada com adesivo);
- Consumo estimado de adesivo para o tecido.

Com as informações mencionadas anteriormente, pode fazer-se uma verdadeira análise das características do produto de uma forma global e coerente.

Geralmente, existe um adesivo específico para determinado tipo de tecido, pelo que também se deverá ter fácil acesso ao adesivo correspondente, assim como às especificações técnicas do mesmo.

4.2.2 LÂMINAS DE FIBRA DE CARBONO

As lâminas de fibra de carbono (figuras 18 e 19) podem ser usadas na colagem exterior para reforço, no entanto têm uma maior limitação no seu âmbito de aplicação. A sua flexibilidade é limitada pelo que não é conveniente a sua aplicação em confinamento de pilares, por exemplo.

A utilização de lâminas constitui o sistema pré-fabricado, considerando que neste caso o compósito é formado em fábrica antes da sua aplicação na estrutura. A designação de pré-fabricado dá-se pela prévia polimerização da fibra de carbono com um adesivo que forma a matriz polimérica (figura 18), sendo que a fibra de carbono com adesivo forma o laminado, independente do adesivo de colagem aplicado posteriormente (Azevedo, 2008).

O processo de polimerização das fibras resulta 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. A orientação unidirecional das fibras permite maximizar a resistência e a rigidez no sentido longitudinal (Azevedo,2008).

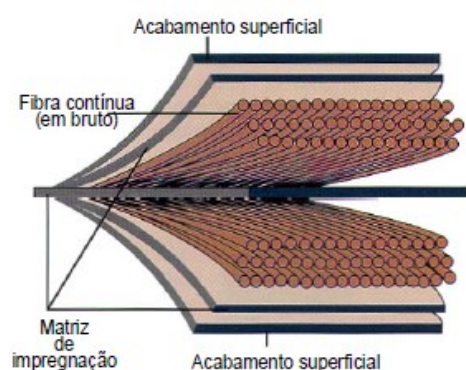


Figura 18 - Esquema de lâmina de fibra de carbono

[Fonte: Materiais Compósitos Reforçados com Fibras, FRP; Juvandes (2002), página 33]



Figura 19 - Lâmina de fibra de carbono

[Fonte: <http://www.felix.by/news/121/> - consulta atualizada em 04-09-2014.]

A laminação das fibras de carbono formam as, habitualmente designadas, lâminas de fibra de carbono, que variam na sua espessura entre os 1,0 mm e os 1,4 mm (para lâminas de colagem exterior). No caso de lâminas de fibra de carbono para inserção no interior da estrutura, através de ranhuras pela espessura da lâmina, podem atingir em média os 3,0 mm (técnica NSM – Near Surface Mounted).

À semelhança das mantas de carbono, apresentam variações quanto ao teor de carbono, módulo de elasticidade e deformação de rotura entre a fibra de carbono e o compósito de fibra de carbono. Apesar do adesivo aplicado sobre a lâmina de fibra de carbono não ter uma influência tão significativa como o adesivo sobre o tecido, os dados técnicos da lâmina deverão ser bem explícitos bem como do adesivo correspondente.

Os dados técnicos que devem constar numa ficha técnica de lâmina de fibra de carbono, na perspectiva da Sika, devem ser:

- Dimensões das lâminas;
- Temperatura de transição vítrea;
- Teor de fibra (volume);
- Módulo de elasticidade;
- Módulo de elasticidade do quantilho de 5% da tensão de rotura;
- Resistência à tração;
- Resistência à tração do quantilho de 5% da tensão de rotura;
- Resistência à tração do quantilho de 95% da tensão de rotura;
- Consumo previsto do adesivo correspondente;
- Resistência mínima de aderência do adesivo.

Poder-se-á afirmar que algumas das características do adesivo não deveriam constar das fichas técnicas dos tecidos e das lâminas, contudo a divulgação dessas informações nas mesmas, permite uma visualização de informação importante para o sistema na íntegra.

4.3 SEQUÊNCIA DE APLICAÇÃO DO SISTEMA

Para que o sistema compósito cumpra os requisitos para o qual foi dimensionado, devem ser respeitadas as indicações dos fornecedores em todo o processo. Não podem ser negligenciadas questões como o arredondamento dos pilares e vigas na aplicação de tecido para impedir a concentração de tensões nos cantos, a temperatura de aplicação dos adesivos, o tempo máximo de abertura dos adesivos, entre outros.

Para que se possa afirmar que a solução de compósito tem vantagens em relação a soluções convencionais, devem as soluções de compósitos apresentar as seguintes características, segundo o Bulletin 14 *fib*:01 (2001):

- Imunidade à corrosão;
- Baixo peso, resultando em fácil aplicação em espaços confinados e incremento residual do peso próprio da estrutura;
- Resistência à tração muito elevada;
- Rigidez que pode ser adaptada às exigências do projeto;
- Grande capacidade de deformação;

- Disponibilidade praticamente ilimitada de FRP em tamanho, geometria e dimensões.

A colagem de FRP na superfície do betão pode fazer-se, em geral, com elementos pré-fabricados ou com elementos curados *in situ*. A técnica para a utilização de ambos os reforços envolve a aplicação manual por meio de colagem com adesivo e curado a frio.

As recomendações técnicas para aplicação do reforço externo de FRP contempla as seguintes etapas:

- **Recuperação do substrato de betão:**

De forma a garantir a capacidade de transferência de esforços, o substrato de betão que estará em contacto com o compósito deverá ter as condições mecânicas, a ponto de não fissurar antes de transferir os esforços ao compósito.

É comum, no caso de elementos que precisem de reforço estrutural, existir corrosão nas armaduras, pelo que deverão ser recuperadas antes da aplicação de qualquer tipo de reforço (figura 20). Torna-se então necessária a execução dos seguintes procedimentos para o substrato de betão:

- Remoção do betão de recobrimento junto das armaduras corroídas;
- Limpeza/tratamento da corrosão dos varões de aço;
- Aplicação de inibidor de corrosão sobre as armaduras;
- Recomposição do substrato de betão.



Figura 20 - Recuperação da superfície de betão e armaduras

[Fonte: <http://www.clubedacasa.com.br/blog/index.php/2012/11/> - consulta atualizada em 04/09/2014]

- **Recuperação de fissuras**

Todas as fissuras existentes no elemento a ser reforçado deverão ser recuperadas. Para as fissuras com abertura superior a 0,25 mm deverá ser feito um tratamento de injeção de resina epóxi sob pressão (ver figura 21) (Machado).



Figura 21 - Injeção de fissuras

[Fonte: <http://imoveis.culturamix.com/dicas/o-que-fazer-com-trincas-e-fissuras-nas-paredes> - consulta atualizada em 04-09-2014]

- **Preparação da superfície de betão:**

Para a preparação da superfície de betão, é necessário ter em consideração o tipo de ligação que se pretende, ou seja, se a ligação terá predominância a condição crítica de colagem (flexão e/ou corte) ou a condição crítica de contacto íntimo (confinamento).

- No caso da ligação ter predominância a condição crítica de colagem, deverão ser utilizados jatos de areia, abrasivos ou limalhas metálicas para a limpeza da superfície (figura 22). A limpeza deverá garantir a remoção de poeiras, substâncias oleosas e graxas e partículas sólidas não aderidas na totalidade. Existindo o caso de reforço em mais de um lado do elemento, os cantos deverão ser arredondados no sentido de evitar concentração de tensões na fibra e eliminar vazios entre o composto e o betão.
- No caso da ligação ter predominância a condição de contacto íntimo, as superfícies não poderão apresentar concavidades ou convexidades que impeçam o correto carregamento do sistema compósito. As irregularidades superficiais deverão ser colmatadas através do seu preenchimento com material de reparação compatível

com as características mecânicas do betão ou através de remoção, dependendo do caso.

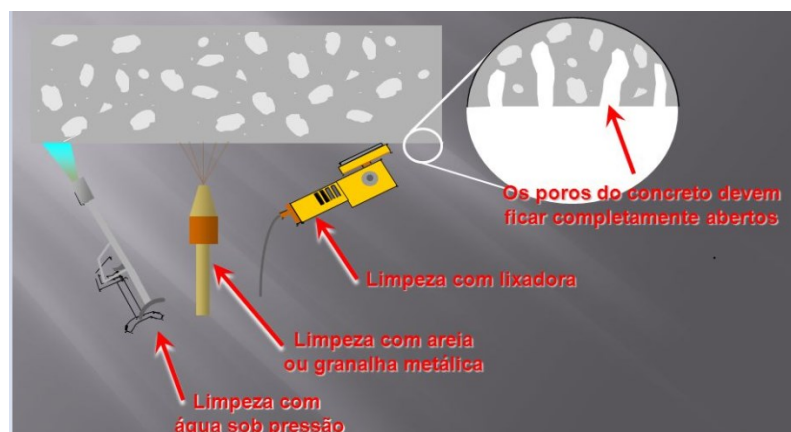


Figura 22 - Soluções de limpeza da superfície de betão

[Fonte: <http://slideplayer.com.br/slide/1261591/> - consulta atualizada em 04-09-2014]

- **Aplicação da primeira camada de adesivo:**

A aplicação da primeira camada de adesivo (figura 23), sobre a superfície de betão, tem como objetivo a penetração do adesivo nos poros existentes, para que aquando da colocação da fibra haja uma boa capacidade de aderência entre o tecido/lâmina e a superfície de betão.



Figura 23 - Aplicação da primeira camada de adesivo

[Fonte: Autoria própria – capturada a 17-07-2014]

- **Aplicação do regularizador de superfície:**

É aplicada uma massa regularizadora na superfície de betão onde será aplicado o compósito de fibra de carbono. Como o próprio nome indica, a massa regularizadora permite minimizar as irregularidades permitindo que exista uma ondulação residual suportável pelo compósito. Em

alguns fabricantes o próprio adesivo de colagem comporta características de primário e de regulador de superfície, sendo, portanto, este passo suprimido dependendo do sistema adesivo.

- **Corte e aplicação de adesivo nas fibras de carbono:**

As lâminas ou tecido são previamente cortadas em função das necessidades para as quais foram dimensionadas. Como as fibras não poderão ser cortadas de forma indiferenciada, sob o risco de danificar as suas características mecânicas, são utilizadas ferramentas de corte específicas para cada tipo de corte. Para o corte transversal é utilizada uma tesoura de aço (figura 24) e uma faca de corte ou estilete para o corte longitudinal. É aplicada uma camada de adesivo para impregnar a fibra de carbono (tecido), aumentando a sua capacidade de aderência com a superfície de betão previamente impregnada. O tipo de impregnação na fibra de carbono pode variar em função do aplicador. Em alguns casos, o tecido de fibra é colocado a “seco” e posteriormente impregnado, ou impregnado com a resina antes da sua colocação na superfície.

- Saturação via húmida:

No uso deste tipo de saturação, a fibra de carbono é impregnada com resina e posteriormente transportada para aplicação no elemento que se pretende reforçar.

- Saturação via seca:

No uso deste tipo de saturação, a fibra de carbono é impregnada diretamente na superfície de betão a ser reforçada.

Nota: A prática que tem apresentado melhores resultados de trabalhabilidade e economia de resina é a de saturação via húmida. No entanto, apresenta as suas limitações no comprimento do elemento de reforço a ser impregnado, por motivos de transporte até à estrutura.



Figura 24 - Corte da fibra para aplicação conforme projeto

[Fonte: Autoria própria – capturada a 18-07-2014.]

- **Aplicação da lâmina/tecido de fibra de carbono:**

A colocação do compósito, formado entre a fibra de carbono e a resina, deve ser imediata, pois o tempo de contacto da resina saturante é relativamente limitado para grandes intervalos de espera.

A aplicação da fibra pode ser feita manualmente (figura 25), havendo também sistemas automáticos de colocação de fibra, como por exemplo no encamisamento de pilares. A colocação da fibra deve ser cuidadosa e fixada de acordo com as especificações de projeto. Após a colocação da fibra, deve passar-se um rolo plástico para pressionar a fibra na superfície e aumentar a aderência com o adesivo ainda em estado fresco.



Figura 25 - Aplicação da fibra de carbono na superfície

[Fonte: Autoria própria – capturada a 17-07-2014]

- **Segunda camada de adesivo:**

Após a colocação da fibra de carbono na superfície de betão, deve ser aplicada uma segunda camada de adesivo para aumentar a capacidade aderente do sistema compósito (figura 26). Com a colocação da segunda camada de adesivo, fica encerrado o procedimento de aplicação do compósito de reforço com fibra de carbono. Em função da situação de reforço, o procedimento é igualmente repetido para cada camada de fibra de carbono que seja aplicada no elemento.



Figura 26 - Aplicação da segunda camada de adesivo

[Fonte: Autoria própria – capturada a 18-07-2014.]

- **Revestimento Estético e/ou Protetor:**

Na generalidade dos casos, o processo termina com a colocação da segunda camada de adesivo, mas muitas vezes por questões estéticas é aplicado um revestimento que pode assumir cores e texturas conforme pretendido.

Quando se considera que a rotura espontânea do compósito de fibra de carbono poderá culminar num colapso repentino da estrutura, existe a necessidade de proteger o sistema de vários agentes que poderão ser responsáveis pela sua rotura. O revestimento deverá então ser previsto para atender a agressões físicas, mecânicas, ambientais e, prioritariamente, de incêndio.

4.3.1 DISTINÇÃO ENTRE PRIMÁRIO, CAMADA DE REGULARIZAÇÃO E ADESIVO

Este ponto tem o único objetivo de esclarecer a necessidade de uso dos agentes que permitem a colagem da fibra de carbono num elemento que se pretende reforçar.

Existem fabricantes que fornecem sistemas de reforço FRP colado exteriormente com vários elementos que permitem a fixação do compósito à superfície a reforçar. Um material que permite melhorar as características de aderência é o primer ou primário, que constitui num material fluido que adere ao betão e ao adesivo de colagem. Outro material é a camada de regularização que é

utilizada em casos onde as convexidades ou concavidades se verificam excessivas. E por fim existe o adesivo de colagem, conforme já foi mencionado anteriormente.

O primário e a camada de regularização são elementos que são utilizados em função da sua necessidade real, isto significa que a utilização de diversos produtos para a aplicação do sistema nem sempre é necessária. Em exemplo, se existe uma superfície com boas características de coesão e aderência, esta não tem necessidade de aplicação de primário.

Por regra, após a preparação da superfície de betão, deveria fazer-se um teste de aderência do substrato, com um valor de tensão de tração superior a 1,5 MPa para lâminas e 1,0 MPa para tecidos. Ao fazer-se este teste por arrancamento, pode verificar-se a qualidade da resina de colagem do sistema. E em função dos resultados, identificar soluções de produtos que garantam uma boa aderência do sistema.

A discussão ao redor deste tema é complexa e vários fabricantes contrariam as informações da concorrência em defesa do seu produto. Porém, os próprios projetistas afirmam que para uma mesma situação, a necessidade de primer, camada de regularização e adesivo depende das especificações dos produtos e das combinações de soluções de cada fabricante. Existem soluções combinadas que exigem a aplicação de vários produtos, no entanto podem encontrar-se no mercado determinados produtos que combinem todas as funções de um primário, regularizador e adesivo num só, como é o caso do Sikadur 330. Naturalmente terá de ser um produto com baixa viscosidade, que terá de ter boas características de aderência e boa penetração nos poros existentes na superfície de betão para regularização.

4.4 REQUISITOS DOS SISTEMAS COMPÓSITOS

A par do que já foi referido até este ponto, serve o mesmo para fazer uma súmula dos principais requisitos a que devem ser sujeitos os materiais constituintes do sistema de reforço compósito FRP.

Os principais requisitos a ter em conta num sistema são a compatibilidade entre os materiais, a durabilidade, as características do adesivo, as características das fibras e as características do betão. Nos pontos 4.4.1 e 4.4.2 serão referidos os requisitos de compatibilidade entre os materiais e a durabilidade, respetivamente. As características das fibras, do adesivo e do betão não serão referidas neste ponto por razões de não repetição de matéria.

4.4.1 COMPATIBILIDADE ENTRE OS MATERIAIS

A compatibilidade entre os materiais é um dos requisitos mais importantes a considerar no reforço com compósito FRP. A insuficiência de compatibilidade, entre os materiais de reforço e o elemento a reforçar, certamente irá provocar problemas prematuros na estrutura reforçada, exigindo intervenções desnecessárias e mais dispendiosas.

Para que a compatibilidade desejada seja possível, deve existir um equilíbrio entre as propriedades dos materiais, nomeadamente físicas, químicas, electroquímicas e dimensionais (Carvalho, 2011).

Sabendo-se que, num sistema passivo de reforço, as tensões são transmitidas, na sua grande maioria, pelas interfaces dos elementos do sistema, é de toda a importância evitar qualquer falha nas mesmas, prevenindo assim ruína prematura e global do sistema.

Segundo Morgan (1995), a compatibilidade deve ser garantida em quatro aspetos fundamentais, sendo eles a compatibilidade dimensional, a química, electroquímica e a higroscópica.

A compatibilidade higroscópica entende-se pela capacidade do reforço em manter as características impermeáveis, de modo a evitar acumulação de quantidades de água prejudiciais para os materiais e respetivas interfaces (Carvalho, 2011).

A compatibilidade química e electroquímica pressupõe que os materiais de reforço não produzem efeitos negativos no elemento a reforçar. Neste caso, faz-se intenção de referir as possíveis consequências negativas que o adesivo, sendo um químico, poderiam provocar no betão e nas fibras de reforço (Carvalho, 2011).

A compatibilidade dimensional diz respeito à alteração volumétrica dos materiais, nomeadamente à alteração de volume que existe no adesivo no processo de endurecimento. Destaca-se a retração por secagem do adesivo, que naturalmente irá ter uma influência negativa em casos de retração excessiva. Em muitos casos, a utilização de adesivos de base cimentícia com retração excessiva provoca o descolamento do reforço nas extremidades. (Carvalho, 2011).

O efeito que a variação de temperatura tem nos elementos de reforço, é uma característica de elevada importância no sucesso do sistema. Quando não se consegue a compatibilidade entre os coeficientes de expansão térmica dos diferentes materiais, geram-se tensões indesejadas, com potencial risco de fendilhações nas interfaces.

A compreensão do comportamento da estrutura após a aplicação do reforço é de suma importância para analisar a adequabilidade dos materiais, quanto ao seu módulo de elasticidade e fluência dos

mesmos quando solicitados. O módulo de elasticidade do compósito não pode ser excessivamente elevado, pois dessa forma confere rigidez elevada à estrutura e diminui a ductilidade da mesma, sob o risco de uma rotura do tipo frágil. “O material de reparação ideal será então aquele que se caracterize por uma elevada estabilidade volumétrica, isto é, que não sofra retracção ou expansão uma vez instalado e que apresente um módulo de elasticidade e um coeficiente de expansão térmica similar ao dos substrato de betão” (Carvalho, 2011).

4.4.2 DURABILIDADE

Quando se procede a um reforço estrutural, é de esperar que este cumpra requisitos económicos e sustentáveis, sendo que estes são cumpridos com a durabilidade efetiva do reforço.

No caso de reforço com armaduras metálicas, por exemplo, a durabilidade do sistema é um fator negativo devido à potencial corrosão das chapas metálicas de reforço externo (Bulletin 14 *fib*:01, 2001).

No caso de reforço com armaduras não metálicas, mais propriamente com compósitos de fibra de carbono (CFRP), a durabilidade não se encontra tão comprometida, pois a fibra de carbono é um material inerte e resistente quimicamente.

É importante que a fase de projeto garanta a compatibilidade dos materiais, pelos motivos evidenciados no ponto anterior e especifique os métodos de aplicação do sistema mais convenientes. A fase de projeto deve ainda considerar na fase de cálculo, modelos de cálculo conservativos de maneira a garantir a segurança e durabilidade da estrutura (Carvalho, 2011).

Na fase de aplicação, é importante verificar as especificações do fabricante, no que diz respeito às condições ambientais, propriedades da superfície de betão, nos valores mínimos de aderência e também a experiência dos aplicadores.

4.5 APLICAÇÕES PRÁTICAS DOS SISTEMAS COMPÓSITOS

Os sistemas compósitos de fibra de carbono apresentam-se como uma vantagem no que diz respeito ao campo de aplicação e também na facilidade de aplicação para locais com difícil ou reduzida acessibilidade. Existem diferentes soluções de aplicação dos sistemas compósitos, nomeadamente em função do tipo de esforço solicitante. Pode ser utilizado para minimizar o momento fletor em vigas e lajes, confinar um pilar para minimizar o efeito de encurvadura, reforçar vigas submetidas a forças de corte (efeito de reforço semelhante ao dos estribos nas vigas), entre outros.

Seguem-se alguns casos de reforço mais comuns e respetivas considerações:

- **Reforço de vigas à flexão e ao corte:**

As vigas estão sujeitas a ações de flexão e corte, pelo que o reforço das mesmas terá de ser no sentido de contrariar as ações nelas exercidas (figura 27). Existe necessidade de reforço das vigas quando se verificam deformações excessivas ou se se verificar fendilhação.

Neste tipo de reforço, o compósito, constituído pelas fibras de carbono, absorve os esforços de tração na zona inferior da viga causados pela flexão da mesma (no caso de momentos positivos) e absorve esforços de tração na zona superior da viga causados pela flexão em momentos negativos. O reforço desta natureza também permite a absorção de esforços de corte, funcionando como os estribos de aço no interior da viga.

O reforço à flexão permite aumentar a resistência da viga, naturalmente à flexão com momentos positivos ou momentos negativos; aumentar a capacidade de carga, com a colocação de material com elevado módulo de elasticidade; diminuir a flecha e controlar ou eliminar fendas e aumentar ligeiramente a ductilidade.

O reforço ao corte permite aumentar, naturalmente, a resistência ao esforço transversal; aumentar a capacidade de carga transversal, controlar ou eliminar fendas e aumentar a ductilidade.

Ambos os casos podem ser combinados num único reforço, através da aplicação de mantas de fibra de carbono em forma de “U”, passando pela face inferior da viga para reforço à flexão e as faces laterais da viga para reforço ao corte.

Nota: Para esforços de flexão, são usadas lâminas ou tecidos colocados no sentido longitudinal do eixo da viga. Para esforços de corte, podem ser usadas lâminas ou tecidos de fibra de carbono, que poderão ser colocadas na direção perpendicular ao eixo longitudinal da viga ou na direção perpendicular à direção das fissuras causadas por esforços transversais.

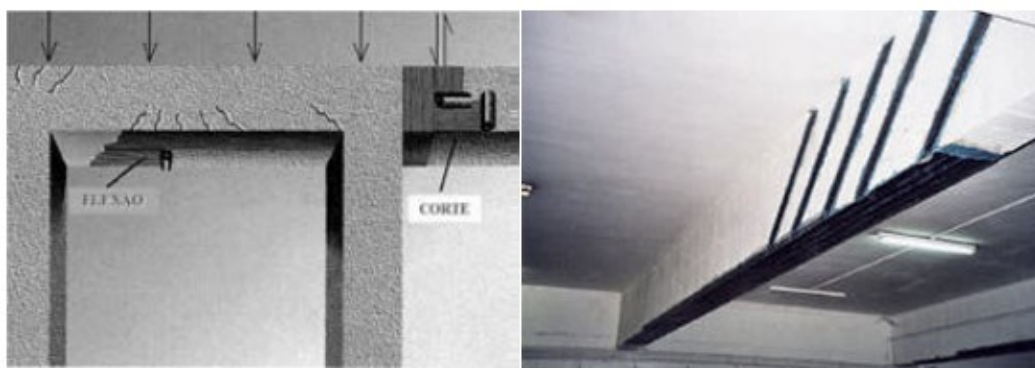


Figura 27 - Reforço de viga à flexão e ao corte

[Fonte: Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono; Machado, Ari de Paula e http://www.brasil.geradordeprecos.info/reabilitacao/Estruturas/Concreto_armado/Reforços_e_ancoragens/EHZ110_reforco_ao_esforco_transverso_de_vi_1_0_0_0_0_0_0_0_0_1_0_0_0.html]

- **Reforço de lajes à flexão:**

As lajes, à semelhança das vigas, são reforçadas a esforços de flexão positiva, pelo que o compósito de fibra de carbono se encontra na zona inferior da laje (figura 28). Existem também situações de reforço de lajes para momentos negativos, pelo que o compósito de fibra de carbono se encontra zona superior da laje, como demonstrado na figura 29. Em comparação com as lajes armadas nas duas direções, o compósito de fibra de carbono poderá também ser colocado segundo as duas direções. Se o reforço for aplicado apenas numa direção, as fibras devem ser colocadas no sentido longitudinal do maior esforço identificado na laje. A correta direção das lâminas é essencial para melhorar a capacidade de carga, diminuir a deformação da laje (fibra pré-esforçada) e controlar a fendilhação.

Podem ser usados laminados, mantas ou tecidos, dependendo da necessidade de reforço, da facilidade de aplicação ou da preferência do projetista e aplicador. Por exemplo, num reforço de laje que necessite de reforço nas duas direções, pode ser aplicado um tecido (fibra nas duas direções) ou então duas camadas de manta (unidirecional) em sentidos perpendiculares.

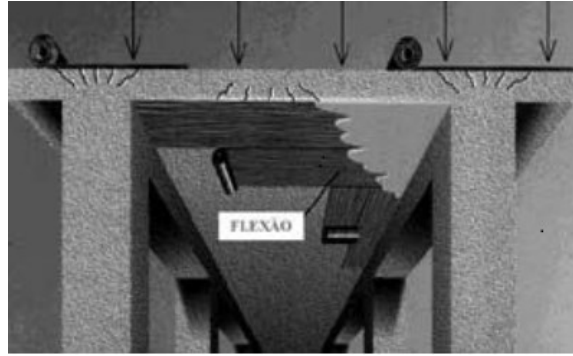


Figura 28 - Reforço de laje à flexão nas duas direções para momentos positivos

[Fonte: Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono; Machado, Ari de Paula]



Figura 29 - Reforço de laje à flexão nas duas direções para momentos negativos

[Fonte: http://fotos.habitissimo.com.br/foto/reforco-com-fibra-de-carbono_38522 - consulta atualizada em 04-09-2014]

- **Reforço de pilares e colunas:**

O reforço de pilares ou colunas (habitualmente chaminés industriais), pode ser realizado de duas formas distintas em função do esforço que se pretende minimizar (figura 30 e figura 31).

Pode então ser realizado com base nas seguintes considerações:

- Aumentar a resistência do elemento à flexão;
- Aumentar a resistência do elemento à compressão axial.

No reforço à flexão podem ser utilizados laminados, mantas ou tecidos, uma vez que o sentido das fibras tem de ser paralelo ao eixo longitudinal do pilar.

O encamisamento do pilar aumenta a rigidez e resistência à deformação axial, pois impede a deformação lateral do pilar, contrariando a ação de flexão das armaduras interiores. Apesar de poderem ser utilizados laminados pré-fabricados no encamisamento de pilares, é aconselhável o uso de mantas ou tecidos por facilidade de aplicação e principalmente pelo risco de concentrações de tensões mal distribuídas.

Segundo Tarso (2005), o reforço de encamisamento de pilar é um dos reforços que tem provocado maior distorção na disciplina do betão armado com compósitos. De acordo com Tarso (2005), a única forma para viabilizar qualquer variação na capacidade resistente de uma peça comprimida, mediante o emprego de CFRP, dá-se pela tentativa de imposição de forças transversais por confinamento. Porém, afirma que o reforço, em peças ainda descarregadas, contribuiu mais para o ganho de ductilidade que para o aumento da capacidade resistente, sendo que nos casos mais comuns nem sequer é possível o alívio de carregamentos.

Carrazedo et al. (2002), estudou o comportamento do reforço CFRP em pilares, verificando que a contribuição do CFRP apenas se inicia a uma deformação de 0,25%, sendo que a norma brasileira estipula o máximo de deformação de pilar em 0,2%, pode concluir-se que a influência real que o encamisamento provoca no pilar não se revela significativa. No entanto, a deformação máxima dos corpos de prova reforçados por encamisamento, ensaiados por Carrazedo et al. (2002), atingiram uma deformação de 20%, aproximadamente. Isto significa que o reforço por encamisamento poderá provocar uma ruína por colapso, uma vez que se verifica um ganho exagerado de ductilidade do elemento (Tarso, 2005).

O reforço exagerado permite que sejam aplicadas cargas excessivas no pilar e que este inicie o seu processo de fendilhação, sem que seja verificada deformação no mesmo ou até mesmo a fendilhação no betão. Acontece, na maioria dos casos, que quando o compósito atinge o limite de rotura, o betão já está totalmente deteriorado, causando uma rotura global frágil e sem possibilidade de contenção. A consideração de que o reforço por encamisamento não aumenta significativamente a característica resistente do elemento numa situação estática, não invalida o seu uso para reforço em situações em que se esperam cargas dinâmicas e temporárias, como o caso de sismos (Tarso, 2005).

Nota: No caso de haver necessidade de reforçar para ambos os esforços, o reforço à flexão deverá ser o primeiro a ser colocado sobre o elemento. É necessário respeitar este conceito, uma vez que para o reforço à flexão deve ser garantida a “colagem crítica” entre o compósito e o betão, enquanto que para o confinamento deverá ser garantido o “contacto íntimo”, pelo que as condições de aderência não se revelam tão condicionantes sobre a superfície de betão.

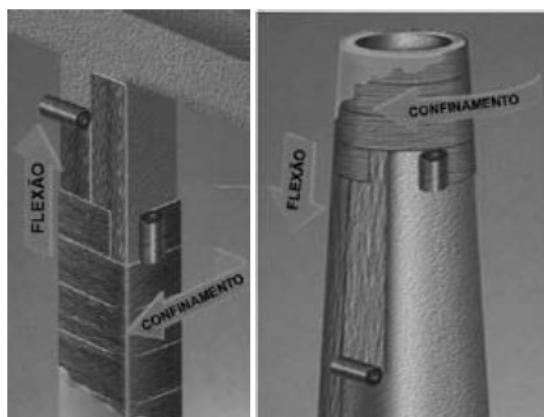


Figura 30 - Reforço de pilar e chaminé (flexão e encamisamento)

[Fonte: Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono; Machado, Ari de Paula]



Figura 31 - Reforço por encamisamento de pilar

[Fonte: <http://www.carbonconcrete.es/HTML/es/Aplicacion%20de%20Refuerzo.html> – consulta atualizada em 04-09-2014]

- **Reforço de tanques e reservatórios:**

No caso dos reservatórios (figura 32) e tanques, é necessário fazer a reparação antecipada das fissuras que resultem dos esforços aplicados até ao momento do reforço com o sistema compósito. Após a reparação das fissuras, pode proceder-se ao reforço, que geralmente é feito por confinamento.

A aplicação do reforço com FRP traduz-se numa grande vantagem em relação aos sistemas convencionais. A complexidade dos processos de reforço convencionais, a duração da aplicação desse tipo de reforço e o custo do mesmo torna o reforço em reservatórios, principalmente circulares, num transtorno considerável.

As características de regime elástico do FRP permitem a dinâmica de deformabilidade usual e necessária num reservatório. Devido às pressões negativas provocadas pelos líquidos no interior do reservatório, é fundamental que o sistema de reforço aumente a capacidade de carga por forma a contrariar a pressão exercida no sentido do interior para o exterior do reservatório e ao mesmo tempo deve permitir um aumento de ductilidade limitada das paredes do mesmo para impedir a fendilhação prematura.

A compatibilidade dos materiais é, neste caso, um requisito que deve ser privilegiado, pois dela depende que os elementos se comportem como um conjunto, tendo como objetivo o mesmo tipo de resposta para qualquer tipo de solicitação à estrutura. Sejam tensões provocadas por retração do adesivo, por variação volumétrica, por variações excessivas de módulos de elasticidade ou extensão máxima, estas devem ser sempre analisadas em fase de projeto para minimizar o risco de falha nas interfaces de contacto.

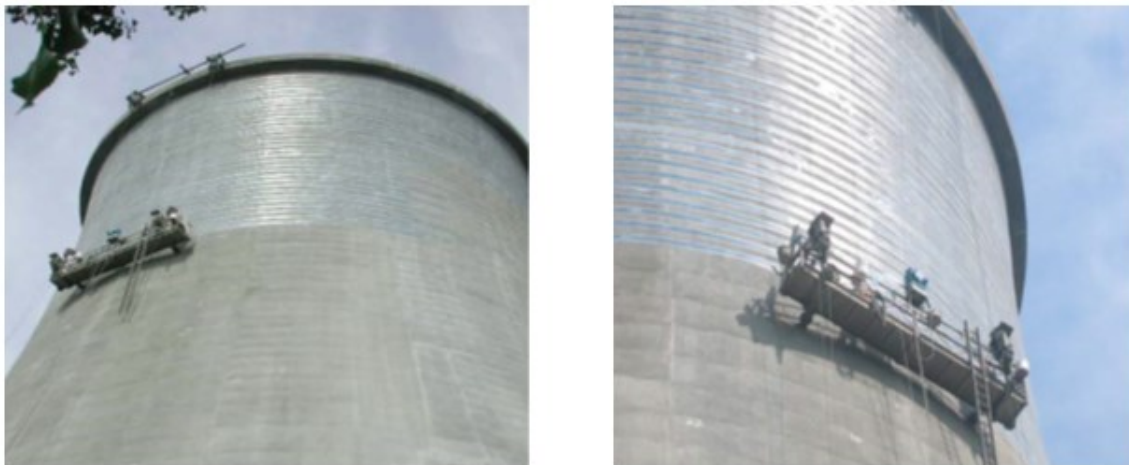


Figura 32 - Reforço por encamisamento de reservatório

[Fonte: Sika at Work No 02/2005, Refurbishment and Structural Strengthening, página 3]

- **Reforço de tubagens ou passagens de betão de grande diâmetro:**

As tubagens de betão armado de grande diâmetro, como são sujeitas a pressões internas e externas, podem ser reforçadas no seu exterior ou no seu interior. No entanto, como a generalidade de tubagens ou passagens que precisam de reforço com compósito de fibra de carbono se encontram soterradas, a maior parte de reforço desta natureza é feito internamente (figura 33).



Figura 33 - Reforço interior de túneis

[Fonte: <http://www.teprem.com.br/ambiente.htm> e Reforço Estrutural em Vigas de Concreto Armado Aplicando-se Mantas Flexíveis de Fibra de Carbono - Leite, Celso (2010) – Monografia para grau de Bacharel]

5 *Bulletin 14 fib:01 Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures* – abordagem de cálculo

5.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem o propósito de introduzir os conceitos gerais de dimensionamento de reforço FRP para esforços à flexão e ao corte, de acordo com o documento Bulletin 14 *fib*:01 – Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures.

Consta neste capítulo uma breve referência das entidades e documentos publicados internacionalmente, que servem de guia de dimensionamento para os países respetivos e para países que não contemplam documentação nacional. Os documentos diferem nos modelos de cálculo, no entanto, apenas foi explorado, neste documento, o modelo de cálculo da *fib* (Fédération Internationale du Béton).

Relativamente ao processo de dimensionamento, deve ser realizado, previamente, um levantamento de informações da estrutura que se pretende reforçar. É fundamental proceder-se à inspeção da estrutura, à avaliação das principais características geométricas dos elementos estruturais existentes, à avaliação das propriedades mecânicas dos materiais da estrutura, à determinação da capacidade resistente efetiva da estrutura e à análise técnico-económica das diferentes soluções de reforço.

Segundo Rodrigues (2013), o levantamento de informações pode dividir-se da seguinte forma:

- Estrutura:
 - Elementos estruturais:
 - Identificação dos elementos estruturais no local;
 - Projeto de estabilidade original;
 - Secção transversal dos elementos estruturais:
 - Levantamento e medições no local;
 - Projeto de estabilidade original;
 - Ensaios complementares (detecção de armaduras, sondagens, etc);
- Materiais:
 - Propriedades mecânicas:
 - Ensaios de diagnóstico *in situ* e em laboratório;
 - Projeto de estabilidade original e ensaios de receção.

5.2 DOCUMENTAÇÃO INTERNACIONAL ATUAL

A fim de contextualizar o documento Bulletin 14 *fib*:01, é importante fazer uma breve referência dos documentos produzidos pelas frentes de investigação a par da Europa, conforme referido no capítulo 2.

5.2.1 AMÉRICA DO NORTE

Na América do Norte existem dois grandes países que têm desenvolvido conhecimento acerca dos FRP's, que são o Canadá através do *Intelligent Sensing for Innovative Structures* (ISIS) e os EUA através do *American Concrete Institute* (ACI), ambos apresentando documentos técnicos sobre a colagem exterior de FRP em superfícies de betão armado (Carvalho, 2011).

O ISIS publicou em setembro de 2001 o Manual de Dimensionamento nº4, intitulado “*Strengthening Reinforced Concrete Structures with Externally-Bonded Fibre Reinforced Polymers*”. E o ACI, através do Comité 440, publicou, em maio de 2002, o documento “*Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*”. Ambos os documentos focam as propriedades físicas e mecânicas dos materiais, recomendações de manuseamento, transporte, armazenamento, aplicação em obra, manutenção, recomendações de dimensionamento à flexão, corte, compressão e tração.

A particularidade de ambos os documentos é a introdução de exemplos de cálculo para tornar a compreensão dos critérios de dimensionamento mais acessível e clara.

5.2.2 JAPÃO

A JSCE (*Japanese Society of Civil Engineers*) tem desenvolvido grandes conhecimentos na área de reforço com FRP's devido à prevenção de colapso de edificações e restantes estruturas para situações sísmicas. Devido ao facto do Japão se encontrar numa zona de grande atividade sísmica, tem-se dado um grande desenvolvimento de soluções de FRP mais duráveis e mais eficientes para situações de calamidade. É um assunto imperativo, para o Japão, o reforço estrutural de estruturas o mais eficiente possível (Manzano, 2012).

Em 1992, o comité de reforço da JSCE, publicou em versão inglesa o documento “*Application of Continuous Fiber Reinforcing Materials to Concrete Structures*”. Em setembro de 1997, foi publicado o “*Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures using Continuous Fiber Reinforcing Materials*” e no ano 2000 foi publicado o “*Recommendations for Upgrading of Structures with use of CFRP Sheet*”.

Devido à característica especial do Japão em relação a atividade sísmica, em setembro de 1999, a *Japan Building Disaster Prevention Association* (JBDPA) publicou o “*Seismic Retrofitting Design and Construction Guidelines for Existing Reinforced Concrete (RC) Buildings with FRP Materials*”

Todos os documentos desenvolvidos no Japão têm o mesmo conteúdo de base que os documentos desenvolvidos na América do Norte e Europa, com especial atenção à situação de sismo.

5.2.3 EUROPA

Na Europa, por intermédio da *fib* (*Fédération Internationale du Béton*), foram desenvolvidos esforços conjuntos entre vários países com focos de investigação bastante avançados como a Suíça, Alemanha, Bélgica, entre outros (Carvalho, 2011). Desse esforço conjunto, resultou o documento europeu que aborda os conceitos de reforço externo através de compósito de fibra. O documento foi publicado em 2001, intitulado por *Bulletin 14 fib:01 - Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures*.

Neste ponto não será abordado o conteúdo deste documento, uma vez que os pontos que se seguem neste capítulo incidem diretamente sobre o mesmo.

5.3 INTRODUÇÃO DO BULLETIN 14 *fib*:01

O documento Bulletin 14 *fib*:01 foi criado no ano de 2001, com o objetivo de uniformizar os procedimentos de aplicação de sistemas compósitos de FRP e os procedimentos de cálculo para o dimensionamento do sistema de reforço.

É um documento europeu, desenvolvido pela *Fédération Internationale du Béton* (*fib*), que contempla os valores característicos estruturais dos Eurocódigos, nomeadamente o Eurocódigo 2.

O Bulletin 14 *fib*:01 surgiu da necessidade de estabelecer critérios europeus comuns, criando as mesmas linhas orientadoras teóricas e práticas nos países europeus. Durante muito tempo, desde o aparecimento dos compósitos de fibras na construção, que o dimensionamento tem sido feito com suporte em ensaios laboratoriais e da experiência dos intervenientes, desde o projeto à conceção (Azevedo, 2008). E, sendo a área de reforço um tema sensível no ramo da engenharia civil, é importante criar mecanismos que garantam tecnicamente a segurança dos sistemas.

O documento publicado pela *fib* é constituído por 9 capítulos, sendo que a distribuição dos mesmos é a seguinte:

- Capítulo 1: Introdução;
- Capítulo 2: Técnicas e materiais de reforço FRP;
- Capítulo 3: Bases de projeto e conceitos de segurança;
- Capítulo 4: Reforço à flexão;
- Capítulo 5: Reforço ao corte e à torção;
- Capítulo 6: Confinamento;
- Capítulo 7: Regras específicas;
- Capítulo 8: Execução prática e controlo de qualidade;
- Capítulo 9: Considerações especiais de projeto e efeitos do ambiente.

Em suma, é um documento que permite adquirir noções acerca dos sistemas compósitos, desde os materiais intervenientes, das propriedades, dos cuidados de aplicação, de técnicas de aplicação, etc. Permite também adquirir bases de dimensionamento para sistemas compósitos com fibras, relatando o dimensionamento à flexão, corte, torção e confinamento.

Pretende-se, com este capítulo, fazer uma abordagem teórica sobre os conceitos de dimensionamento no que respeita ao reforço à flexão e ao corte, por serem os tipos de reforço mais utilizados na prática do recurso aos compósitos. É objetivo deste capítulo a compreensão dos princípios de dimensionamento, das bases de cálculo, os Estados Limites considerados, os modos de rotura do sistema e algumas considerações especiais do sistema de reforço, de acordo com o documento Bulletin 14 *fib*:2001 por ser de âmbito europeu e por se adaptar aos mecanismos de dimensionamento brasileiros.

Tendo noção de que alguns conceitos ainda não estão totalmente implementados e das limitações encontradas para aprofundar estes conhecimentos durante o estágio curricular, pretende-se uma abordagem do que já está definido como bases de cálculo, mesmo que seja em modelos teóricos complexos.

5.4 CONCEITOS GENÉRICOS PARA DIMENSIONAMENTO

Assim, como no dimensionamento de estruturas originais de betão armado, as condicionantes de dimensionamento de estruturas reforçadas com compósitos FRP variam em função do tipo de solitação. No caso do dimensionamento para compósitos FRP, a base de cálculo está muito apoiada nas bases de cálculo dos Eurocódigos. Combinações de ações, fatores de segurança, considerações de verificação de resistência, entre outros, são exemplos de considerações transferidas dos Eurocódigos, como se poderá ver adiante na explicação teórica de dimensionamento à flexão e ao corte, que serão os esforços estudados neste capítulo.

As verificações regulamentares seguem os pressupostos dos Estados Limites adequados à situação de esforço existente. Para o reforço à flexão são considerados dois Estados Limites, o Estado Limite Último (ULS –Ultimate Limit State) e o Estado Limite de Serviço (SLS - Serviceability Limit State). Para o reforço ao corte, apenas são considerados os Estados Limites Últimos, sendo que não existe qualquer exigência para nenhum outro tipo de Estado Limite.

Nos Estados Limites Últimos (ELU), terá de ser avaliada a resistência, a fadiga, a aderência e a ancoragem do FRP na estrutura. Enquanto que para os Estados Limites de Serviço (ELS), terá de avaliar-se o dimensionamento segundo a deformação, fendilhação e limitação de tensão de compressão no betão.

Salienta-se que a análise aos ELU, de elementos estruturais submetidos a esforços de flexão, pode seguir os pressupostos assumidos para as estruturas de betão armado, com as seguintes condicionantes:

- A contribuição do reforço de FRP externo seja levada em conta adequadamente;
- Uma atenção especial seja dada à questão da ligação entre o betão e o FRP.

Em conceitos genéricos de dimensionamento, pode referir-se que os mais importantes são:

- As características do reforço são analisadas de acordo com o compósito e não com a fibra;
- Deve ser conhecido o estado da estrutura original, antes de se efetuar o dimensionamento para a estrutura com reforço;
- Os estados limites a analisar são o ELU e o ELS.

5.5 REFORÇO DE FRP À FLEXÃO

Para o dimensionamento à flexão, é necessário conhecer o estado real da estrutura, para que se possa equacionar um reforço ajustado às necessidades reais. Conhecer o estado original da estrutura passa por determinar as propriedades do betão no momento antes do reforço; determinar as propriedades da armadura interior de reforço, bem como a sua posição e distribuição; determinar a deformação da estrutura, para ser considerada como situação inicial, não caindo no erro de analisar as deformações dos materiais originais e de reforço FRP partindo das mesmas condições e finalmente determinar as ações a que a estrutura está sujeita antes do reforço e às que será sujeita após o reforço.

Para se iniciar o processo de dimensionamento, devem ser impostas premissas para ser construída uma base de considerações, que permita a realização dos cálculos necessários. As premissas que são consideradas são as seguintes (Rodrigues, 2009):

- Hipótese de Bernoulli – as secções planas antes da deformação continuam planas após a deformação;
- Equilíbrio de forças na secção;
- Perfeita compatibilidade de deformações entre os materiais;
- Resistência do betão à tração desprezável;
- Comportamento linear elástico do FRP até à rotura.

Deve ser tido em conta, também, que o reforço numa estrutura não pode ultrapassar determinados limites, com o objetivo de prevenir o colapso da estrutura após a ruína do sistema FRP. Além de que, numa eventual perda de reforço FRP, a estrutura deve resistir no mínimo às ações permanentes e de sobrecarga não majoradas (Rodrigues, 2009).

O documento Bulletin 14 *fib*:01 não é uma norma estabelecida, pelo que os limites considerados no dimensionamento são assumidos como aconselháveis. E neste sentido, é recomendado que o aumento de resistência à flexão por meio de reforço com colagem de FRP não exceda o dobro da resistência do elemento não reforçado. Uma análise prévia pode ser feita para verificar a necessidade ou até mesmo a viabilidade da aplicação de reforço FRP. Para a verificação da necessidade/viabilidade do reforço, é feita a relação entre o momento atuante na secção crítica em ELU (M_{sdf}) e o momento fletor resistente do elemento não reforçado (M_{Rd0}). A relação R, entre os momentos é a seguinte (Azevedo, 2008):

$$R = \frac{M_{sdf}}{M_{Rd0}}$$

As considerações a ter em conta para avaliar a necessidade de reforço são as seguintes:

Se $R \leq 1$ – não existe a necessidade de reforço;

Se $1 \leq R \leq 2$ – existe necessidade de reforço;

Se $R \geq 2$ - a intervenção de reforço não é viável.

Para verificação do ELS são utilizados os valores característicos para as propriedades do FRP. A lei de comportamento à tração do FRP proposta pelo Bulletin 14 *fib*:01 segue uma relação de tensão-deformação linear, dada pela seguinte equação:

$$\sigma_f = E_{fk} \times \varepsilon_f$$

Onde, σ_f é o valor de tensão de tração no FRP; E_{fk} é o valor característico do módulo de elasticidade do FRP e ε_f é o valor da extensão do FRP.

Para a verificação do ELU, a lei de comportamento à tração continua a ser linear, mas é dada pela seguinte expressão (Bulletin 14 *fib*:01, 2001):

$$\sigma_f = E_{fu} \times \varepsilon_f \leq f_{fd}$$

Onde E_{fu} é o módulo de elasticidade último que se obtém da seguinte relação:

$$E_{fu} = \frac{f_{fk}}{\varepsilon_{fuk}}$$

Onde f_{fk} corresponde ao valor característico da resistência e ε_{fuk} ao valor característico da extensão de rotura do FRP, e ambos correspondem ao quantilho de 5% das propriedades do compósito (Bulletin 14 *fib*:01, 2001).

O valor de f_{fd} (valor de cálculo da resistência à tração do FRP) pode ser obtido a partir da relação:

$$f_{fd} = \frac{f_{fk}}{\gamma_f} \times \frac{\varepsilon_{fue}}{\varepsilon_{fum}}$$

O fator de segurança do material, γ_f , depende do tipo de aplicação e do tipo de fibra, conforme se pode verificar na tabela 2. A relação $\frac{\varepsilon_{fue}}{\varepsilon_{fum}}$, normalmente assume valor unitário, uma vez que o valor da extensão última expectável *in situ* (ε_{fue}) não será significativamente diferente da extensão obtida no ensaio de tração uniaxial (ε_{fum}). Além disso, a diferença que possa haver entre as duas extensões é salvaguardada pelo fator de segurança γ_f . No entanto em casos particulares, a extensão ε_{fue} pode ser significativamente baixa, como resultado de revestimento em volta de arestas acentuadas, aplicação de grande número de camadas, estado de tensão multiaxial, etc.

Nesses casos, a verificação ELU restringe a deformação excessiva do FRP. O Bulletin 14 *fib*:01 contempla detalhes acerca do valor de ε_{fue} nos respetivos capítulos de dimensionamento, ou então o valor poderá ser determinado com base em evidências experimentais.

A tabela 2 (Bulletin 14 *fib*:01, 2001) apresenta os valores do fator de segurança de FRP para os três elementos mais comuns:

Tabela 2 - Fator de redução de fibra

Tipo FRP	Aplicação Tipo A ⁽¹⁾	Aplicação Tipo B ⁽²⁾
CFRP	1.20	1.35
AFRP	1.25	1.45
GFRP	1.30	1.50

⁽¹⁾ Aplicações do tipo A – Pré-fabricados; ⁽²⁾ Aplicações do tipo B – Curados *in situ*

Uma vez conhecido o valor da resistência à tração do FRP, pode determinar-se a extensão de cálculo do FRP, ε_{fd} , usando a seguinte relação (Bulletin 14 *fib*:01, 2001):

$$\varepsilon_{fd} = \frac{f_{fd}}{E_{fu}}$$

Após a análise característica dos materiais e dos respetivos valores de cálculo, é feita uma análise do estado da estrutura antes do reforço, para determinar a deformação da mesma, que será determinante no dimensionamento da solução de FRP.

5.5.1 ESTADO INICIAL

Para se efetuar um correto dimensionamento do elemento de reforço, é necessário conhecer *a priori* o estado da estrutura, a carga aplicada no elemento antes do reforço, as extensões e deformações existentes provocadas por essa mesma carga. As extensões iniciais calculadas, antes do reforço, devem ser excluídas da extensão do reforço de FRP, uma vez que a deformação no FRP será diferente da deformação da estrutura de betão armado reforçada. (Bulletin 14 *fib*:01, 2001).

Com base na teoria da elasticidade e com o momento de serviço atuante, M_0 , é possível obter a distribuição das extensões na secção crítica. Por norma, o cálculo é feito para a secção fendilhada, devido a M_0 ser maior que o momento de fendilhação M_{cr} .

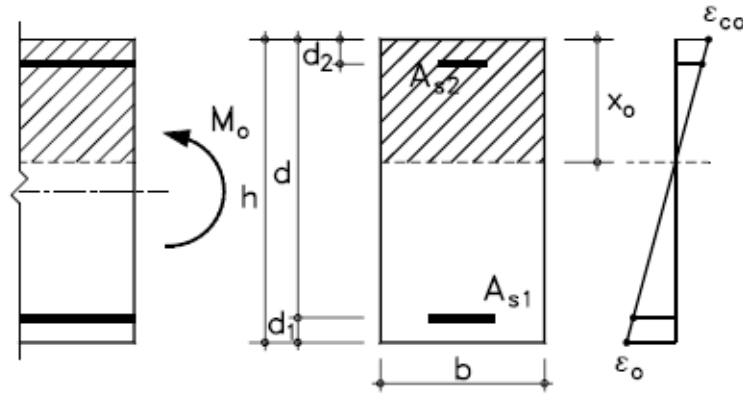


Figura 34 - Situação inicial de seção de betão armado antes do reforço

[Fonte: Bulletin 14. *fib*:2001: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures]

Utilizando as áreas da seção transversal das forças resultantes para o equilíbrio interno de forças (figura 34), e fazendo a expressão de momento em ordem ao eixo neutro da seção, é possível determinar a profundidade do eixo neutro inicial, x_0 .

Assim sendo, obtém-se a seguinte expressão:

$$(b \times x_0) \times \frac{x_0}{2} + A_{s2} \times (x_0 - d_2) \times (\alpha_s - 1) = A_{s1} \times \alpha_s \times (d - x_0)$$

De forma simplificada, resulta em (Bulletin 14 *fib*:01, 2001):

$$\frac{1}{2}bx_0^2 + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_0 - d_2) = \alpha_s A_{s1}(d - x_0)$$

Onde o coeficiente de homogeneização entre o betão e o aço é dado por: $\alpha_s = \frac{E_s}{E_{cm}}$

Podendo então determinar-se a extensão do betão inicial, ϵ_{c0} , na fibra sujeita a valores de tensão de compressão máximos (Bulletin 14 *fib*:01, 2001).

$$\epsilon_{c0} = \frac{M_0 x_0}{E_c I_{02}}$$

Sendo que o momento de inércia da seção homogeneizada fendilhada é dado por (Bulletin 14 *fib*:01, 2001):

$$I_{02} = \frac{bx_0^3}{3} + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_0 - d_2)^2 + \alpha_s A_{s1}(d - x_0)^2$$

5.5.2 ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS (ELU)

Conforme referido, para a verificação do ELU, há que ter em consideração os possíveis modos de rotura da estrutura reforçada. A primeira divisão dos modos de rotura é compreendida nas seguintes classes (Bulletin 14 *fib*:01, 2001):

- Ligação perfeita entre o FRP e o betão;
- Perda de ligação entre o FRP e o betão.

A ligação perfeita entre o compósito e o betão é limitada até ao instante em que o betão atinja o esmagamento por compressão ou o compósito rompa por tração. Pode ser analisada de acordo com as seguintes situações (Bulletin 14 *fib*:01, 2001):

- Cedência do aço seguida de esmagamento do betão, mantendo-se intacto o compósito;
- Cedência do aço seguida de rotura do compósito (devido a baixas percentagens de aço e compósito);
- Esmagamento do betão (devido a elevadas percentagens de compósito).

A análise do esmagamento do betão não é frequente, devido à limitação de extensão que é imposta ao FRP. Contudo, as verificações de maior relevância são as duas primeiras.

A perda da ligação perfeita entre o compósito e o betão pode ser provocada por qualquer um dos elementos. Assim sendo, a falha é analisada pelo local de falha e pelo motivo da falha.

O descolamento pode ocorrer:

- No betão;
- Entre o betão e a resina;
- Na resina;
- Entre a resina e FRP.

O comportamento da colagem pode falhar por:

- Descolamento na zona de ancoragem;
- Descolamento causado nas fendas de flexão;
- Descolamento causado na movimentação de fendas de corte;
- Descolamento causado pelas irregularidades na superfície de betão.

5.5.2.1 Ligação perfeita entre o betão e o FRP

Em primeira instância, considera-se que os modos de rotura ocorrem com a hipótese de ligação perfeita entre o compósito e o betão. Desta forma consegue calcular-se a área necessária de FRP que verifica o critério de segurança, $M_{Rd} \geq M_{Sd}$ (Bulletin 14 *fib*:01, 2001).

Onde M_{Rd} é o valor do momento fletor resistente e M_{Sd} é o valor de cálculo do momento fletor atuante.

O valor do momento resistente é limitado pela deformação máxima de cada elemento da estrutura (seja o betão, aço ou FRP). A secção considera-se com o seu máximo momento resistente quando um dos materiais atingir a sua deformação máxima.

5.5.2.1.1 Cedência do aço seguida de esmagamento do betão

Para o modo de rotura que pode ocorrer por cedência da armadura seguida de esmagamento do betão mantendo-se intacto o FRP, a posição do eixo neutro pode ser obtida pelo equilíbrio das forças binárias internas da secção (Bulletin 14 *fib*:01, 2001):

$$0,85\Psi f_{cd}bx + A_{s2}E_s\varepsilon_{s2} = A_{s1}f_{yd} + A_fE_{fu}\varepsilon_f \text{ (equação a)}$$

Sendo $\Psi = 0,8$; $A_fE_{fu}\varepsilon_f$ a força provocada pelo FRP à tração; $A_{s2}E_s\varepsilon_{s2}$ a força provocada pela armadura superior à compressão e $A_{s1}f_{yd}$ a força provocada pela armadura inferior à tração.

As extensões ε_{s2} e ε_f podem ser determinadas a partir das seguintes expressões, que resultam de proporcionalidade direta do diagrama de tensão (Bulletin 14 *fib*:01, 2001):

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu} \frac{x-d_2}{x} \text{ (equação b)}$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \frac{h-x}{x} - \varepsilon_0 \text{ (equação c)}$$

A expressão para determinar a extensão do FRP apresenta uma simplificação dimensional. Em termos exatos, a força de tração provocada pelo FRP encontra-se no centro de gravidade do FRP ($\frac{t_f}{2}$), sendo t_f a espessura do FRP. Na expressão considera-se que a força se encontra na superfície inferior da secção transversal. Em suma, a distância ao eixo neutro deveria ser $(h - x + \frac{t_f}{2})$ e

consta $(h - x)$. Este facto é aceitável pela reduzida espessura do compósito em laminados e ainda mais desprezável em compósitos de tecidos.

O valor resultante de $E_s \varepsilon_{s2}$ não deve exceder a resistência de cálculo do aço f_{yd} e o valor de ε_{cu} é limitado em 3,5 ‰. Note-se que neste cálculo é utilizado o diagrama simplificado de tensão de betão retangular (figura 35).

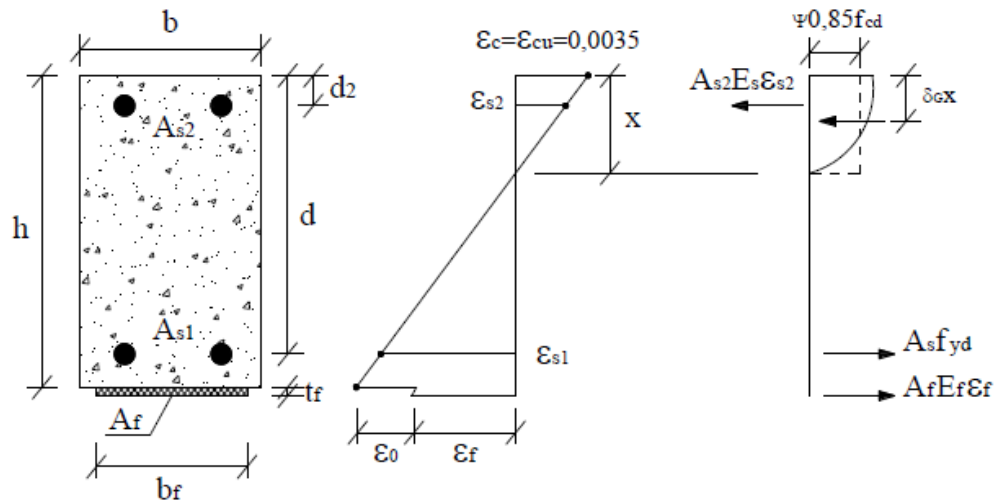


Figura 35 - Secção de betão armado reforçado com FRP para ELU

[Fonte: Bulletin 14 fib:2001: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures]

Admitindo uma área de FRP e sabendo as extensões no FRP, na armadura superior e inferior, pode calcular-se o valor do momento resistente da secção reforçada, M_{Rd} , escrevendo a equação de momento do ponto intermédio do retângulo simplificado, isto é, momento feito em função da força de compressão no betão (Bulletin 14 fib:01, 2001):

$$M_{Rd} = A_{s1} f_{yd} (d - \delta_G x) + A_f E_f \varepsilon_f (h - \delta_G x) + A_{s2} E_s \varepsilon_{s2} (\delta_G x - d_2) \quad (\text{equação } d)$$

Onde $\delta_G = 0.4$, considerando que o comprimento do retângulo de compressão simplificado representa 80% do comprimento do eixo neutro (x).

A área de FRP é considerada como suficiente quando o critério $M_{Rd} \geq M_{Sd}$ for cumprido e também quando verificar as seguintes condições (Bulletin 14 fib:01, 2001):

- a) Cedência de armadura inferior de reforço à flexão

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu} \frac{d - x}{x} \geq \frac{f_{yd}}{E_s}$$

Significa que a extensão da armadura inferior ultrapassa a extensão máxima (extensão de rotura) do aço.

b) Limitação da extensão no FRP à extensão limite última, ε_{fud}

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \frac{h - x}{x} - \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{fud}$$

5.5.2.1.2 Cedência do aço seguida da rotura de FRP (devido a baixas percentagens de aço e FRP)

As expressões que permitem a obtenção da área necessária de FRP nesta consideração consistem da *equação a* à *equação d*, do ponto 5.5.2.1.1. (Bulletin 14, fib:01, 2001).

O procedimento de cálculo, para este modo de rotura, é bastante semelhante ao modo de rotura de cedência do aço seguida de esmagamento do betão, tendo as seguintes modificações:

- ε_{cu} é substituído por ε_c ;
- ε_f é substituído por ε_{fu} ;
- Os parâmetros Ψ e δ_G são dados por:

$$\Psi = \begin{cases} 1000\varepsilon_c \left(0,5 - \frac{1000}{12} \varepsilon_c \right), & \varepsilon_c \leq 0,002 \\ 1 - \frac{2}{3000\varepsilon_c}, & 0,002 \leq \varepsilon_c \leq 0,0035 \end{cases}$$

$$\delta_G = \begin{cases} \frac{8 - 1000\varepsilon_c}{4(6 - 1000\varepsilon_c)}, & \text{para } \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{1000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c - 4) + 2}{2000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c - 2)}, & \text{para } 0,002 \leq \varepsilon_c \leq 0,0035 \end{cases}$$

Nota: Repare-se que estes critérios consideram a redução da capacidade de deformação do betão nas suas condições.

5.5.2.2 Perda da ligação perfeita entre o compósito e o betão

Quando se considera a hipótese de perda de ligação perfeita entre o FRP e o betão, são também considerados quatro tipos de falha de ligação na interface, que são (Bulletin 14 *fib*:01, 2001):

1. Descolamento devido a movimentos em fendas de corte;
2. Descolamento devido à formação de fendas de corte na extremidade do reforço;
3. Descolamento na zona de ancoragem e por concentração de tensões em fendas de flexão;
4. Descolamento provocado por irregularidades na superfície de betão.

5.5.2.2.1 Descolamento causado na movimentação de fendas de corte

O descolamento causado pela força de corte ainda não foi estudada com detalhe pela comunidade científica, no entanto existem estudos que permitem dimensionar o reforço de FRP para suportar as forças de corte (Rodrigues, 2009). O modelo de Deuring (1993) é provavelmente o mais compreensível até à data, no entanto a sua aplicação torna-se complicada. O estudo de Blaschko (1997) propõe que o descolamento devido a forças de corte pode ser prevenido limitando o esforço de corte atuante ao esforço de corte resistente, V_{Rd1} , para elementos de betão armado sem armadura de esforço transversal. O cálculo de V_{Rd1} é feito segundo as considerações do EC2, contemplando as seguintes modificações para o valor característico de resistência ao corte do betão τ_{Rk} e para a relação longitudinal equivalente de armadura, ρ_{eq} , de acordo com o Bulletin 14 *fib*:01, 2001.

$$\tau_{Rk} = 0,15f_{ck}^{1/3}$$

$$\rho_{eq} = \frac{A_s + A_f \frac{E_f}{E_s}}{bd}$$

Se se verificar a situação de esforço de corte atuante superior ao esforço de corte resistente, deve ser previsto um reforço ao esforço transversal no elemento, para que seja verificada a seguinte condição (Bulletin 14 *fib*:01, 2001):

$$V_{Sd} \leq V_{Rd}$$

A análise ao esforço de corte centra-se nos esforços de corte aplicados ao compósito à flexão, isto é, verifica-se neste ponto a influência do esforço de corte na ligação do compósito colado para resistir ao esforço de flexão. O dimensionamento para o esforço ao corte é abordado no ponto 5.6.

5.5.2.2.2 Descolamento devido à formação de fendas de corte na extremidade do reforço

Para se verificar se o descolamento ocorre devido à formação de fendas de corte na extremidade do reforço, a seguinte condição deve ser respeitada (Bulletin 14 *fib*:01, 2001):

$$V_{Sd} \leq V_{Rd}$$

Sendo:

$$V_{Rd} = \tau_{Rd} \times b \times d$$

$$\tau_{Rd} = 0,15 \times \sqrt[3]{3 \times \frac{d}{a_L} \times \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right) \times \sqrt[3]{100 \times \rho_s \times f_{ck}}}$$

$$a_L = \sqrt[4]{\frac{(1 - \sqrt{\rho_s})^2}{\rho_s} \times d \times L^3}; \rho_s = \frac{A_{s1}}{bd}$$

a_L é o comprimento desde o apoio até à profundidade da fenda provocada na extremidade do reforço, conforme a figura 36.

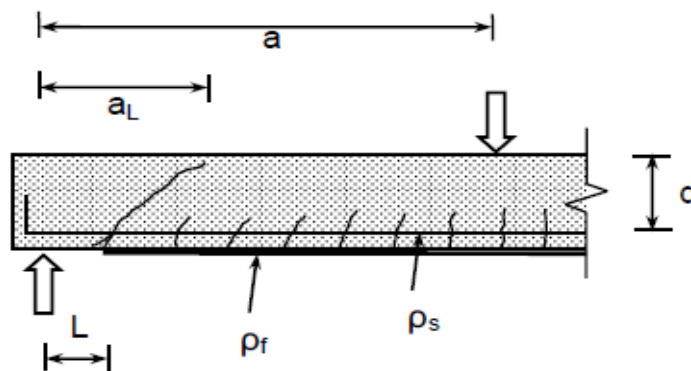


Figura 36 - Esquema de fendilhação por corte na zona de ligação

[Fonte: Bulletin 14 *fib*:2001: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures]

5.5.2.2.3 Descolamento na zona de ancoragem e por concentração de tensões em fendas de flexão

Para a verificação deste modo de rotura, o Apêndice “ULS Verification of Peeling-off at the end Anchorage and at Flexural Cracks”, do Bulletin 14 *fib*:01, propõe três metodologias de verificação:

- Verificação da zona de ancoragem e limitação da extensão no FRP;

- Verificação da zona de ancoragem e transferência das forças do FRP para o betão;
- Verificação de acordo com a linha envolvente de tensões por tração no FRP.

No entanto, o documento apenas faz foco nas duas primeiras metodologias referidas. Por razões de organização, considere-se o seguinte:

- Metodologia 1 - Verificação da zona de ancoragem e limitação da extensão no FRP;
- Metodologia 2 - Verificação da zona de ancoragem e transferência das forças do FRP para o betão.

Metodologia 1 - Verificação da zona de ancoragem e limitação da extensão no FRP

Esta metodologia permite a avaliação do esforço máximo de tração imposto na zona de ancoragem, do comprimento de ancoragem mínimo e da limitação de extensão do FRP ($\epsilon_{f,lim}$).

O Bulletin 14 *fib:01* propõe um valor de extensão limite compreendido entre os 6,5‰ e os 8,5‰.

A metodologia, no que se refere à verificação da zona de ancoragem, foi proposta por Neubauer e Rostásky (1997) e permite a quantificação da força máxima de tração no compósito que provoca o seu descolamento, $N_{fa,max}$, bem como o comprimento efetivo de ancoragem, l_b , (Bulletin 14 *fib:01*, 2001).

Consegue evitar-se o descolamento do FRP limitando a força de tração instalada no compósito, com recurso ao comprimento de amarração disponível na estrutura em reforço.

O comprimento máximo de ancoragem, $l_{b,max}$, calcula-se a partir da seguinte expressão (Bulletin 14 *fib:01*, 2001):

$$l_{b,max} = \sqrt{\frac{E_f t_f}{c_2 f_{ctm}}} \quad (mm)$$

Onde c_2 corresponde a uma constante de calibração experimental (caso não haja possibilidade de determinar a constante de calibração, o documento recomenda o uso de $c_2 = 2$); t_f é a espessura do reforço de FRP (em mm); E_f é o módulo de elasticidade do compósito (em MPa) e f_{ctm} é a resistência à tração do betão (em MPa) (Bulletin 14 *fib:01*, 2001).

A força máxima, $N_{fa,max}$, que pode ser aplicada ao FRP, sem recurso a sistemas de ancoragem adicionais, é dada pela expressão (Rodrigues, 2009):

$$N_{fa,max} = \alpha \times c_1 \times k_c \times k_b \times b \times \sqrt{E_f t_f f_{ctm}} \quad (N)$$

O valor de α é um fator de redução ($\alpha = 0,9$, para vigas); c_1 é uma constante que deve ser obtida por calibração experimental (na impossibilidade de se efetuar a calibração, o documento aconselha o uso de $c_1 = 0,64$); k_c é um fator que depende da qualidade do betão (geralmente utiliza-se $k_c = 1,0$, mas para betões de baixa qualidade usa-se $k_c = 0,67$); e k_b é um fator geométrico que é dado por (Rodrigues, 2009):

$$k_b = 1,06 \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{400}}} \geq 1 \text{ e } \frac{b_f}{b} \geq 0,33$$

Para comprimento de ancoragem $l_b \leq l_{b,max}$, a força máxima aplicada no FRP é calculada de acordo com Holzenkämpfer (1994) (Bulletin 14.fib:01, 2001):

$$N_{fa} = N_{fa,max} \frac{l_b}{l_{b,max}} \left(2 - \frac{l_b}{l_{b,max}}\right)$$

Metodologia 2 - Verificação da zona de ancoragem e transferência das forças do FRP para o betão

Esta metodologia impõe que a tensão de corte na interface, τ_b , respeite a condição (Rodrigues, 2009):

$$\tau_b \leq f_{cbd}$$

Onde f_{cbd} é a resistência do betão ao corte e é dada por (Rodrigues, 2009):

$$f_{cbd} = 1,8 \times \frac{f_{ctk0,05}}{\gamma_c}$$

Sendo $f_{ctk0,05}$ a resistência do betão à tração para quantilho 5% (MPa) e γ_c o coeficiente de segurança do betão.

A condição $\tau_b \leq f_{cbd}$ deve ser verificada para duas regiões distintas. Uma é a região onde a armadura ordinária à flexão se encontra em regime plástico ($\varepsilon_{s1} < \varepsilon_{syd}$) e outra é a região onde a armadura ordinária se encontra em regime plástico ($\varepsilon_{s1} \geq \varepsilon_{syd}$) (Rodrigues, 2009).

Para tais verificações, aplicam-se as respetivas expressões (Rodrigues, 2009):

$$\text{Regime elástico, } \varepsilon_{s1} < \varepsilon_{syd}, \text{ então } \frac{V_{sd}}{0,95 \times d \times b_f \left(1 + \frac{A_s \times E_s}{A_f \times E_f}\right)} \leq f_{cbd}$$

$$\text{Regime plástico, } \varepsilon_{s1} \geq \varepsilon_{syd}, \text{ então } \frac{V_{sd}}{0,95 \times d \times b_f} \leq f_{cbd}$$

Onde V_{sd} é o valor do esforço transversal atuante na secção onde ocorre a plastificação das armaduras ordinárias.

5.5.2.2.4 Descolamento causado por irregularidades na superfície de betão

O descolamento causado por irregularidades na superfície de betão é outro modo de rotura que deve ser verificado, adotando critérios de controlo de qualidade na preparação da superfície de betão, de modo a evitar ou reduzir as irregularidades (Rodrigues, 2009).

5.5.3 ESTADOS LIMITES DE SERVIÇO (ELS)

Após as verificações referidas no Bulletin 14 *fib*:01 para o ELU, a solução aconselhável para reforço deverá estar em conformidade com a verificação para o Estado Limite de Serviço (ELS).

Os estados limites de serviço que terão de ser verificados são a limitação de tensões, a limitação da deformação e o controlo de fendilhação (Rodrigues, 2009).

Para a verificação de ELS é necessário conhecer a posição do eixo neutro e o momento de inércia da secção fendilhada para as combinações de ações quase-permanentes e características.

Tendo em conta as extensões existentes no elemento antes do reforço, a análise torna-se dependente do momento atuante no elemento. Assumindo um comportamento linear elástico do sistema compósito e desprezando a resistência à tração do betão, a análise da secção fendilhada é realizada com base no equilíbrio do binário de forças internas que constam na figura 37.

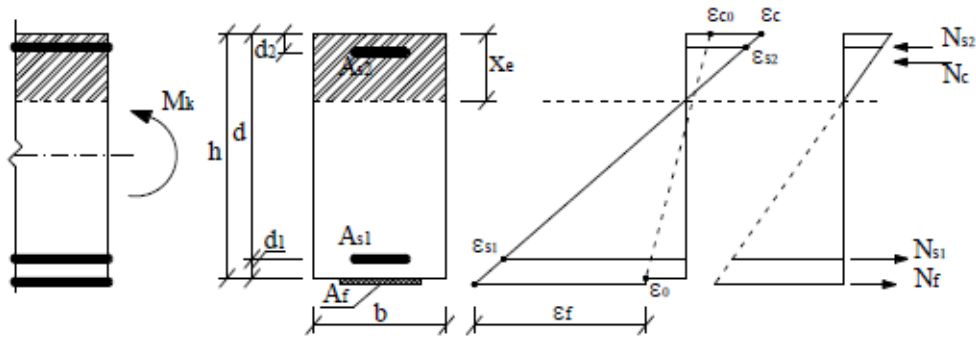


Figura 37 - Secção de betão armado reforçada com FRP para ELS

[Fonte: Bulletin 14 *fib*:2001: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures]

A expressão que permite determinar a posição do eixo neutro, x_e , é feita de forma semelhante à condição inicial, mas neste caso considera-se a influência da força do FRP (Bulletin 14 *fib*:01, 2001).

$$\frac{1}{2}bx_e^2 + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_e - d_2) = \alpha_s A_{s1}(d - x_e) + \alpha_f A_f \left[h - \left(1 + \frac{\epsilon_0}{\epsilon_c} \right) x_e \right]$$

Onde $\alpha_f = \frac{E_f}{E_c}$. Para valores de extensão inicial, ϵ_0 (valores muito baixos), o termo $\left(1 + \frac{\epsilon_0}{\epsilon_c} \right)$ torna-se aproximadamente 1, podendo a equação anterior ser diretamente resolvida em ordem a x_e (Bulletin 14 *fib*:01, 2001).

“No entanto, para valores elevados de ϵ_0 , quando comparados com a extensão do betão, ϵ_c , na fibra mais comprimida, a posição do eixo neutro e a extensão no betão são determinados por meio iterativo das equações” a) e b) (Rodrigues, 2009):

$$a) \frac{1}{2}bx_e^2 + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_e - d_2) = \alpha_s A_{s1}(d - x_e) + \alpha_f A_f \left[h - \left(1 + \frac{\epsilon_0}{\epsilon_c} \right) x_e \right]$$

$$b) E_c \epsilon_c = \frac{M_k}{\frac{1}{2}bx_e \left(h - \frac{x_e}{3} \right) + (\alpha_s - 1)A_{s2} \frac{(x_e - d_2)(h - d_2)}{x_e} - \alpha_s A_{s1} \frac{(d - x_e)(h - d)}{x_e}}$$

O momento de inércia da secção fendilhada, I_2 , tal como o eixo neutro, x_e , depende do momento atuante, e pode ser calculado pela seguinte expressão (Bulletin 14 *fib*:01: 2001):

$$I_2 = \frac{bx_e^3}{3} + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_e - d_2)^2 + \alpha_s A_{s1}(d - x_e)^2 + \alpha_f A_f (h - x_e)^2$$

5.5.3.1 Limitação das tensões

A limitação de tensões, em Estado Limite de Serviço, permite o dimensionamento de reforço de modo a prevenir danos ou fluência excessiva no betão, cedência no aço e fluência excessiva ou rotura por fluência no reforço FRP. A aplicação de reforço de FRP altera substancialmente as tensões instaladas no betão. Se as tensões instaladas no betão, devido ao reforço, forem demasiado elevadas pode surgir o aparecimento de fendas longitudinais e extensões residuais. Por este motivo é imposto, pelo Bulletin 14 *fib*:01, um valor limite de tensão no betão conforme estipulado no EC2.

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c \leq \begin{cases} 0,60 f_{ck} & \text{para combinações raras} \\ 0,45 f_{ck} & \text{para combinações quase permanentes} \end{cases}$$

Para prevenir a cedência do aço em Serviço, o EC2 especifica:

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_c \frac{d - x_e}{x_e} \leq 0,80 f_{yk} \text{ para combinações raras}$$

A tensão no FRP em serviço deve ser limitada para a combinação de ações quase-permanentes (Bulletin 14 *fib*:01, 2001):

$$\sigma_f = E_f \left(\varepsilon_c \frac{h - x_e}{x_e} \right) \leq \eta f_{fk}$$

Com o valor de $\eta = 0,8$, para compósito de fibra de carbono (CFRP).

5.5.3.2 Limitação da deformação

Considera-se que as condições de utilização de uma viga são alteradas quando as cargas, em serviço para combinações quase-permanentes, provocam uma flecha (a) superior a $\frac{L}{250}$ (Rodrigues, 2009).

O método de cálculo simplificado para limitação da deformação, é realizado usando o método bilinear CEB (1993), que permite obter previsões de deformação razoáveis em ELS. De acordo com este método a flecha média pode ser obtida por (Bulletin 14 *fib*:01, 2001):

$$a = a_1(1 - \zeta_b) + a_2 \zeta_b$$

Onde a_1 e a_2 são as flechas em estado não fendilhado e estado fendilhado, respetivamente. E ζ_b é o coeficiente de distribuição de tensões, obtido em função do momento atuante (M_k) e o momento de fendilhação (M_{cr}) (Bulletin 14 *fib*:01, 2001).

$$\zeta_b = 0 \quad \text{se } M_k < M_{cr}$$

$$\zeta_b = 1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{M_{cr}}{M_k} \right)^{\frac{n}{2}} \quad \text{se } M_k > M_{cr}$$

Os coeficientes β_1 e β_2 têm em conta as características da colagem do reforço de FRP e do tipo de carregamento no elemento, respetivamente. No entanto, o comportamento do reforço externo difere do comportamento do aço. Um consenso entre resultados analíticos e experimentais foi sugerido por Matthys (2000), em que os coeficientes β_1 e β_2 são retirados conforme especificado no EC2 ($\beta_1 = 0,5$ para aço macio e $\beta_1 = 1,0$ para aço nervurado; $\beta_2 = 0,5$ para carregamentos de curta duração e $\beta_2 = 1,0$ para carregamentos de longa duração) (Bulletin 14 *fib*:01, 2001).

De acordo com CEB (1993) (extraído de Bulletin 14 *fib*:01, 2001) o expoente $\frac{n}{2} = 1$, assumindo o valor de $n = 2$ (classes de betão até C30/35). Para betão altamente resistente (classes superiores a C30/35) obtém-se maior rigidez, com $n = 3$ (Lambotte and Taerwe, 1990).

As flechas em secção não fendilhada (a_1) e em secção fendilhada (a_2) são obtidas pelas equações que derivam da análise elástica clássica (Bulletin 14 *fib*:01, 2001):

$$a_1 = k_M \times l^2 \times \frac{M_k}{E_c I_1}$$

$$a_2 = k_M \times l^2 \times \left(\frac{M_0}{E_c I_{02}} + \frac{M_k - M_0}{E_c I_2} \right) \quad \text{para } M_k > M_0$$

Onde k_M é um coeficiente que depende do tipo de carregamento e das condições de apoio; I_{02} é o momento de inércia na secção fendilhada antes do reforço; M_0 é o momento atuante antes do reforço e M_k é o momento atuantes após o reforço (Bulletin 14 *fib*:01, 2001).

5.5.3.3 Controlo da fendilhação

Para proteção do aço interno e para garantir a funcionalidade do elemento, a largura das fendas deve ser limitada. Para vigas de betão armado com reforço externo de FRP, novas fendas se irão formar entre as fendas já existentes, resultando em fendas compactas e com pequena largura, o que faz com que não seja necessária a verificação de largura de fenda (Bulletin 14 *fib*:01, 2001).

Assumindo fendilhação estabilizada, o valor característico da largura de fenda é calculado de acordo com o EC2 (Bulletin 14 *fib*:01, 2001):

$$w_k = \beta \times s_{rm} \times \varepsilon_{rm,r} = \beta \times s_{rm} \times \zeta \times \varepsilon_2$$

Onde $\beta = 1,7$ e representa um coeficiente que relaciona o valor médio e característico de largura de fenda, s_{rm} representa o espaçamento médio entre fendas, ζ representa o coeficiente de distribuição de tensões e ε_2 representa a extensão da armadura em regime fendilhado (Bulletin 14 *fib*:01, 2001).

O coeficiente de distribuição de tensões, em função dos momentos M_k e M_{cr} , é dado por (Bulletin 14 *fib*:01, 2001):

$$\zeta = 0 \quad \text{se } M_k < M_{cr}$$

$$\zeta = 1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{M_{cr}}{M_k} \right)^n \quad \text{se } M_k > M_{cr}$$

A extensão da armadura em regime fendilhado, ε_2 , pode ser determinado pela seguinte expressão (Bulletin 14 *fib*:01, 2001):

$$\varepsilon_2 = \frac{N_{rk} + E_f A_f \varepsilon_0}{E_s A_{s1} + E_f A_f}$$

$$N_{rk} = \frac{M_k}{0,9d}$$

O espaçamento médio entre fendas (s_{rm}) pode ser calculada conforme Rostásy (1996):

$$s_{rm} = \frac{2 \times f_{ctm} \times A_{c,eff}}{\tau_{sm} \times u_s} \frac{E_s \times A_{s1}}{E_s \times A_{s1} + \zeta_b \times E_f \times A_f} = \frac{2 \times f_{ctm} \times A_{c,eff}}{\tau_{fm} \times u_f} \frac{\zeta_b \times E_f \times A_f}{E_s \times A_{s1} + \zeta_b \times E_f \times A_f}$$

Em que:

f_{ctm} – resistência média do betão à tração;

τ_{fm} – tensão média de aderência do FRP ($\tau_{fm} = 1,25f_{ctm}$)

u_f – perímetro de aderência do reforço FRP;

A_f – área de secção transversal do reforço FRP;

E_f – módulo de elasticidade do reforço FRP;

A_{s1} – área de armadura longitudinal inferior;

E_s – módulo de elasticidade do aço;

ζ_b – parâmetro de aderência;

$A_{c,eff}$ – área efetiva de betão tracionado.

Para $A_{c,eff}$ toma-se o mínimo valor de:

$$A_{c,eff} = \min \left\{ 2,5(h - d)b ; \frac{(h - x)b}{3} \right\}$$

h - altura da secção transversal do elemento;

d - altura útil da secção transversal do elemento;

b - largura da secção transversal do elemento;

x - distância da fibra extrema mais comprimida ao eixo neutro determinado em secção fendilhada.

De acordo com o Bulletin 14.fib:01 (2001), o parâmetro de aderência, ζ_b , é dado por:

$$\zeta_b = \frac{\tau_{fm} E_s d_s}{\tau_{sm} E_f 4t_f}$$

Em que:

d_s - é o diâmetro médio dos varões de armadura;

t_f - espessura do reforço de FRP;

τ_{sm} - tensão média das armaduras ordinárias ($\tau_{sm} = 1,8 f_{ctm}$)

5.6 REFORÇO DE FRP AO CORTE

O reforço ao corte é calculado com base nos Estados Limites Últimos, sendo usada a combinação fundamental de ações que consta no EC2 (Bulletin 14 *fib*:01, 2001).

O Estado Limite de Serviço não requer qualquer imposição verificativa para o dimensionamento de reforço ao corte (Rodrigues, 2009).

O caso mais comum de reforço consiste em colocar a direção das fibras perpendicularmente ao eixo longitudinal do elemento a reforçar, pelo facto de ter uma maior facilidade de aplicação. No entanto, a maximização do reforço da fibra seria a sua colocação com um ângulo de 45° que se aproxima do ângulo formado pelas fendas provocadas pelas forças de corte.

O modelo de cálculo usado pelo Bulletin 14 *fib*:01 baseia-se nos modelos de Triantafillou (1998) e Taljsten (1999), que propõem que o reforço ao corte deve ser tratado de forma análoga ao reforço de aço interno, considerando que o compósito apenas resiste a esforços na direção principal das fibras. Tendo em conta a consideração anterior, a força resistente de corte pode ser determinada de acordo com o valor mínimo de:

$$V_{Rd} = \min(V_{cd} + V_{wd} + V_{fd} ; V_{Rd2})$$

Em que V_{cd} é a contribuição do betão para a resistência do elemento ao esforço transversal, V_{wd} é a contribuição da armadura para a resistência do elemento ao esforço transversal, V_{fd} é a contribuição do FRP para a resistência do elemento ao esforço transversal e V_{Rd2} é o esforço transversal resistente máximo.

Segundo o Bulletin 14 *fib*:01 (2001), a capacidade resistente do FRP, V_{fd} , pode ser determinada por:

$$V_{fd} = 0.9 \times \varepsilon_{fd,e} \times E_{fu} \times \rho_f \times b_w \times d \times (\cot \theta + \cot \alpha) \times \sin \alpha$$

Onde:

$\varepsilon_{fd,e}$ – extensão efetiva de cálculo do FRP;

E_{fu} – é o valor máximo do módulo de elasticidade na direção das fibras;

b_w – é a largura mínima da secção transversal;

d – é a altura útil da secção;

θ – é o ângulo que as fendas diagonais fazem em relação ao eixo do elemento;

α - é o ângulo que a direção principal das fibras faz em relação ao eixo do elemento;

ρ_f – é a percentagem de reforço de FRP.

$$\rho_f = \frac{2t_f \sin \alpha}{b_w}, \text{ para reforço contínuo com espessura } t_f ;$$

$$\rho_f = \frac{2t_f b_f}{b_w s_f}, \text{ para reforço em tiras ou folhas com largura } b_f \text{ e espaçamento } s_f.$$

O valor de cálculo da extensão efetiva do FRP é dado pela divisão do valor característico ($\varepsilon_{fk,e}$) pelo fator de segurança (γ_f). No caso de insuficiência de informação, o valor de $\varepsilon_{fk,e}$, pode ser aproximado pela multiplicação entre o valor médio de extensão efetiva de FRP, $\varepsilon_{f,e}$ e um fator de redução $k=0,8$ (Bulletin 14.fib:01, 2001).

$$\varepsilon_{fk,e} = k\varepsilon_{f,e}$$

O coeficiente do fator de segurança parcial (γ_f) é retirado da tabela 2, de acordo com o tipo de sistema de reforço, ou $\gamma_f = 1.30$ se a rotura da ligação for devido a peeling-off.

Algumas pesquisas propõem que o valor da extensão efetiva deve ser limitada ao valor máximo de 6,0 ‰, de modo a manter a integridade do betão e a correta mobilização da interligação dos agregados (Bulletin 14.fib:01, 2001).

O valor de $\varepsilon_{f,e}$ é determinado em função do tipo de reforço (Bulletin 14.fib:01, 2001):

- Sistema de reforço fechado (ou devidamente ancorado):

$$\varepsilon_{f,e} = 0,17 \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0,30} \varepsilon_{fu}$$

- Sistema de reforço lateral ou em U:

$$\varepsilon_{f,e} = \min \left[0,65 \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0,56} \times 10^{-3} ; 0,17 \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0,30} \varepsilon_{fu} \right]$$

O esforço de corte não exige um reforço em todo o comprimento longitudinal do elemento, pelo que se poderá recorrer à dispensa de reforço, de forma semelhante ao que sucede com a dispensa de armadura longitudinal e transversal em estruturas de betão armado (Rodrigues, 2009).

A distância de dispensa de armadura (x) é medida a partir das extremidades do reforço para o interior, conforme a ilustra a figura 38.

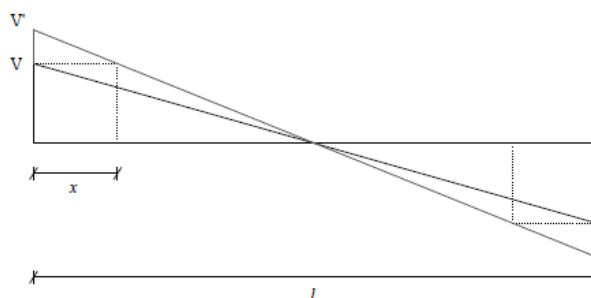


Figura 38 - Diagrama de esforço transversal (cálculo de dispensa de reforço ao corte)

[Fonte: Reforço de Estruturas com FRP's – Rodrigues, Tiago (2009); Dissertação para obtenção de grau de Mestre]

Calcula-se o valor do esforço de corte no elemento antes da aplicação de cargas para as quais se reforça o elemento (V) e o valor do esforço de corte no elemento após a aplicação de cargas para as quais se reforça o elemento (V'), através das seguintes expressões (Rodrigues, 2009):

$$V = \frac{P_{sd} \times L}{2} - P_{sd} \times x ; V' = \frac{P_{sd}' \times L}{2} - P_{sd}' \times x$$

Em que:

P_{sd} – carga inicial atuante;

P_{sd}' - carga atuante após o reforço;

L – comprimento do elemento.

No caso do reforço ao corte ser feito numa secção circular, por exemplo, pilar circular, a expressão para o cálculo do esforço de corte é dada da seguinte forma (Bulletin 14 fib:01, 2001):

$$V_{fd} = \frac{\varepsilon_{m\acute{a}x}}{\gamma_f} \times \varepsilon_{fu} \times \rho_f \times \frac{1}{2} \times \frac{\pi \times D^2}{4} \times \cot\theta$$

Em que:

D – diâmetro do elemento;

ρ_f – percentagem de reforço FRP;

$\varepsilon_{m\acute{a}x}$ – extensão máxima (recomendado em 0,006).

5.7 COMENTÁRIO DE DIMENSIONAMENTO NA PRÁTICA

O dimensionamento em fase de projeto não assume, na prática, a complexidade teórica que se pressupõe nos métodos de cálculo estrutural tradicionais e que os guias técnicos elaborados a nível internacional particularizam. Destaque-se que o comentário incide, única e exclusivamente, à experiência quotidiana do autor em ambiente de estágio.

A realidade de um reforço estrutural através de fibra de carbono, na grande maioria dos casos, surge quando existe uma necessidade emergente de reforço. Tal facto, necessita de celeridade por parte dos projetistas na execução de um projeto, o que provoca um dimensionamento baseado na experiência dos gabinetes de projeto, sem que sejam previstos todos os processos de cálculo que foram expostos anteriormente.

Os modelos de cálculo baseiam-se num reforço feito na totalidade com compósitos de fibra de carbono, contrariamente ao que acontece na prática por diversos motivos. Atualmente, o reforço com fibra de carbono é muitas vezes combinado com outras soluções, como por exemplo lajes de compressão para resistir a momentos negativos, funcionando em conjunto com a fibra de carbono que resiste a momentos positivos se colocada na face inferior da laje.

A grande diferença de um dimensionamento de estrutura para um dimensionamento de reforço é a realidade com que se deparam as duas situações. No dimensionamento da estrutura, não existe naturalmente a estrutura e as soluções são previstas para suportar as ações calculadas conforme as normas técnicas. No dimensionamento de reforço, a estrutura existente pode não coincidir com a estrutura de projeto, pelo que não se podem assumir as características de projeto, mas sim as do local. Por outro lado, os testes de verificação da disposição de armadura, resistência do betão, recobrimento mínimo, entre outros, torna-se dispendioso somando ao custo do reforço, o que faz com que se opte muitas vezes por sobredimensionar o reforço de fibra de carbono, suprimindo as verificações mecânicas do estado da estrutura. O desconhecimento do estado real da estrutura

impede que os projetistas procedam ao dimensionamento correto do sistema por falta de dados que constam dos modelos para cálculo.

De uma forma resumida podem considerar-se os seguintes motivos para o dimensionamento baseado na experiência e não nos modelos de cálculo:

- Rapidez de execução de projetos para situações emergentes;
- Combinação de soluções de reforço não assumidas nos modelos de cálculo;
- Falta de conhecimento das reais condições da estrutura.

Por forma a melhorar os processos de dimensionamento, é necessário que exista uma cooperação entre todas as entidades intervenientes, sejam elas diretas ou indiretas. As entidades passam pela comunidade científica, que desenvolve os conceitos teóricos e práticos do sistema; os fornecedores, que devem assegurar que os seus materiais cumprem os requisitos exigíveis segundo os padrões sugeridos pela comunidade científica; os projetistas, que devem assegurar que o projeto é feito de acordo com os modelos de cálculo respetivos e que respeita as verificações de segurança estipuladas e finalmente os aplicadores, que devem assegurar que a aplicação é feita de acordo com o especificado pelo fornecedor e projetista.

6 Situação de incêndio

6.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E OPINIÃO CRÍTICA

A situação de incêndio é considerada, atualmente, uma das particularidades, de reforço estrutural com compósito de fibra de carbono, mais sensíveis entre os profissionais da área (Juvandes, 2002).

A opinião sobre a obrigatoriedade de verificação da resistência ao fogo do compósito divide-se e tem-se tornado num “ponto crítico” no avanço de mercado desta tecnologia.

Numa situação de incêndio, a resina do compósito compromete, após ultrapassar a sua temperatura de transição vítrea (T_g), a continuidade de ação de reforço da fibra de carbono. Isto é, o compósito deixa de atuar como elemento de reforço quando a resina (elemento mais sensível em exposição ao fogo), perde a sua característica sólida em consequência do início do estado líquido. Com a transição de estados, a resina perde essencialmente a sua capacidade de aderência entre os laminados ou tecidos e o betão, provocando o descolamento do compósito.

Pelo motivo de descolamento, muitos projetistas preferem utilizar soluções convencionais admitindo que a situação de incêndio põe em risco a segurança da estrutura quando são utilizados sistemas de compósito de fibra de carbono. De facto, a situação de incêndio traduz um risco de colapso em qualquer estrutura e em qualquer tipo de reforço.

Por regra, a verificação a um cenário de incêndio numa estrutura a reforçar, deve ser feita antes da mesma ser reforçada. Isto é, a própria estrutura sem reforço estrutural deve suportar o tempo mínimo de resistência ao fogo, não tendo que existir dependência do reforço estrutural para que a resistência ao fogo seja verificada. De acordo com vários documentos publicados, as consequências de rotura do reforço devem ser sempre encaradas como uma situação de risco possível, sendo que geralmente é exigido que a estrutura, com ruína do reforço, possa suportar as ações permanentes e a uma percentagem de ações variáveis (Juvandes, 2002; Azevedo, 2008; Tarso, 2005; Rodrigues, 2009; Bulletin 14 *fib*:01, 2001).

De acordo com a NP EN 1990:2009 Eurocódigo – Bases para o projecto de estruturas, “As estruturas devem ser projectadas e construídas de modo a que durante o seu período de vida previsto, com graus de fiabilidade apropriados e de forma económica: - possam suportar todas as ações e influências susceptíveis de ocorrerem durante a sua execução e utilização”. Além de mais, o risco de rotura do reforço deve ser sempre contemplado, seja numa situação de incêndio, de vandalismo, de acidente, etc. Desde a década de setenta recomenda-se que o reforço posterior de estruturas existentes não exceda mais de 50% da sua resistência atual (Juvandes, 2002). O próprio

Bulletin 14 *fib*:01 prevê uma limitação de reforço, conforme descrito no ponto 5.5 deste documento. Essa recomendação surge no sentido de impedir que a rotura de um reforço provoque o colapso da estrutura, seja ela resultado de qualquer tipo de ação.

No caso de fogo, a capacidade resistente do elemento, antes de ser executado o reforço, deve ser reduzida para atender aos efeitos de duração da exposição ao fogo. Poder resumir-se que o elemento não reforçado deve respeitar a seguinte condição (Azevedo, 2008):

$$\theta = \frac{M_{Rk,0}}{M_{skf}} > 1$$

Sendo que $M_{Rk,0}$ é o valor característico do momento resistente do elemento não reforçado (reduzido no caso do fogo) e M_{skf} é o valor do momento atuante correspondente à combinação quase-permanente de ações prevista para o elemento a reforçar (Azevedo, 2008).

O Comité 440 do ACI (American Concrete Institute) e o ISIS (Intelligent Sensing for Innovative Structures) estabelecem que um elemento de betão armado, inicialmente reforçado por colagem exterior de FRP, após ter perdido o reforço por causas acidentais, deve possuir capacidade resistente suficiente para resistir à seguinte combinação de ações (Azevedo, 2008):

$$(\phi R_n)_{existente} \geq (1.2 \times S_{DL} + 0.85 \times S_{LL})_{reforçada}$$

Sendo ϕ um fator de segurança; R_n a resistência nominal do elemento; S_{DL} e S_{LL} o valor de ações permanentes e variáveis consideradas no dimensionamento do reforço, respetivamente (Azevedo, 2008).

O ACI considera, ainda, que o nível de resistência ao fogo ($R_{n\theta}$) do elemento não reforçado deve respeitar a seguinte condição (Azevedo, 2008):

$$(R_{n\theta})_{existente} \geq S_{DL} + S_{LL}$$

Já o documento Bulletin 14 *fib*:01, pressupõe que a segurança do elemento reforçado relativamente à perda do reforço por ação de vandalismo, fogo ou acidente, deve ser verificada em Estado Limite Último para a combinação de ações para situações acidentais, de acordo com o estipulado no Eurocódigo – Bases de Projecto de Estruturas e no Eurocódigo 2 – Projecto de estruturas de betão.

A questão que surge com estas recomendações é a utilidade do reforço, uma vez que a estrutura sem reforço deve suportar as cargas implementadas num novo cenário de cargas. De facto, a estrutura deve garantir a resistência à combinação de ações permanentes e a uma percentagem de ações variáveis (Juvandes, 2002), com o objetivo de cumprir o tempo mínimo de resistência ao fogo, não significa isto que a estrutura deverá estar apta para suportar o carregamento a longo prazo.

Os documentos referidos afirmam que a segurança da estrutura a uma situação de incêndio deve ser prevista com valores característicos da situação inicial da estrutura sem reforço. Isto valida que, segundo as estipulações regulamentares, a situação de incêndio não deve ser assegurada com as características ao fogo do reforço.

A publicação JCI TC952 (1998) destaca, também, um estudo experimental realizado no Japão pelos autores Tanaka et al. (1996), em que as mantas de FRP mantêm 70% da resistência à tração a 260°C, se estiverem convenientemente protegidas do fogo. Segundo o estudo experimental, não há registo de redução da resistência à tração após o arrefecimento até à temperatura ambiente, após um aquecimento a 320°C durante duas horas (Juvandes, 2002).

No EMPA, em 1994, foram realizados ensaios de comportamento ao fogo de seis vigas de betão armado, sujeitas à flexão em quatro pontos. Uma das vigas serviu como referência, sem reforço exterior, outra estava reforçada com colagem de chapas metálicas e as restantes quatro estavam reforçadas por colagem de laminados CFRP. Sob flexão, os modelos foram aquecidos até o forno atingir a temperatura de 925K (651,85°C), de acordo com as normas ISO 834, durante uma hora. A viga reforçada com chapa metálica cedeu ao fim de 8 minutos por incapacidade do adesivo. Nas outras com CFRP assistiu-se, primeiro, ao início da inflamação das fibras de carbono na superfície do laminado e depois, à redução gradual da secção útil e consequente diminuição de rigidez do compósito. Em termos médios, ao fim de uma hora o laminado acabou por destacar-se da viga. Na perspetiva do autor deste artigo (Meier, 1997-b), ambos os casos de reforço cederam pela ligação, mas com vantagem para os compósitos de CFRP porque apresentaram um desempenho superior ao reforço metálico, devido à baixa condutividade térmica transversal do compósito. O valor de coeficiente de transmissão térmica do aço está compreendido entre os 15,57 e os 46,71 W/m.°C e da fibra de carbono com resina epóxi varia entre os 48,44 e os 60,55 W/m.°C (longitudinal) e 0,87 W/m.°C (transversal) (Oliveira, 2012). Apesar de serem valores meramente indicativos, consegue avaliar-se que a fibra de carbono apresenta melhores características no que concerne à transmissão de calor para o adesivo de colagem. Sabendo que uma das práticas de reforço convencional é a colagem de chapas metálicas com adesivos epoxídicos, pode considerar-se também que o reforço com fibra de carbono apresenta vantagens claras, em comparação, no que respeita à situação de incêndio.

Uma documento técnico da Sika, sobre dimensionamento e proteção em situação de incêndio (Vásquez, 2014), salienta a importância da proteção ao fogo do sistema FRP, não no sentido de impedir que o sistema entre em ruína, mas sim para incrementar o tempo de resistência ao fogo global da estrutura. Algumas soluções de proteção serão referidas no ponto 6.2 e 6.3, que se seguem respetivamente.

6.2 POSIÇÃO CORPORATIVA PARA A SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Tendo sido o estágio realizado numa empresa que fornece soluções de sistemas de CFRP colados exteriormente à superfície de betão, faz todo o sentido apresentar a posição corporativa da empresa em relação à situação de incêndio, bem como as bases justificativas da mesma.

A Sika baseia-se em documentos normativos, como o Eurocódigo 2 e o ACI 318, para formar as linhas orientadoras da sua posição. Inicialmente, têm que ser definidos os valores de cálculo para as ações permanentes e variáveis e para as resistências dos materiais de betão armado. A tabela 3 apresenta de forma organizada os coeficientes de redução e majoração para as resistências e ações, respetivamente.

Tabela 3 - Coeficientes de majoração e redução

	Eurocódigo 2	ACI 318
Cargas para cálculo	$\times 1.5$ para ações variáveis	$\times 1.6$ para ações variáveis
	$\times 1.35$ para ações permanentes	$\times 1.2$ para ações permanentes
Resistência de cálculo	$\div 1.5$ para betão	Definido de acordo com o tipo de elemento e a deformação última expectável ($\times 0.65 - \times 0.90$)
	$\div 1.15$ para aço	

A capacidade mecânica de laminado de CFRP sem proteção deverá perder-se ao fim dos primeiros minutos quando submetido a uma situação de incêndio, pelo que as cargas existentes deverão ser suportadas pela estrutura original, ou seja, estrutura de betão armado sem reforço. Os documentos considerados internacionalmente como guias de cálculo de sistemas FRP, têm em conta a verificação da resistência à situação de incêndio, da estrutura original, no processo de cálculo. As cargas previstas em caso de fogo são reduzidas, pois uma parte significativa das cargas variáveis não são esperadas em caso de fogo (Vasquez, 2014).

De acordo com o Eurocódigo 2, existem duas opções para determinar as ações de projeto para uma situação de incêndio. A primeira opção passa pela determinação de ações em serviço para a combinação de ações quase-permanentes. A segunda opção passa pela consideração de 70% das ações de cálculo. Quanto à resistência dos materiais na situação de incêndio, o Eurocódigo 2 prevê as resistências características para o betão e para o aço (Vásquez, 2014).

Tendo claro que a verificação da situação de incêndio deve ser verificada para a estrutura sem reforço, situação original da estrutura, entende-se também que a proteção ao fogo do reforço CFRP poderá apresentar-se como uma melhoria do comportamento global da estrutura perante a situação de incêndio. A necessidade de proteção do compósito pode ser determinada através do documentos ACI 440 2R-08 (secção 9.2.1.) e Bulletin 14 fib:01 (secções 3.1.2.5. e 3.2.2.). Acontece que, em muitas situações, a contribuição mecânica do CFRP é absolutamente necessária em caso de incêndio. Esta situação é tipicamente esperada nas situações em que a contribuição do CFRP assume uma parte significativa da resistência global do sistema (situações de reforço que ultrapassem mais de 50% de resistência inicial) (Vásquez, 2014).

A Sika assume que o sistema de colagem exterior é sensível à situação de incêndio, devido à temperatura de transição vítrea do adesivo (T_g) que se aproxima dos 60°C. Por este motivo, devem ser evitados os reforços que ultrapassem os limites recomendados. No entanto, existem mecanismos de proteção do reforço, que permitem o aumento da resistência ao fogo do elemento, mas que deverão ser limitados para não incorrer em riscos descontrolados. A solução da Sika para proteção de CFRP é o Sikacrete 213 F, que se baseia numa argamassa cimentícia com minerais de vermiculite. Esta solução permite uma proteção do compósito entre os 45 minutos e os 60 minutos, sendo este o intervalo limite fixado pela Sika para resistência do compósito protegido. Esquemáticamente, o efeito da proteção de CFRP pode ser entendido na figura 39.

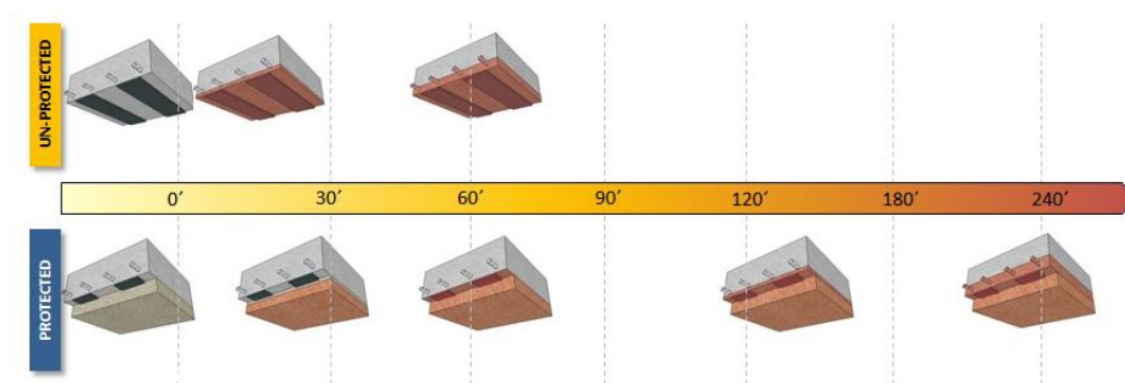


Figura 39 - Efeito de proteção do sistema compósito

Em conclusão, seguem os pontos de destaque da posição da Sika:

- A verificação da situação de incêndio deve ser sempre feita para o elemento não reforçado;
- Os pressupostos de cálculo para a resistência ao fogo assentam em documentos de elementos de betão armado, como a NP EN 1990:2009 (Eurocódigo – Bases para projecto de estruturas), NP EN 1991 -1-2: 2010 (Eurocódigo 1 – Acções em estruturas), NP EN 1992-1-2: 2010 (Eurocódigo 2 – Projecto de estruturas de betão) e ACI 318-95;
- A necessidade de proteção do reforço deve ser verificada através de documentos como o ACI 440 2R-08 e Bulletin 14 *fib*:01;
- A proteção do reforço melhora a resistência do elemento ao fogo, considerando um intervalo limitado entre os 45 e os 60 minutos;
- O cálculo da resistência ao fogo do elemento de betão armado, deve ser feita de forma totalmente independente à resistência ao fogo do sistema compósito.

6.3 SISTEMAS DE PROTEÇÃO AO FOGO

Independentemente das opiniões acerca da verificação da situação de incêndio num compósito FRP colado externamente à superfície de betão com adesivos epóxi, existem mecanismos que permitem retardar a temperatura do compartimento atingida num incêndio.

De facto, o adesivo epóxi detém uma temperatura de transição vítrea (T_g) baixa ($+62^\circ\text{C}$, no caso do Sikadur 30), que é facilmente atingida numa situação real de incêndio. A respeito deste aspeto, não há como negar que o adesivo é sensível à situação de fogo, pelo que, no sentido de aumentar a capacidade resistente do sistema compósito a uma situação de incêndio, podem ser aplicados sistemas de proteção ativos e/ou passivos.

Sistemas ativos de proteção ao fogo são aqueles que necessitam de uma ação humana ou de um mecanismo automatizado que responda a um incêndio ou a fenómenos causados por este. Tem a função de extinguir o fogo e ajudar na dissipação de calor, promovendo o tempo necessário para evacuação dos ocupantes do edifício. Os sistemas de aspersão são um exemplo de um sistema ativo de proteção ao fogo, no entanto, os sistemas ativos não se limitam a equipamentos de extinção direta, pelo que os sistemas de alarme e sinalização de emergência também são considerados sistemas ativos de proteção ao fogo. (Silva, 2013)

Sistemas passivos são aqueles que não necessitam de uma ação humana ou mecanismos automatizados para entrarem em funcionamento. Baseiam-se na prevenção da ignição do material combustível, limitando o desenvolvimento de fogo (Silva, 2013).

Os sistemas ativos e os sistemas passivos podem ser utilizados em conjunto, pois a ação de um tipo de sistema não invalida a utilização do outro tipo de sistema, pelo contrário, até favorece a ação com bom desempenho entre ambos. Neste documento apenas se vão abordar as características e tipos de sistemas de proteção passivos, pois são aqueles que usualmente são aplicados na proteção de sistemas CFRP para a situação de fogo.

Os sistemas passivos mais comuns para proteção de CFRP ao fogo são:

- Revestimentos à base de vermiculite;
- Placas de gesso;
- Placas de silicato de cálcio;
- Projeção de fibras minerais;
- Manta de fibras cerâmicas e placas de lâ de rocha.

Existem também os revestimentos intumescentes, normalmente, sob forma de pinturas. No entanto, este sistema de proteção aplica-se, frequentemente, para revestimento de estruturas de aço. A sua aplicabilidade para proteção de compósitos FRP ainda não está assumida como efetiva (Vásquez, 2014). A funcionalidade dos revestimentos intumescentes inicia-se em regra geral entre a temperatura de 100°C e 300°C, e sendo a temperatura T_g do adesivo um valor variável entre os 50°C e os 80°C, o uso deste tipo de solução não se verifica eficaz.

6.3.1 REVESTIMENTOS À BASE DE VERMICULITE

A vermiculite é o nome geológico dado a um grupo de minerais laminares hidratados, formado pelo processo de hidratação de minerais basálticos ou vulcânicos, que sofre expansão quando lhe é aplicado calor. A placa de vermiculite (figura 40) é constituída por lâminas de água, e quando aquecida, as lâminas de água transformam-se em vapor, provocando a repartição de partículas e a transformação de partículas densas de minério em grânulos porosos leves, contendo inúmeras camadas de ar. O aprisionamento do ar confere uma excelente capacidade de isolamento térmico (Oliveira, 2012).

A característica de expansão, cerca de 30 vezes o volume inicial, e a baixa condutividade térmica da vermiculite, formam um bom material de isolamento para os FRP. Numa argamassa de vermiculite, a condutividade térmica varia entre os 0.06 e os 0.17 W/m°C (Silva, 2013).

As partículas de vermiculite são utilizadas na criação de argamassas (figura 41) que podem ser aplicadas por projeção ou por aplicação manual (espátula). Esta técnica é a mais comum, por permitir uma interface de contacto mais eficaz, porém também podem ser aplicadas placas de

vermiculite. Este último processo de revestimento praticamente não é utilizado pela dificuldade no processo de fabrico das placas de vermiculite (Silva, 2013).



Figura 40 - Placa de vermiculite exposta ao fogo

[Fonte: <http://www.metallica.com.br/o-que-e-placa-de-vermiculita>]



Figura 41 - Superfície de revestimento de vermiculite

[Fonte: [http://isomak.com.br /portfolio/vermiculina-fina/](http://isomak.com.br/portfolio/vermiculina-fina/) - consulta atualizada em 04-09-2014]

6.3.2 PLACAS DE GESSO

As placas de gesso (figura 42) são utilizadas na construção com diferentes objetivos. A sua capacidade de absorção de água mantém o ar em espaços fechados, além de apresentar um excelente isolamento térmico e um bom isolamento acústico. A condutividade térmica das placas de gesso é reduzida, variando entre os 0.19 e os 0.24 W/m°C, uma vez que quando sujeita a fogo, o gesso perde as moléculas de água mantendo a temperatura mais baixa no substrato a ser protegido (Silva, 2013).

As reações que ocorrem no gesso, quando ele é aquecido, são reações de desidratação, de caráter endotérmico. Ou seja, o gesso capta a energia transmitida pelo fogo para a realização das reações e retarda o aquecimento do elemento protegido.

A fixação das placas de gesso para revestimento de proteção ao fogo, em regra geral, passam por fixação mecânica. Os mecanismos de fixação devem prever elevada resistência a altas temperaturas, para que não seja o mecanismo de fixação o motivo de rotura do revestimento de proteção.



Figura 42 - Placas de gesso sobre o CFRP

[Fonte: Materiais Compósitos Reforçados com Fibras, FRP – Juvandes, Luis (2002), página 50]

6.3.3 PLACAS DE SILICATO DE CÁLCIO

As placas de silicato de cálcio (figura 43) têm um comportamento bastante semelhante às placas de gesso. O processo de proteção resume-se, à semelhança das placas de gesso, a reações endotérmicas em várias etapas de temperatura atingida. As placas de silicato de cálcio contêm em média entre 3% a 5% de água na sua constituição, o que retarda a transmissão de calor para o material a ser protegido. A condutividade térmica das placas de silicato de cálcio é, em média, 0,16 W/m°C (Silva, 2013).

A fixação mecânica das placas é a mais comum, mas também podem ser fixadas por colagem. As placas de silicato de cálcio são aplicadas quando existe uma exigência térmica elevada e resistência mecânica superior às placas de gesso. Este revestimento é mais dispendioso que o revestimento com gesso, por apresentar uma cadeia de reações endotérmicas superior e por atingir na sua última reação temperaturas na ordem dos 1000°C (Silva, 2013).



Figura 43 - Placas de silicato de cálcio

[Fonte: <http://www.isar.com.br/produtos/isolamento-termico/poliuterano/isotubos-e-placas/> - consulta atualizada em 04-09-2014]

6.3.4 PROJEÇÃO DE FIBRAS MINERAIS

À semelhança da projeção de argamassas com vermiculite, a projeção de fibras minerais (figura 44) é um processo muito frequente na realização de argamassas com objetivo de proteção ao fogo.

As fibras minerais são obtidas a partir de rochas vulcânicas, com objetivo de diminuir a densidade da argamassa. Ao invés das placas, que contêm percentagem de água que promove reações endotérmicas e retarda a transmissão de temperatura, as argamassas com fibras minerais não se consideram eficazes pela quantidade de água na sua composição. A eficácia deste sistema de proteção dá-se pela característica inerte das fibras que incorporam a argamassa. A condutibilidade térmica das fibras é bastante reduzida, variando entre os 0.08 e os 0.10 W/m°C (Silva, 2013).

Uma desvantagem da aplicação deste sistema é o desperdício provocado pela projeção da argamassa e outra é a forma irregular da superfície provocada também pela projeção, provocando uma superfície arquitetonicamente indesejável.



Figura 44 - Projeção de argamassa com fibras minerais

[Fonte: <http://www.metallica.com.br/protacao-de-estruturas-metalicas-frente-ao-fogo> - consulta atualizada em 04-09-2014]

6.3.5 MANTAS DE FIBRAS CERÂMICAS E PLACAS DE LÃ DE ROCHA

As mantas de fibras cerâmicas (figura 45) são constituídas por fibras de sílica e alumina dispostas em várias direções, o que permite um aumento de flexibilidade e resistência mecânica em várias direções.

As fibras constituintes não são combustíveis, no entanto não suportam temperaturas superiores aos 1300°C, iniciando o seu processo de desintegração quando a temperatura referida é ultrapassada. A condutividade térmica das mantas de fibra cerâmica varia entre os 0.10 e os 0.25 W/m°C (Silva, 2013).

As mantas de fibras cerâmicas encontram-se no mercado em rolos com espessuras variáveis entre os 10 mm e os 50 mm, podendo ser fixadas mecanicamente ou por colagem, sendo aconselhável o uso de fixação mecânica para evitar a rotura pela ligação.



Figura 45 - Rolo de manta de fibra cerâmica

[Fonte: <http://www.refratil.com.br/produto/fibra-ceramica> - consulta atualizada em 04-09-2014]

As placas de lã de rocha (figura 46) são formadas a partir de rochas basálticas, onde as fibras constituintes são dispostas aleatoriamente com aglomeração das mesmas através de resina termoendurecível. A fixação aconselhável para este tipo de revestimento é mecânica, pelas razões evidenciadas anteriormente.

A característica inerte das fibras da rocha basáltica promovem um excelente comportamento de isolamento térmico, tendo uma condutividade térmica média de $0.12 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ (Silva, 2013).



Figura 46 - Placas de lã de rocha

[Fonte: <http://construindo.org/la-de-rocha/> - consulta atualizada em 04-09-2014]

7 Dados Técnicos dos Principais Fabricantes no Brasil

7.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo a análise técnica dos produtos da Sika Brasil para reforço estrutural com compósitos de fibra de carbono (CFRP) e comparação dos produtos dos principais fabricantes de sistemas FRP no Brasil.

A comparação de maior interesse, para o contexto deste documento, é a forma como é disponibilizada a informação técnica numa ficha de produto, com objetivo de dimensionamento. Por este motivo, não se irão detalhar todas as informações disponibilizadas pelos fornecedores, mas sim apenas aquelas que são consideradas relevantes para a análise.

Atualmente, a Sika Brasil tem apenas sistemas de reforço FRP com a técnica EBR (Externally Bonded Reinforcement). Os sistemas existentes com a colagem exterior de fibra de carbono são a colagem exterior de lâminas de fibra de carbono com adesivo epóxi e a colagem exterior de mantas de fibra de carbono com adesivo epóxi, pelo que foram esses sistemas o alvo da comparação. Apesar de se ter desenvolvido uma comparação global do sistema a nível técnico e a nível comercial, neste documento apenas se irá focar a comparação técnica. O adesivo influencia bastante no comportamento dos sistemas, mas a comparação das suas informações técnicas, para efeitos de dimensionamento, não se tornam as mais relevantes da análise, sendo que a comparação das características técnicas do adesivo permite uma abordagem mais comercial.

A Sika Group, matriz da Sika a nível internacional, contém outros produtos de reforço estrutural, como lâminas de diferentes dimensões e módulos de elasticidade, lâminas em “L” para reforço ao corte, tecidos unidirecionais e bi-direcionais, malhas de fibra de carbono e sistemas de CFRP pós-tensionados.

A comparação teórica das características técnicas dos produtos e respetivas soluções teve como finalidade o fortalecimento de informação acerca de novos produtos, novas características técnicas, análise dos dados fornecidos pelos fabricantes, pontos fracos e pontos fortes dos produtos da Sika e fundamentalmente para a implementação de novas soluções que se diferenciem no mercado brasileiro.

A Sika Brasil, como já foi referido, tem dois sistemas EBR, o pré-fabricado e o impregnado *in situ*, pelo que a comparação entre fabricantes foi feita com bases nos dois sistemas apenas. As designações dos produtos comparados para os dois sistemas encontram-se no tabela 4.

Tabela 4 - Fabricantes e produtos em comparação

Sistema		Sika Brasil	S&P Clever Reinforcement Company	MC-Bauchemie	Viapol
Pré-fabricado	Lâmina	Sika CarboDur S512	S&P Laminates CFK 150/2000	MC-DUR CFK-Lamellen 160/2800	Viapol Carbon Plate
	Adesivo	Sikadur 30	S&P Resin 220 Epoxy Adhesive	MC DUR 1280	Viapol Carbon Adesivo
Impregnado <i>in situ</i>	Tecido	SikaWrap 300	S&P C-Sheet 240	MC CF-Sheets	Viapol Carbon CFW300
	Adesivo	Sikadur 330	S&P Resin Epoxy 50/55	MC DUR 1209	Viapol Carbon Saturante

Nota: A comparação que se segue é baseada única e exclusivamente nos dados técnicos dos fornecedores divulgados publicamente. Não existe, na comparação, qualquer tipo de informação adicional cedida pela Sika. As fichas técnicas consultadas encontram-se na íntegra no Anexo I, Anexo II, Anexo III e Anexo IV.

7.2 ANÁLISE DE INFORMAÇÃO DE LÂMINAS

A comparação das informações técnicas das lâminas foi feita com base num laminado de 50 mm de largura e 1,2 mm de espessura, por ser um laminado comum nos quatro fabricantes em análise. Note-se que o facto de se alterar a largura e a espessura do laminado não afetam os dados técnicos genéricos do laminado, no entanto, em alguns fabricantes os dados são fornecidos para cada tipo de laminado comercializado, pelo que se teve que encontrar uma base de comparação válida.

Tentou encontrar-se a maior similitude possível entre os laminados comparados, no que diz respeito à resistência à tração e módulo de elasticidade. As características comparadas entre os fabricantes seguem na tabela 5.

Tabela 5 - Informação técnica das lâminas dos diferentes fabricantes

Informação técnica	Sika CarboDur S512	S&P Laminates CFK 150/2000	MC-DUR CFK-Lamellen 160/2800	Viapol Carbon Plate 50/12
Módulo de elasticidade mínimo	>160000 N/mm ²	168000 N/mm ²	>167000 N/mm ²	>165000 N/mm ²
Módulo de elasticidade médio	165000 N/mm ²	Não informa	≥175000 N/mm ²	Não informa
Módulo de elasticidade (5% rotura)	>162000 N/mm ²	Não informa	Não informa	Não informa
Módulo de elasticidade (95% rotura)	>180000 N/mm ²	Não informa	Não informa	Não informa
Resistência à tração (mínima)	> 2800 N/mm ²	> 2800 N/mm ²	> 2950 N/mm ²	> 3000 N/mm ²
Resistência à tração (5% rotura)	> 3000 N/mm ²	Não informa	Não informa	Não informa
Resistência à tração (95% rotura)	> 3600 N/mm ²	Não informa	Não informa	Não informa
Deformação na rotura	> 1,70 %	Não informa	> 1,67 %	> 1,70 %
Resistência à tração (extensão 0.6%)	Não informa	1000 N/mm ²	Não informa	Não informa
Resistência à tração (extensão 0.8%)	Não informa	1300 N/mm ²	Não informa	Não informa

No que respeita aos dados técnicos para dimensionamento, a exposição de dados distingue-se principalmente em dois fabricantes, a Sika e a S&P Clever Reinforcement Company. Os restantes fabricantes estabelecem dados genéricos ou médios.

A Sika apresenta vários módulos de elasticidade e várias resistências à tração, distingue-se pela apresentação do módulo de elasticidade de percentil de 5% e 95% de tensão de rotura. A S&P apresenta a resistência à tração para 0,6% e 0,8% de extensão.

Os valores apresentados pela Sika são baseados nos pontos 3.1.3.1, 3.1.3.2 e 3.1.3.3, do capítulo 3 do Bulletin 14 *fib*:01, que se refere às bases de projeto e conceitos de segurança.

O ponto 3.1.3.1 do Bulletin 14 *fib*:01, que aborda os requisitos gerais para verificação a ELS, refere que a expressão que permite o cálculo de tensão do compósito depende do módulo de elasticidade característico e a extensão do mesmo, de acordo com a seguinte expressão:

$$\sigma_f = E_{fk} \times \varepsilon_f$$

Refere, ainda, que para dimensionamento, o valor de módulo de elasticidade característico usado (E_{fk}) deve ser o respetivo valor para o percentil de 5% ($E_{fk0.05}$) e que a deformação máxima do compósito deve ser compreendida entre 10% e 50% da deformação última real do compósito.

No ponto 3.1.3.2 do Bulletin 14 *fib*:01, que aborda a verificação a ELU para ligação perfeita entre o betão e o FRP EBR, refere que a tensão do compósito para dimensionar a secção de fibra de carbono, é dada pela seguinte expressão:

$$\sigma_f = E_{fu} \times \varepsilon_f$$

O valor de E_{fu} é dado pela relação $\frac{f_{fk}}{\varepsilon_{fuk}}$, em que f_{fk} corresponde ao quantilho de 5% da tensão de rotura e ε_{fuk} ao quantilho de 5% da extensão de rotura. O documento salienta que o valor de E_{fu} não deve assumir valor inferior a $E_{fk0.05}$.

Por fim, o ponto 3.1.3.3 refere-se à verificação ao ELU para a falha na ligação. Lê-se que maiores tensões de FRP resultam em maiores forças na ligação, no entanto, a verificação à rotura de ligação deve ser relacionada com o maior módulo de elasticidade E_f , que pode ser assumido como o maior valor de:

- Módulo de elasticidade último, E_{fu} ;

- O valor de módulo de elasticidade $E_{fk0.95}$.

A S&P Clever Reinforcement Company opta por apresentar os valores de resistência à tração limitando a extensão do FRP. O intervalo compreendido para a extensão de FRP varia entre os 0,65% e os 0,85% no Apêndice A.1 do Bulletin 14 *fib*:01 (Approach 1: Anchorage verification and FRP strain limitation). No entanto, a S&P Clever Reinforcement Company limita o intervalo para 0,6% e os 0,8%, sendo que a limitação de extensão de FRP é um conselho de dimensionamento bem destacado pelo Bulletin 14 *fib*:01. Os valores apresentados pela S&P Reinforcement são valores teóricos, isto é, são baseados no módulo de elasticidade médio que consta na ficha técnica do produto. Concretamente, a força de tração apresentada para 0,6% e 0,8% de extensão pode ser determinada da mesma forma por qualquer outro fabricante, porque são valores teóricos que resultam da expressão genérica $\sigma = E \times \varepsilon$.

- Cálculo para 0,6% (E=168 GPa):

$$\sigma = E \times \varepsilon \leftrightarrow \sigma = 168000 \times \left(\frac{0,6}{100}\right) = 1008 \text{ N/mm}^2 \cong 1000 \text{ N/mm}^2$$

- Cálculo para 0,8% (E=168 GPa):

$$\sigma = E \times \varepsilon \leftrightarrow \sigma = 168000 \times \left(\frac{0,8}{100}\right) = 1344 \text{ N/mm}^2 \cong 1300 \text{ N/mm}^2$$

7.3 ANÁLISE DE INFORMAÇÃO DE TECIDOS

A análise dos tecidos teve por base tecidos unidirecionais com gramagem aproximada de 300 g/cm². As características gerais dos tecidos comparados tentaram satisfazer o máximo de similitude, uma vez que o objetivo é comparar a informação técnica fornecida e não diferenciar as qualidades e/ou defeitos entre os produtos dos respetivos fabricantes.

Na tabela 6 estão contidas as informações técnicas dos tecidos comparados, entre os quatro fabricantes.

Tabela 6 - Informação técnica dos tecidos dos diferentes fabricantes

Informação técnica	SikaWrap 300 C	S&P C-Sheet 240	MC-DUR CF-Sheets	Viapol Carbon CFW 300
Resistência à tração (fibra seca)	4000 N/mm ²	3800 N/mm ²	≥ 3860 N/mm ²	4900 N/mm ²
Módulo de elasticidade	230000 N/mm ²	240000 N/mm ²	242000 N/mm ²	230000 N/mm ²
Alongamento na rotura	1.7%	1.55%	≥ 1.50%	2.1%
Módulo elasticidade médio (impregnado)	225 kN/mm ²	Não informa	Não informa	Não informa
Resistência à tração média (impregnado)	3500 N/mm ²	Não informa	Não informa	Não informa
Força à tração última 1000 mm de largura	Não informa	557.3 kN	Não informa	Não informa
Força de tração para 1000 mm de largura a 0,6% (ε)	Não informa	211 kN	Não informa	Não informa

À semelhança da comparação realizada para as lâminas, nas fichas técnicas de produto de tecidos de fibra de carbono, as informações que se destacam são as informações fornecidas pela Sika e pela S&P Clever Reinforcement Company. As restantes apresentam valores genéricos e/ou médios.

A Sika é o único fabricante que apresenta com detalhe a diferença de módulo de elasticidade e resistência à tração entre a fibra seca e a fibra impregnada. A influência que o adesivo provoca nas propriedades mecânicas do tecido é muito maior do que a influência que o adesivo provoca nas lâminas. Isto porque, antes de impregnado, o tecido comporta-se com as propriedades mecânicas da fibra de carbono e não se comporta como um compósito de fibra de carbono (comportamento após a impregnação e endurecimento). Conforme a ficha técnica de produto, as características técnicas do tecido impregnado resultam de 27 amostras por teste (valores empíricos).

A S&P Clever Reinforcement Company apresenta um fator de segurança de 1.2, para reduzir a capacidade resistente para cálculo, sendo que os valores apresentados na ficha técnica de produto correspondem a valores obtidos teoricamente. Segue o processo de cálculo para obtenção dos valores da ficha técnica:

- Força de tração última 1000 mm de largura (557.3 kN):
Com a secção de fibra de carbono ($A_f = 176 \text{ mm}^2$) e a resistência à tração de 3800 N/mm², tem-se que: $\sigma = \frac{F}{A} \leftrightarrow F = \sigma \times A \leftrightarrow F = 3800 \times 176 = 668800 \text{ N}$. Com o fator de segurança, tem-se: $F = \frac{668800}{1.2} = 557333,33 \text{ N} \cong 557,3 \text{ kN}$.
- Força à tração para 1000 mm de largura a 0,6% de extensão (211 kN):
Com a secção de fibra de carbono ($A_f = 176 \text{ mm}^2$) e com o módulo de elasticidade ($E = 240 \text{ GPa}$), tem-se que: $F = \sigma \times A \leftrightarrow F = E \times \varepsilon \times A \leftrightarrow F = 240 \times 10^3 \times \frac{0,6}{100} \times 176 \leftrightarrow F = 253,44 \text{ kN}$. Com o fator de segurança, tem-se: $F = \frac{253,44}{1,2} = 211,2 \text{ kN} \cong 211 \text{ kN}$.

Em suma, existe uma redução, em apenas dois fabricantes, das características mecânicas do tecido de fibra de carbono, em comparação com o compósito formado pela impregnação de adesivo no tecido. A diferença entre eles é que um se baseia na informação empírica (Sika) e o outro baseia-se em informação teórica por processos genéricos de cálculo (S &P Clever Reinforcement Company).

É de referir que a espessura do compósito, usada para cálculo, é a mesma espessura que o tecido. Tecnicamente, existe um aumento de espessura quando, ao tecido, lhe é aplicado o adesivo de impregnação. Porém, a dificuldade de quantificar esse incremento de espessura é de tal forma que o Bulletin 14 *fib:01* recomenda, para efeitos de dimensionamento, o uso da secção bruta, contabilizando apenas a espessura de fibra de carbono.

8 Ensaios de referência

8.1 ENSAIO DE TRAÇÃO LAMINADO PRÉ-FABRICADO

Juvandes (2002) apresenta um ensaio realizado a um laminado pré-fabricado, onde compara as especificações fornecidas pelo fabricante, neste caso a Sika, e os resultados obtidos em laboratório.

Trata-se de um laminado da gama da Sika, Sika CarboDur S 512, que apresenta uma espessura de $t_L = 1.2 \text{ mm}$ e uma largura de $b_L = 50 \text{ mm}$. As propriedades fornecidas pelo fabricante são de acordo com a ficha técnica do produto do ano de 1998, sendo que atualmente já sofreu alterações.

É apresentada na figura 47 uma tabela resumida com as propriedades do catálogo (1998) do laminado Sika CarboDur.

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

[i] - na rotura.

Figura 47 - Principais propriedades de lâminas Sika

[Fonte: Materiais Compósitos Reforçados com Fibras, FRP – Juvandes, Luis (2002), página 53]

Foram realizados ensaios de tração até à rotura de três provetes de CarboDur S 512 com 45 cm de comprimento. “Os resultados foram adquiridos por leitura direta das extensões no laminado de CFRP e por acompanhamento dos deslocamentos das amarras hidráulicas da máquina. Em todos os provetes a ruína foi precedida por uma sequência de sons crepitantes, traduzidos pela rotura e delaminação sucessiva das fibras longitudinais de carbono, surgindo, por fim, um ruído forte e brusco.” (Juvandes, 2002)

A figura 48 ilustra um exemplo de provete testado no ensaio referido. Note-se a existência de 12 centímetros de cada lado do provete para permitir a ligação entre o provete e as pegas de tração.

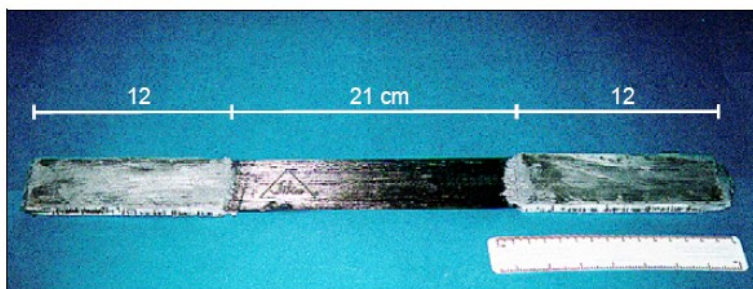


Figura 48 - Provete de laminado para ensaio à tração

[Fonte: Materiais Compósitos Reforçados com Fibras, FRP – Juvandes, Luis (2002), página 54]

A figura 49 ilustra a máquina de ensaio à tração do provete, com o respetivo provete antes do ensaio e a indicação dos extensómetros colados ao CFRP para permitir a leitura de extensão.

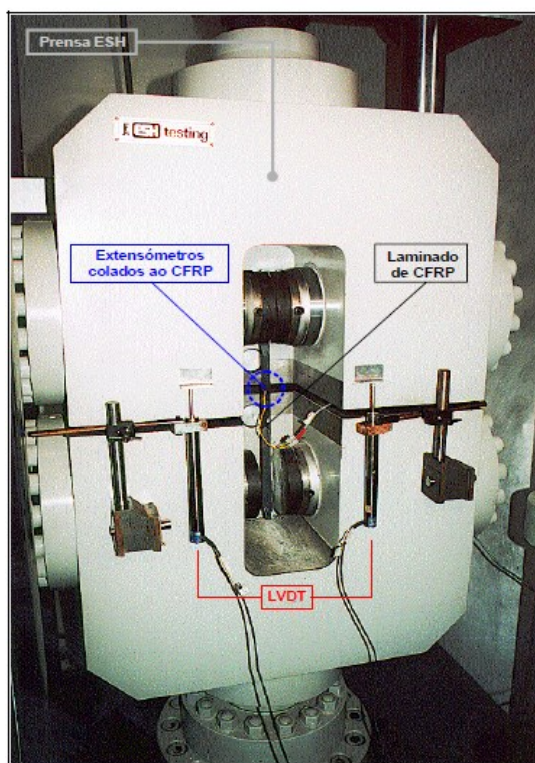


Figura 49 - Equipamento de ensaio à tração para lâmina

[Fonte: Materiais Compósitos Reforçados com Fibras, FRP – Juvandes, Luis (2002), página 54]

A figura 50 mostra o resultado final do ensaio à tração do laminado de CFRP. O laminado encontra-se em estado de ruína, tendo-se verificado delaminação no sentido longitudinal das fibras, como também se pode verificar na figura 51.

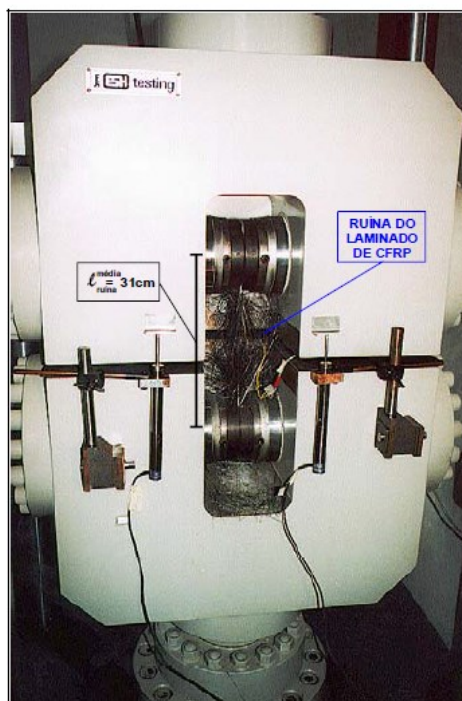


Figura 50 - Lâmina em rotura no respetivo equipamento

[Fonte: Materiais Compósitos Reforçados com Fibras, FRP – Juvandes, Luis (2002), página 54]



Figura 51 - Pormenor de rotura do laminado por tração

[Fonte: Materiais Compósitos Reforçados com Fibras, FRP – Juvandes, Luis (2002), página 54]

No ensaio foram medidos os valores da tensão (f_{Lu}), da extensão (ϵ_{Lu}) e do módulo de elasticidade (E_L) dos três provetes até à rotura, com os respetivos valores médios e desvio padrão, que constam da figura 52 extraída do documento de Juvandes (2002).

Provetes	f_{Lu} (MPa)	f_{Lum} (MPa)	ϵ_{Lu} (%)	ϵ_{Lum} (%)	E_L (GPa)	E_{Lm} (GPa)
1	3306.3	3245.7 ±60.5	2.21	2.14 ±0.8	162.9	163.3 ±5.0
2	3209.9		2.06		168.3	
3	3221.0		2.15		158.7	

Figura 52 - Resultados de três provetes ensaiados

[Fonte: Materiais Compósitos Reforçados com Fibras, FRP – Juvandes, Luis (2002), página 55]

Do ensaio, também resultou um gráfico (figura 53) que traça a relação tensão-extensão do laminado Sika CarboDur S 512, onde se pode verificar o comportamento praticamente linear do laminado até à rotura, não contemplando qualquer patamar de cedência.

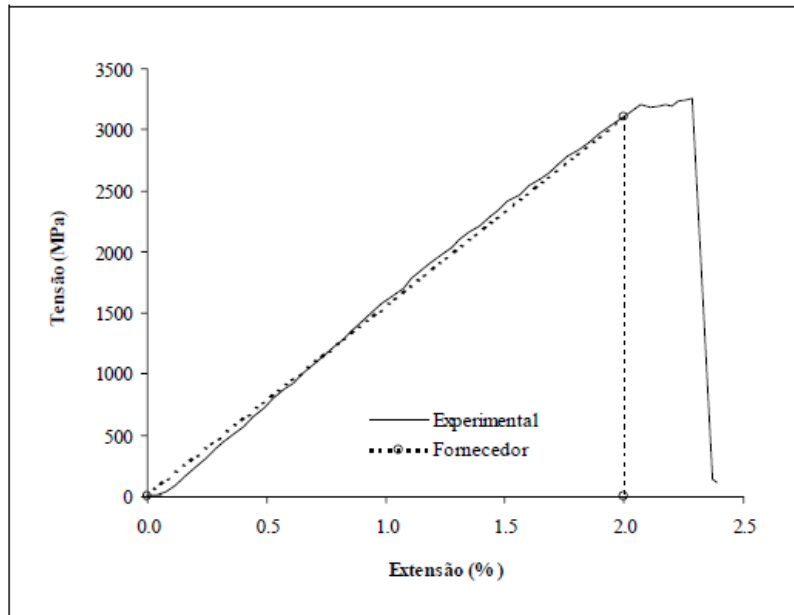


Figura 53 - Gráfico de tensão-deformação resultante do ensaio

[Fonte: Materiais Compósitos Reforçados com Fibras, FRP – Juvandes, Luis (2002), página 55]

8.2 ENSAIO EM LABORATÓRIO DE SIKAWRAP 530 C

Neste ponto, é apresentado um ensaio de laboratório (fornecido pela Sika Services AG) à tração de um tecido de fibra de carbono (SikaWrap 530 C) impregnado com um adesivo (Sikadur 301), formando o compósito FRP.

O objetivo deste ensaio é determinar, empiricamente, o módulo de elasticidade e a extensão de rotura do compósito, de acordo com as propostas normativas europeias. Este ensaio foi baseado nas especificações da EN ISO 527, nomeadamente EN ISO 527-1:2012 e EN ISO 527-5:2009.

A EN ISO 527-5:2009 especifica as condições de ensaios para compósitos de fibras unidirecionais, em particular indica as dimensões dos corpos de prova de compósitos para a realização do ensaio à tração. Segundo a norma, existem dois tipos de corpo de prova (Tipo A e Tipo B), que variam nas suas dimensões geométricas e fundamentalmente variam na direção das fibras. O tipo A é para a orientação longitudinal e o tipo B é para a orientação transversal à força de ensaio. Neste ensaio apenas foi utilizado o corpo de prova do Tipo A, com uma velocidade de 2 mm/min.

As dimensões e e orientações de fibras, a considerar, podem ser verificadas na figura 54.

O módulo de elasticidade do compósito, é calculado em função de tensões exercidas no mesmo a determinadas extensões pré-definidas. Ou seja, existem vários parâmetros de extensão que permitem avaliar o módulo de elasticidade, que variam em função da norma utilizada.

A expressão de cálculo é dada por: $E_l = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$, em que σ_1 é a tensão aplicada para uma extensão ε_1 e σ_2 é a tensão aplicada para uma extensão ε_2 (Sika Services AG, 2006).

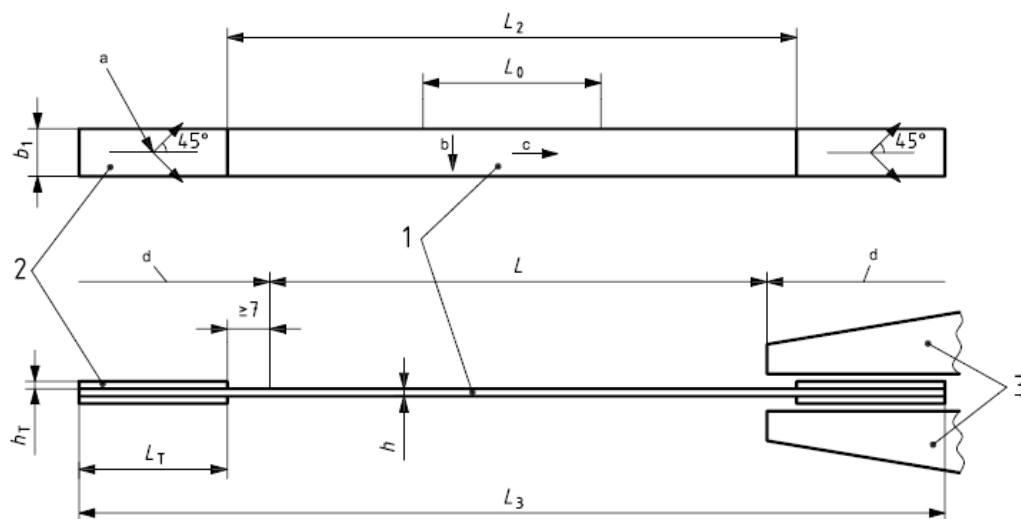


Figura 54 - Esquema de provete para ensaio à tração]

[Fonte: Procedure for the Evaluation of the SikaWrap Laminate Properties – Sika Services AG (2006)]

Em que:

1 – corpo de prova;

2 – extremidade do corpo de prova (com material que facilite a aderência à pega);

3 – pega de tração;

a – orientação da película na extremidade;

b – direção da fibra no corpo de prova Tipo B;

c – direção da fibra no corpo de prova Tipo A;

d – comprimento de pega no compósito;

L3 - comprimento total;

L_2 – comprimento de compósito livre;

b_1 – largura;

h – espessura;

L_0 – comprimento aconselhável para extensómetros;

L – distância inicial entre pegas;

L_T – comprimento da aba;

h_T – espessura da aba.

Para o corpo de prova Tipo A, segundo a EN ISO 527-5:2009, as dimensões a considerar são as seguintes:

L_3 – 250 mm;

L_2 – 150 ± 1 mm;

b_1 – $15 \pm 0,5$ mm;

h – $1 \pm 0,2$ mm;

L_0 – 50 ± 1 mm;

L – 136 mm;

L_T – > 50 mm;

h_T – entre 0,5 a 2 mm.

Foram realizados dez (10) corpos de prova de SikaWrap 530 C impregnado com Sikadur 301, de acordo com as especificações normativas (Sika Services AG, 2006).

O processo de preparação dos corpos de prova pode ser visualizado na seguinte sequência de figuras.

Preparação do laminado:



Figura 55 - Impregnação do tecido de fibra de carbono

[Fonte: Procedure for the Evaluation of the SikaWrap Laminate Properties – Sika Services AG (2006)]



Figura 56 - Remoção de adesivo excedente

[Fonte: Procedure for the Evaluation of the SikaWrap Laminate Properties – Sika Services AG (2006)]



Figura 57 - Tecido impregnado com o comprimento pretendido para ensaio

[Fonte: Procedure for the Evaluation of the SikaWrap Laminate Properties – Sika Services AG (2006)]

Instalação das abas nas extremidades do laminado:



Figura 58 - Aplicação de cola na aba para extremidades

[Fonte: Procedure for the Evaluation of the SikaWrap Laminate Properties – Sika Services AG (2006)]



Figura 59 - Colagem da aba inferior no laminado

[Fonte: Procedure for the Evaluation of the SikaWrap Laminate Properties – Sika Services AG (2006)]



Figura 60 - Colagem da aba superior no laminado

[Fonte: Procedure for the Evaluation of the SikaWrap Laminate Properties – Sika Services AG (2006)]

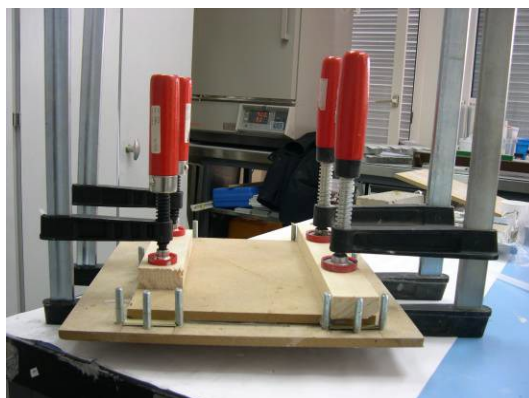


Figura 61 - Prensa das abas para melhorar as condições de colagem

[Fonte: Procedure for the Evaluation of the SikaWrap Laminate Properties – Sika Services AG (2006)]

Preparação dos corpos de prova:



Figura 62 - Corte do corpo de prova com a largura pretendida para ensaio

[Fonte: Procedure for the Evaluation of the SikaWrap Laminate Properties – Sika Services AG (2006)]



Figura 63 - Aspeto final de provete para ensaio

[Fonte: Procedure for the Evaluation of the SikaWrap Laminate Properties – Sika Services AG (2006)]

A norma europeia também especifica as características do equipamento de ensaio à tração, pelo que é importante atender aos seus requisitos. Devem também ser seguidas as especificações da ISO 5893, que refere pormenorizadamente as características do equipamento de ensaio.

A máquina de tração terá de dispor de um sistema computadorizado que permita avaliar os dados do ensaio, conforme a figura 64.

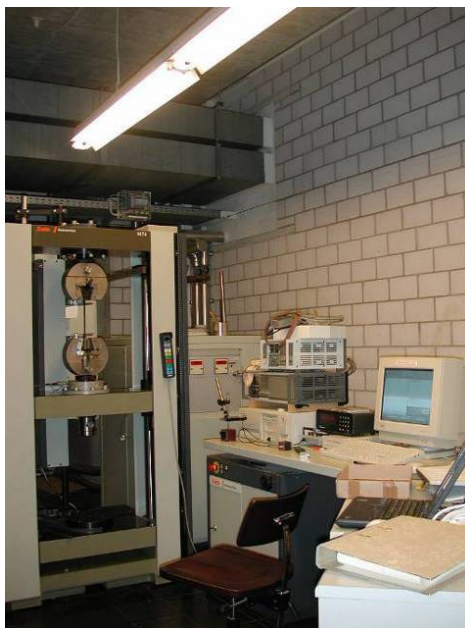


Figura 64 - Equipamento de ensaio à tração

[Fonte: Procedure for the Evaluation of the SikaWrap Laminate Properties – Sika Services AG (2006)]

A figura 65 e a figura 66 mostram o compósito na máquina de ensaio antes e após a aplicação da força de tração, respetivamente.



Figura 65 - Provete na máquina de tração antes da rotura

[Fonte: Procedure for the Evaluation of the SikaWrap Laminate Properties – Sika Services AG (2006)]



Figura 66 - Provete na máquina de tração após a rotura

[Fonte: Procedure for the Evaluation of the SikaWrap Laminate Properties – Sika Services AG (2006)]

Considerações do ensaio:

Conforme foi referido anteriormente, os valores de extensão definidos para o cálculo do módulo de elasticidade variam em função da norma ou especificações técnicas internas da empresa. Sendo que neste caso o software de análise de dados calculou para quatro premissas de extensão.

A tabela 7 mostra a variação de leitura de extensões mínimas utilizadas para a determinação do módulo de elasticidade.

Tabela 7 - Leitura das tensões para as extensões respetivas assumidas para ensaio

	$\sigma_1(\varepsilon_1)$	$\sigma_2(\varepsilon_2)$
ASTM D 3039	$\sigma_1(0.001)$	$\sigma_2(0.003)$
ACI 440.2	$\sigma_1(0.003)$	$\sigma_2(0.006)$
ISO 527	$\sigma_1(0.0005)$	$\sigma_2(0.0025)$
Sika	$\sigma_1(0.001)$	$\sigma_2(0.006)$

O corpo de prova e o ensaio tiveram as seguintes características:

- Velocidade do teste – 2 mm/min;
- Largura do FRP – 25,4 mm;
- Espessura do FRP – 1,0 mm.

Resultados do ensaio:

Os resultados demonstrados, pelo software do equipamento de ensaio, constam na figura 67, para as diferentes suposições de extensão para o cálculo do módulo de elasticidade, com o respetivo gráfico tensão-deformação (figura 68) e valores médios calculados após o ensaio (figura 69).

Nr	Width mm	Rm MPa	ϵ Rm %	ϵ Break %	E Mod ISO 527 MPa	E Mod ASTM D3039 N/mm ²	E Mod ACI 440.2 N/mm ²	E Mod Sika N/mm ²
1	25.4	615.4	1.00	1.00	61706	62237	61038	61518
2	25.4	766.2	1.29	1.29	57684	60252	59770	59962
3	25.4	765.4	1.19	1.19	57262	58622	61833	60549
4	25.4	768.3	1.29	1.29	58668	59114	58776	58911
5	25.4	720.1	1.19	1.23	60127	59874	57774	58614
6	25.4	681.7	1.13	1.13	54512	57299	61283	59690
7	25.4	673.5	1.07	1.14	58623	60343	62408	61582
8	25.4	785.8	1.29	1.29	55096	56792	61766	59776
9	25.4	813.3	1.34	1.34	51956	57960	62218	60515
10	25.4	844.0	1.36	1.36	60298	61143	62588	62010

Figura 67 - Resultados de ensaio de 10 provetes

[Fonte: Procedure for the Evaluation of the SikaWrap Laminate Properties – Sika Services AG (2006)]

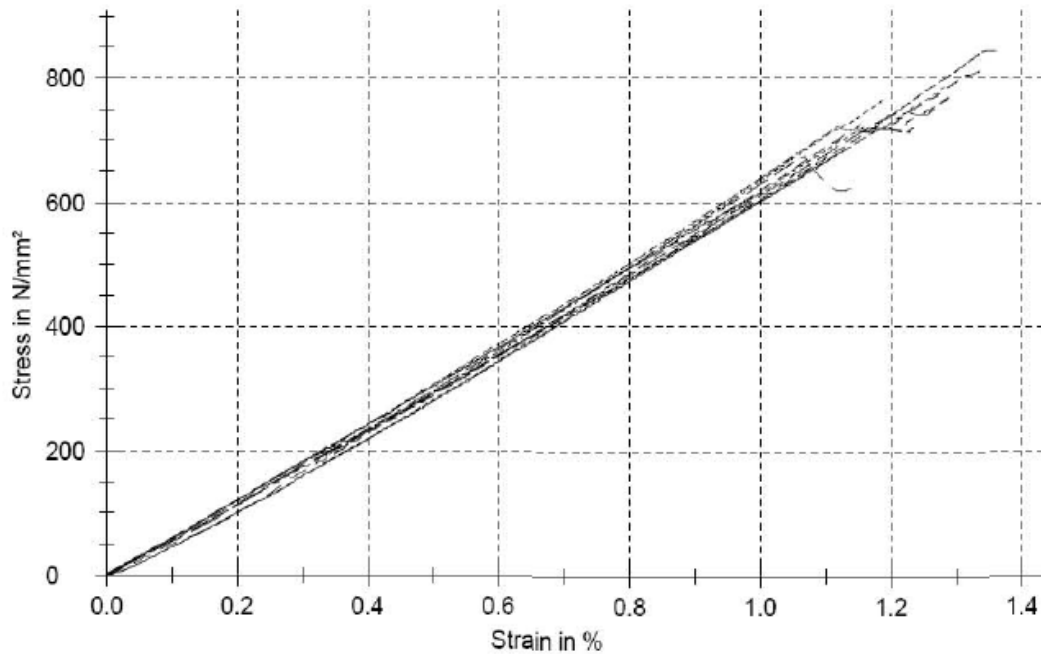


Figura 68 - Gráfico tensão-deformação dos provetes

[Fonte: Procedure for the Evaluation of the SikaWrap Laminate Properties – Sika Services AG (2006)]

Series n = 10	Rm MPa	ϵ Rm %	ϵ Break %	E Mod ISO 527 MPa	E Mod ACI 440.2 N/mm ²	E Mod ASTM D3039 N/mm ²	E Mod Sika N/mm ²
x	743.4	1.21	1.23	57593	60945	59364	60313
s	70.0	0.12	0.11	2991	1639	1728	1140

Figura 69 - Valores médios calculados após o ensaio

[Fonte: Procedure for the Evaluation of the SikaWrap Laminate Properties – Sika Services AG (2006)]

Análise dos resultados:

No que diz respeito às considerações da ISO 527, os requisitos foram estabelecidos, com exceção da largura do corpo de prova. De acordo com a ISO 527, o corpo de prova do tipo A (sentido longitudinal das fibras) deveria ter um comprimento de $15 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$, no entanto os corpos de prova testados tinham uma largura de 25,4 mm.

De acordo com a ficha técnica do SikaWrap 530 C, o módulo de elasticidade da fibra de carbono seca é de 231 GPa, com um alongamento até à rotura de 1,64%. No entanto, também refere o valor do módulo de elasticidade da fibra de carbono impregnada com adesivo, sendo que nesta situação, o módulo de elasticidade do compósito é de 63 GPa. É de referir que o valor apresentado na ficha técnica é baseado num corpo de prova de 1 mm de espessura, com impregnação de Sikadur 300, que apresenta características semelhantes, mas não iguais ao Sikadur 301.

Fazendo uma análise dos resultados obtidos em laboratório, com base nas extensões referidas na ASTM D 3039, pelo Comité ACI 440, na ISO 527 e pela Sika, pode estabelecer-se o comportamento do compósito a diferentes extensões, utilizando como base os valores de módulo de elasticidade obtidos. Para uma análise de módulo de elasticidade a maiores extensões, verifica-se um aumento do mesmo. O comportamento elástico-linear do compósito permite relacionar a tensão, extensão e módulo de elasticidade ($\sigma = E \times \varepsilon$). Na tabela 8, podem verificar-se os valores de extensão identificados na leitura para o cálculo do módulo de elasticidade.

Tabela 8 - Módulo de elasticidade calculado com os diferentes intervalos de extensão

	ε_1	ε_2	E (ensaio)
Comité ACI 440	0,003	0,006	60945 Mpa
SIKA	0,001	0,006	60313 Mpa
ASTM D 3039	0,001	0,003	59364 Mpa
ISO 527	0,0005	0,0025	57593 Mpa

Os valores finais de módulo de elasticidade não são significativamente diferentes entre os diferentes processos de cálculo, devido ao comportamento elástico-linear do FRP. No entanto, repare-se que numa leitura a baixas extensões, o módulo de elasticidade apresentado é menor, e em leituras a extensões superiores, o módulo de elasticidade é superior.

Note-se que os valores de módulo de elasticidade dizem respeito ao valor médio dos mesmos corpos de prova, apenas varia o intervalo de leitura de extensões.

9 Reforço estrutural – Caso de estudo

9.1 APRESENTAÇÃO

Durante a realização do estágio, surgiu a oportunidade de acompanhar a fase de projeto e a fase de aplicação de um reforço estrutural que será descrito adiante.

O acompanhamento realizado teve uma série de objetivos inerentes à necessidade de aprendizagem por parte do autor para a realização deste documento e para o fornecimento de informações importantes para a empresa onde o estágio curricular foi realizado. Os objetivos deste acompanhamento incidiram em duas vertentes, a do projetista e a do aplicador.

Objetivos para o acompanhamento de projetista:

- Adquirir conceitos práticos de dimensionamento;
- Comparação entre a teoria e a prática de dimensionamento;
- Levantamento de informação técnica importante, para o projetista, numa ficha técnica de produto;
- Pontos fortes e pontos fracos no sistema de reforço da Sika;
- Opinião do projetista sobre novo software da Sika;
- Opinião do projetista sobre novas tecnologias a implementar no mercado.

Objetivos para o acompanhamento do aplicador:

- Verificação do manuseamento dos materiais de reforço (adesivo e fibra de carbono);
- Verificação da preparação do adesivo e respetivos instrumentos;
- Acompanhamento de processo de reforço e comparação com a teoria de aplicação;
- Análise de consumo real de adesivo e comparação com o consumo teórico da ficha técnica de produto;
- Verificação do tempo de aplicação do sistema;
- Percecionar a opinião dos aplicadores acerca do produto, vantagens e desvantagens.

A obra de reforço foi realizada na Rua dos Ingleses 569, São Paulo – Brasil, em um edifício da Fundação de Pesquisa e Estudo de Diagnóstico por Imagem, projetada pelo escritório de projeto Enplatec Projetos e executada pela empresa Matisse Reforço de Estruturas.

A necessidade de reforço surge da implementação de um elevador de carga sobre uma laje (L1) de pavimento exterior. A laje L1, bem como as vigas que a suportam, pertencem à estrutura de um estacionamento subterrâneo.

O elevador será instalado na parte exterior do edifício conforme a zona assinalada na figura 70.

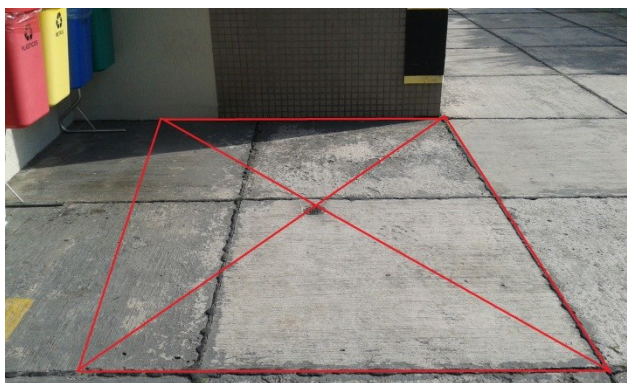


Figura 70 - Localização do elevador

[Fonte: Autoria própria, capturada a 16-07-2014]

A estrutura a reforçar consiste na laje L1 apoiada em 4 vigas (V1, V2, V3 e V4), podendo verificar-se as respetivas dimensões dos elementos a reforçar na tabela 9. As dimensões utilizadas para o dimensionamento da estrutura resultam do levantamento de informações no terreno.

Tabela 9 - Dimensões dos elementos a reforçar

	Dimensões em Planta (mxm)	Secção Transversal (mxm)
Laje – L1	5,28 x 5,60	$h = 0,15$ (m)
Viga 1 – V1	5,28 x 0,40	0,40 x 0,85
Viga 2 – V2	5,28 x 0,19	0,19 x 0,55
Viga 3 – V3	5,60 x 0,19	0,19 x 0,55
Viga 4 – V4	5,60 x 0,80	0,80 x 0,85

Segundo as informações transmitidas pelo fabricante, o elevador terá no seu conjunto uma massa total de 1500 kg. Sendo o valor de carga adicionada bastante reduzido, estando também a estrutura em aparentes condições de segurança, considera-se que este caso de estudo não é de risco, no que respeita ao tipo de reforço.

A localização do elevador, com 2,00 x 1,40 (mxm), pode ser visualizada também na figura 71, extraída do projeto de reforço, tendo como referência a viga V1.

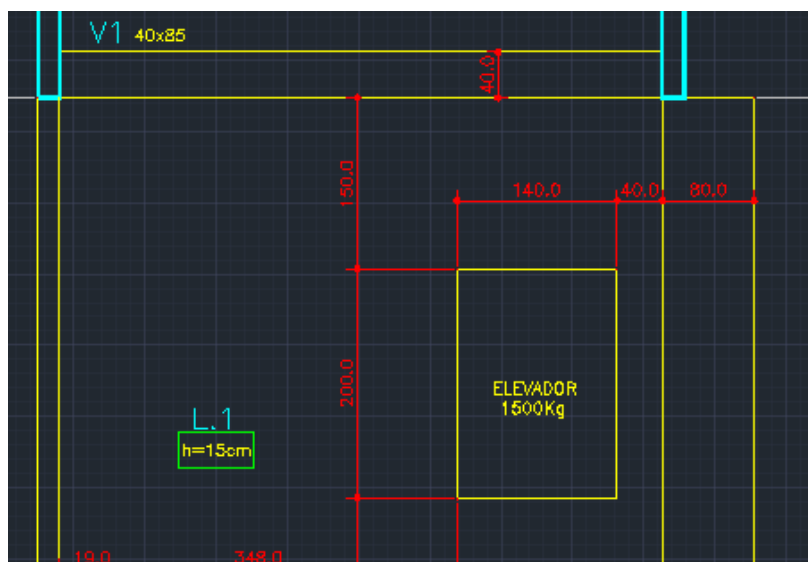


Figura 71 - Planta com a localização do elevador

[Fonte: Enplatec Projetos (Junho 2014)]

9.2 DIMENSIONAMENTO

9.2.1 INTRODUÇÃO

A grande maioria dos processos de dimensionamento, publicados internacionalmente, contemplam o pleno conhecimento das condições da estrutura, conforme já foi referido neste documento, como a resistência do betão, a disposição da armadura, o tipo e diâmetro da armadura da estrutura, entre outros. A realidade é que os projetos de reforço que não salientam riscos estruturais e que são considerados projetos em pequena escala, na sua grande maioria não transportam consigo uma intenção de grandes despesas consideradas desnecessárias pelo dono de obra. A realização de ensaios de prospeção/inspeção implicam que haja uma entidade idónea na confirmação dos dados do projeto em função dos dados analisados, que naturalmente se traduzem num incremento do custo global do reforço. Testes como o de resistência do betão, de aderência da superfície de betão, de análise da disposição da armadura, do nível de corrosão da armadura, entre outros, garantem ao projetista a informação necessária para executar o reforço sob que condições estipuladas pelos processos de cálculo.

Atendendo à diferença que existe entre o que deveria ser feito na teoria e aquilo que realmente é feito na prática, entende-se que o dimensionamento seja baseado em várias disposições assumidas pela experiência dos engenheiros dos gabinetes de projeto.

9.2.2 CONSIDERAÇÕES DO PROJETO

Neste caso específico, o projeto de dimensionamento estrutural do edifício não foi cedido pela administração por motivos desconhecidos, pelo que partindo das condições apresentadas para a realização do reforço, o projetista admitiu as seguintes condições estruturais:

- Armadura mínima nas vigas e na laje, desprezando a sua existência para a ação solicitada pela carga do elevador;
- Resistência à compressão do betão de 20 MPa;
- Carga de elevador assumida como uniformemente distribuída pela laje.

Antes do dimensionamento foi feita uma visita ao local, tendo em vista os seguintes objetivos:

- Reconhecimento do local da implementação do elevador;
- Desenho estrutural de laje e vigas que o elevador carregará;
- Verificação visual das condições da estrutura;
- Registro das dimensões da estrutura.

A visita ao local é uma atividade de dimensionamento que deve ser priorizada antes de executar qualquer espécie de cálculo. Como se sabe, muitas obras de construção civil não respeitam as especificações de projeto ou sofrem alterações em relação ao projeto inicial, pelo que nem sempre o que consta no projeto é verificado em obra. No Brasil já foram registados casos de reforço estrutural baseados unicamente no projeto inicial, que pelas condições reais se verificaram impossíveis de realizar. (Fonte: Engenheiro João Batista – Enplatec Projetos)

9.2.3 RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO

Os elementos estruturais que foram submetidos a reforço, conforme já foi referido, foram a laje e as quatro vigas que suportam a laje.

O cálculo de reforço foi baseado em considerações arbitradas pelo projetista, admitindo a segurança da estrutura para o aumento de carga. Isto significa, que o dimensionamento da fibra de carbono foi feito para suportar a totalidade do incremento de carga na estrutura. Como se poderá concluir, existe um sobredimensionamento de reforço neste caso devido à falta de informações da estrutura, como acontece em muitos casos de reforço.

O reforço foi realizado na zona inferior dos elementos estruturais para poder atuar aos esforços de momentos positivos, com a quantidade de fibra de carbono que segue na tabela 10. A coluna “Tipologia de projeto” apenas é considerada para facilitar a visualização do respetivo elemento com as figuras que são apresentadas no próximo subcapítulo.

Tabela 10 - Dimensionamento de CFRP para cada elemento

Elemento	Tipologia de projeto	Quantidade (tiras)	Dimensões (m x m)	m (linear)	m ²
L1 (vão de 5,28m)	Tipo 2	11	0,125 x 5,28	58,08	7,26
L1 (vão de 5,60m)	Tipo 5	8	0,125 x 5,60	44,80	5,60
V1	Tipo 1	1	0,25 x 5,28	5,28	1,32
V2	Tipo 3	1	0,25 x 5,28	5,28	1,32
V3	Tipo 4	1	0,25 x 5,60	5,60	1,40
V4	Tipo 6	1	0,25 x 5,60	5,60	1,40

No sentido de garantir as características de produto já conhecidas pelo projetista, o projeto teve especificação de produtos da gama Sika. Foi considerado um reforço com manta de fibra de carbono SikaWrap 300 C e adesivo Sikadur 330.

9.2.4 DESENHOS DE PROJETO

As figuras apresentadas neste subcapítulo pretendem apenas ilustrar o tipo de reforço projetado para facilidade de compreensão. Note-se que as figuras não têm escala relacionada entre si.

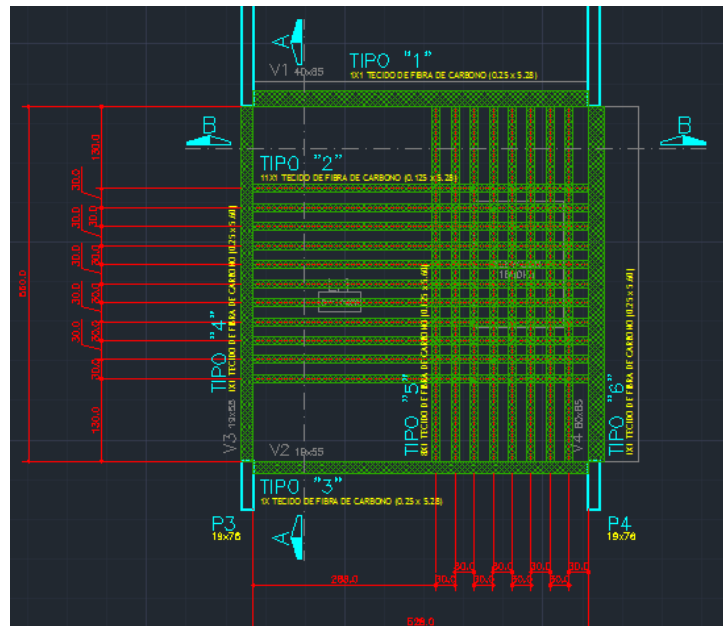


Figura 72 - Planta de reforço com a respetiva tipologia de projeto

[Fonte: Enplatec Projetos (Junho 2014)]



Figura 73 - Corte da viga V1 com o respetivo reforço

[Fonte: Enplatec Projetos (Junho 2014)]

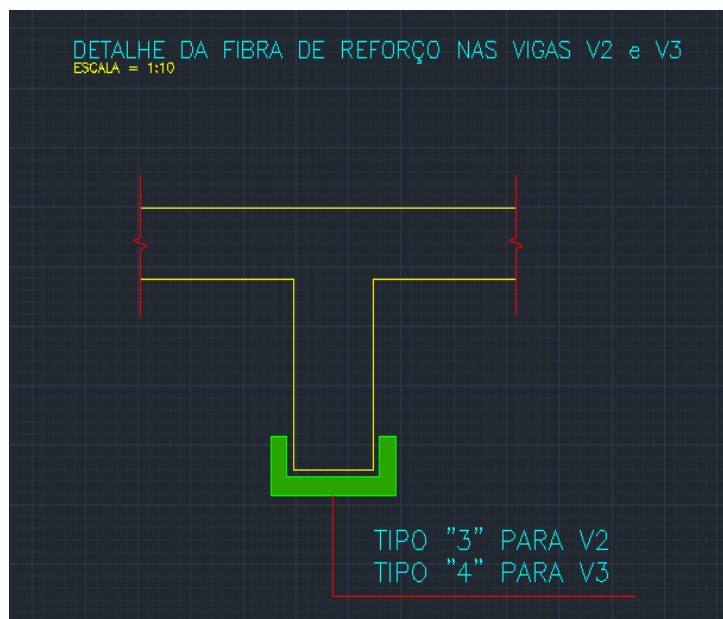


Figura 74 - Corte das vigas V2 e V3 e o respectivo reforço

[Fonte: Enplatec Projetos (Junho 2014)]

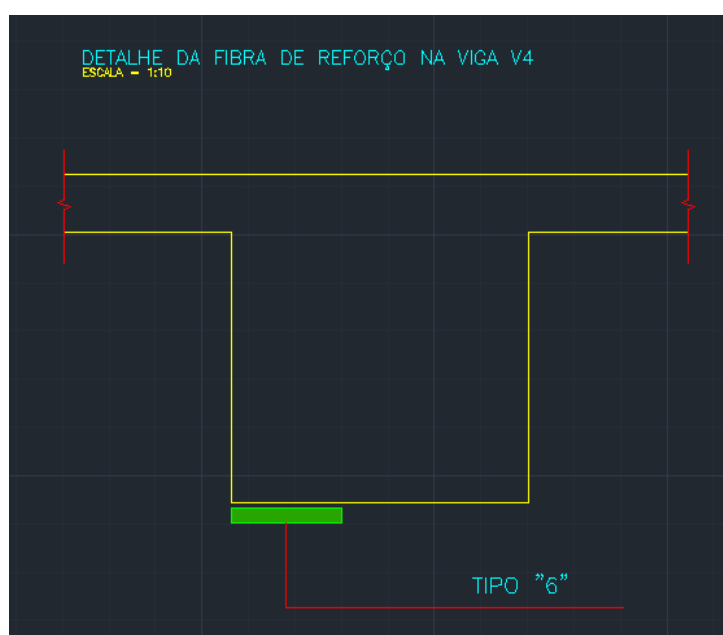


Figura 75 - Corte da viga V4 e o respectivo reforço

[Fonte: Enplatec Projetos (Junho 2014)]

9.3 PROCESSO DE EXECUÇÃO DE REFORÇO

9.3.1 SEQUÊNCIA DE APLICAÇÃO

Posteriormente ao acompanhamento de execução do projeto, foi realizado o acompanhamento de aplicação do reforço.

Durante a execução do reforço foi possível a comparação com o processo teórico de aplicação, tendo o mesmo sido executado conforme se segue.

1º dia de aplicação (15/07/2014):

- Inspeção do local, realizado pelos aplicadores;
- Verificação de impedimentos de passagem da fibra por tubagens, etc;
- Marcação da área a lixar para tratamento da superfície.

2º dia de aplicação (16/07/2014):

- Lixagem da superfície de betão;
- Abertura de espaços vazios na estrutura;

3º dia de aplicação (17/07/2014):

- Limpeza da superfície com escova de aço;
- Aplicação de argamassa polimérica nos espaços vazios (SikaTop 122 Plus);
- Corte da fibra de carbono, segundo dimensões de projeto;
- Preparação do adesivo Sikadur 330;
- Aplicação de adesivo na superfície das vigas 1,2 e 3;
- Aplicação da fibra nas vigas;
- Aplicação da 2ª camada de adesivo;
- Passagem de rolo de pressão na fibra.

4º dia de aplicação (18/07/2014):

- Lixagem da argamassa polimérica SikaTop 122 Plus;
- Marcação da fibra na laje e na viga 4;
- Aplicação do adesivo na viga 4 e na laje;
- Aplicação da fibra na viga 4 e na laje;

- Aplicação de 2ª camada de adesivo;
- Passagem de rolo de pressão na fibra.

Em resumo, fez-se o tratamento da superfície de betão, uniformização da superfície de betão, aplicação da 1ª camada de adesivo, colocação da fibra de carbono sobre a superfície, aplicação da 2ª camada de adesivo e pressão sobre a fibra de carbono para melhorar a aderência.

Em alguns documentos o processo passa pela aplicação de primer, camada regularizadora e posteriormente o adesivo. Neste caso foi utilizado o Sikadur 330, que pelas suas características não necessita de primer para melhorar a sua aderência e não necessita de camada regularizadora porque o próprio adesivo penetra nos poros superficiais.

9.3.2 SEQUÊNCIA FOTOGRÁFICA DE APLICAÇÃO

O processo de aplicação da manta de fibra de carbono consistiu numa réplica de procedimentos em todos os elementos a reforçar. Por este motivo e por organização do documento, a sequência de aplicação será resumida a alguns elementos estruturais apenas, destacando os procedimentos de maior importância.

1º - Inspeção do local:



Figura 76 - Inspeção dos elementos a reforçar

[Fonte: Autoria própria, capturada a 15-07-2014]

2º - Marcação da área a lixar:



Figura 77 - Marcação da área de lixagem

[Fonte: Autoria própria, capturada a 15-07-2014]

3º - Lixagem da superfície de betão:



Figura 78 - Lixagem da superfície a reforçar

[Fonte: Autoria própria, capturada a 17-07-2014]

4º - Abertura de espaços vazios na estrutura:



Figura 79 - Remoção da leitada de cimento para recuperação da superfície

[Fonte: Autoria própria, capturada a 17-07-2014]

5º - Aplicação de argamassa polimérica de reparação:



Figura 80 - Recuperação da superfície com argamssa polimérica

[Fonte: Autoria própria, capturada a 17-07-2014]

6º - Corte da fibra com tesoura:



Figura 81 - Corte do tecido de fibra de carbono

[Fonte: Autoria própria, capturada a 18-07-2014]

7º - Aplicação de primeira camada de adesivo:



Figura 82 - Aplicação da 1ª camada de adesivo

[Fonte: Autoria própria, capturada a 17-07-2014]

8º - Aplicação da fibra de carbono na superfície:



Figura 83 - Aplicação do tecido de fibra de carbono

[Fonte: Autoria própria, capturada a 17-07-2014]

9º - Passagem de rolo para melhorar a aderência do compósito:



Figura 84 - Melhoria de aderência com rolo plástico

[Fonte: Autoria própria, capturada a 17-07-2014]

10º - Aplicação de segunda camada de adesivo:

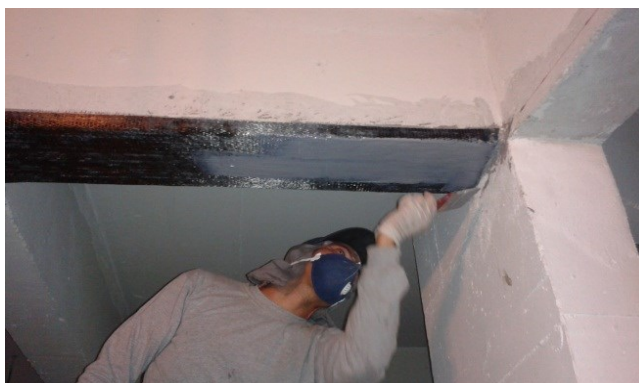


Figura 85 - Aplicação da 2ª camada de adesivo

[Fonte: Autoria própria, capturada a 17-07-2014]

11º - Resultado final de reforço:



Figura 86 - Resultado final de reforço

[Fonte: Autoria própria, capturada a 18-07-2014]

9.4 CONCLUSÕES DE ACOMPANHAMENTO DE REFORÇO

Com o acompanhamento do processo de reforço, o autor teve oportunidade de adquirir conceitos fundamentais, que não seriam possíveis apenas com a leitura e análise de documentação técnica.

Relativamente aos conceitos práticos de dimensionamento, o projeto foi desenvolvido com o cálculo simplificado de reforço, assumindo considerações distintas da realidade, uma vez que não existiu a possibilidade de conhecer as disposições construtivas da estrutura (disposição da armadura, resistência característica à compressão do betão, etc), nem as suas características

mecânicas. O processo de cálculo, como se deve deprender, não contemplou os processos de dimensionamento estipulados, por exemplo, no Bulletin 14 *fib*:01.

Os métodos de manuseamento dos materiais foram realizados de acordo com o que se pode ler em documentação técnica. Foram realizados todos os procedimentos de tratamento da superfície de betão e de arredondamento dos cantos de vigas. Foram respeitados os traços de mistura do adesivo e o processo de aplicação da fibra foi conforme se previa.

Segundo os aplicadores, o adesivo Sikadur 330 apresenta as seguintes vantagens:

- Rendimento de consumo muito positivo;
- Versatilidade do produto:
 - Não necessita de primer;
 - Preenche a superfície irregular.
- Secagem rápida do adesivo;
- Não escorre em superfície horizontal;
- Embalagem apropriada para mistura.

Foi feita uma cronometragem do tempo de aplicação das tiras de tecido de fibra de carbono, sendo que em média cada tira demorou 10 minutos, entre a aplicação da primeira camada de adesivo, colocação da fibra e aplicação da segunda camada de adesivo. Esta cronometragem apenas teve o propósito de avaliar o tempo de aplicação do reforço em questão, uma vez que o tempo de aplicação depende de múltiplos fatores variando de reforço para reforço.

O grande objetivo desta aplicação foi a verificação do consumo real do adesivo e a respetiva comparação com os valores de consumo da ficha técnica do produto Sikadur 330.

Para o reforço foram utilizados 5,5 conjuntos de adesivo. Tendo em consideração a área de fibra de carbono utilizada para o reforço, conforme consta no ponto 6.2.3, consegue-se saber o consumo de adesivo por m².

Cada conjunto de adesivo (Sikadur 330) tem 5,0 kg. Tendo sido usados 5,5 conjuntos, perfaz um total de 27,50 kg de adesivo. A área total de fibra de carbono foi de 18,30 m².

Fazendo o consumo real de adesivo por m² tem-se que:

$$\text{consumo real/m}^2 = \frac{\text{massa total adesivo}}{\text{área total fibra de carbono}} = \frac{27,50 \text{ kg}}{18,30 \text{ m}^2} = 1,50 \text{ kg/m}^2$$

Segundo a ficha técnica do Sikadur 330, o consumo de adesivo pode variar entre 0,7 a 1,50 kg/m², o que significa que o consumo real corresponde ao consumo previsto na ficha técnica de produto. No entanto, este valor é meramente indicativo, porque o consumo de adesivo, assim como o tempo de aplicação, depende da experiência do aplicador, do estado da superfície de betão, das condições ambientais, da temperatura, etc.

10 Software de Dimensionamento SikaCarboDur

10.1 INTRODUÇÃO

No âmbito do trabalho desenvolvido na empresa Sika Brasil, no Target Market Refurbishment (Reparação e Reforço), efetuou-se o desenvolvimento da implementação de um novo software de dimensionamento de CFRP para esforços de flexão, corte e encamisamento, designado por Sika CarboDur.

O software permite o dimensionamento para várias secções transversais comuns, como vigas retangulares, vigas T, vigas I, pilares quadrados ou circulares, etc, mas também permite a introdução de secções mais complexas, em que o projetista terá de introduzir manualmente as dimensões da secção. Está desenhado para cumprir as verificações aos Estados Limites Últimos e Estados Limites de Serviço, conforme as considerações da Fédération Internationale du Béton. A situação de incêndio, para efeitos de verificação de necessidade de proteção ao fogo do sistema, também está contemplada nas considerações de verificação. Pode ser feita verificação da ligação nas extremidades, em que no caso da força provocada pelo CFRP ultrapassar a força resistente, o software alerta para a necessidade de outros meios de ancoragem.

10.2 SIMULAÇÃO COM O SOFTWARE

Atualmente, o software está em fase experimental, pelo que a total divulgação das propriedades do software não será possível contemplar neste documento. O software em uso, até se finalizar o processo de implementação a nível corporativo do Sika CarboDur, é o FRP Analysis.

Em termos de viabilidade, foi feita uma pequena simulação entre ambos os software, com o objetivo de detetar qualquer falha, diferença de introdução de dados, grandes discrepâncias de resultados e verificação da sua aplicabilidade face à norma brasileira ABNT NBR 6118 (Projeto de estruturas de concreto – Procedimento). A simulação exposta neste documento foi feita com base numa secção transversal de viga pré-definida, submetida a esforço de flexão, com os momentos atuantes necessários para a introdução de dados já definidos. Ou seja, com o momento resistente inicial antes do reforço (M_0), o momento resistente requerido (M_{sd}), o momento atuante para a combinação de ações características ($M_{ser,r}$) e o momento atuante para a combinação de ações quase-permanentes ($M_{ser,q-p}$).

A viga tem secção em T, com as seguintes dimensões e características (figura 87):

- Altura da viga (h) – 0,75 m;

- Largura da base (b) – 0,15 m;
- Espessura do banzo (h_f) – 0,10 m;
- Largura do banzo (b_{eff}) – 1,35 m;
- Resistência de compressão do betão (f_{cm}) – 30 MPa;
- Armadura inferior (A_{s1}) – 508 mm² à distância 0,025 m da face inferior.

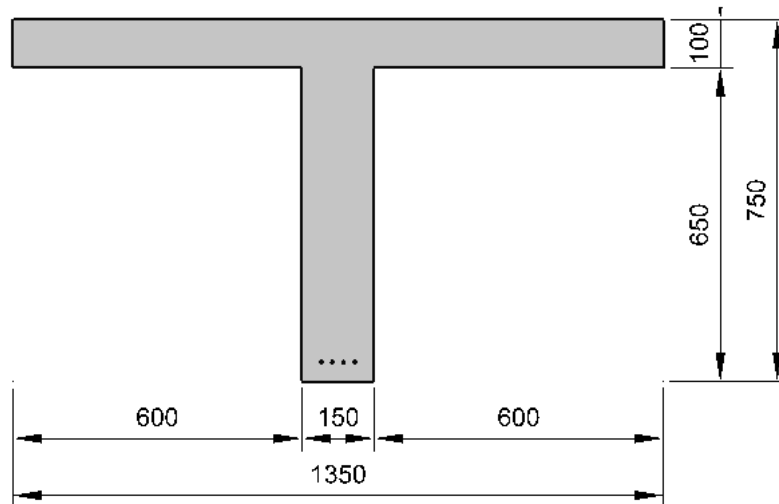


Figura 87 - Secção transversal da viga T (medidas em mm)

Os momentos considerados para a simulação foram os seguintes:

- Momento resistente inicial antes do reforço (M_0) – 96 kN.m;
- Momento resistente requerido (M_{sd}) – 201,6 kN.m;
- Momento atuante para a combinação característica ($M_{ser,r}$) – 143,36 kN.m;
- Momento atuante para a combinação quase-permanente ($M_{ser,q-p}$) – 135,45 kN.m.

10.2.1 SIMULAÇÃO COM SOFTWARE “FRP ANALYSIS”

Com base nas condições da viga, referidas anteriormente, procedeu-se à simulação de dimensionamento de CFRP com o atual software “FRP Analysis”. Os valores a ter em conta com a simulação são o momento resistente antes do reforço, a área de reforço necessária e o momento resistente após a aplicação do reforço para Estado Limite Último, Estado Limite de Serviço para Combinação Característica e Estado Limite de Serviço para Combinação Quase-Permanente.

O processo de simulação inicia-se com a introdução dos dados referidos anteriormente, conforme se pode verificar na figura 88.

Neste programa, apenas se podem introduzir secções de vigas em T ou retangulares, pode ser introduzida a resistência do betão, manualmente (casos experimentais com valores fora do *standard*), e as características da armadura interna. É requerido, numa primeira fase, a especificação do módulo de elasticidade do compósito, assim como a extensão máxima pretendida, uma vez que são dados essenciais para o processo de dimensionamento, conforme já foi referido anteriormente neste documento.

Após a introdução dos dados iniciais, o programa fornece a área necessária de reforço para ELU, ELS (combinações características) e ELS (combinações quase-permanentes), bem como a relação entre o momento resistente antes do reforço e o momento resistente após a aplicação do reforço. A solução de CFRP é definida de acordo com a situação mais condicionante, que neste caso é o que detém a maior relação entre os momentos. A figura 88 ilustra os resultados iniciais exibidos pelo programa FRP Analysis.

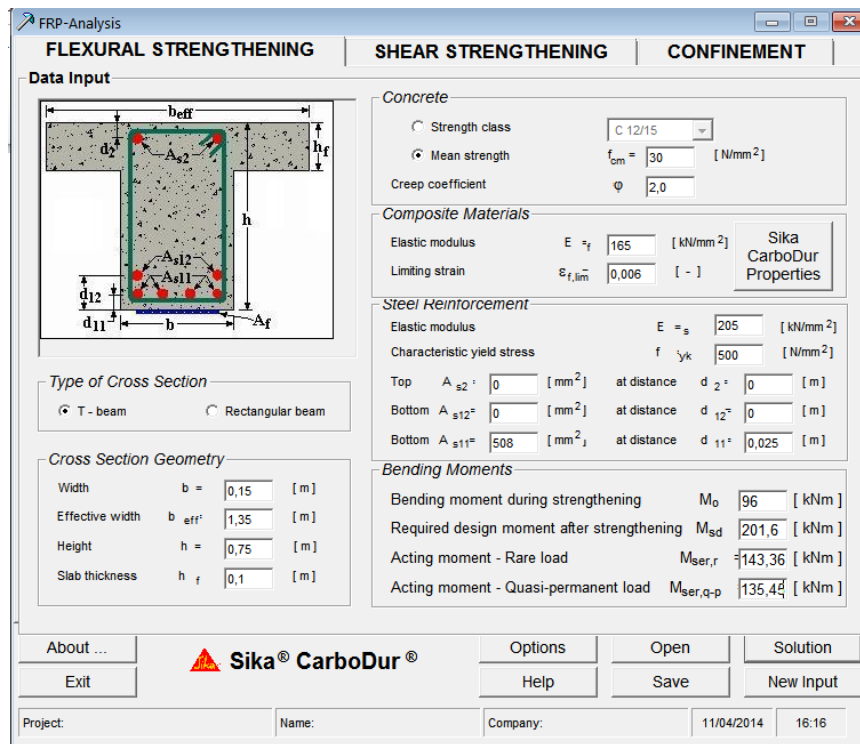


Figura 88 - Introdução de dados no programa “FRP Analysis”

[Fonte: Programa FRP Analysis – simulação realizada a 11-04-2014]

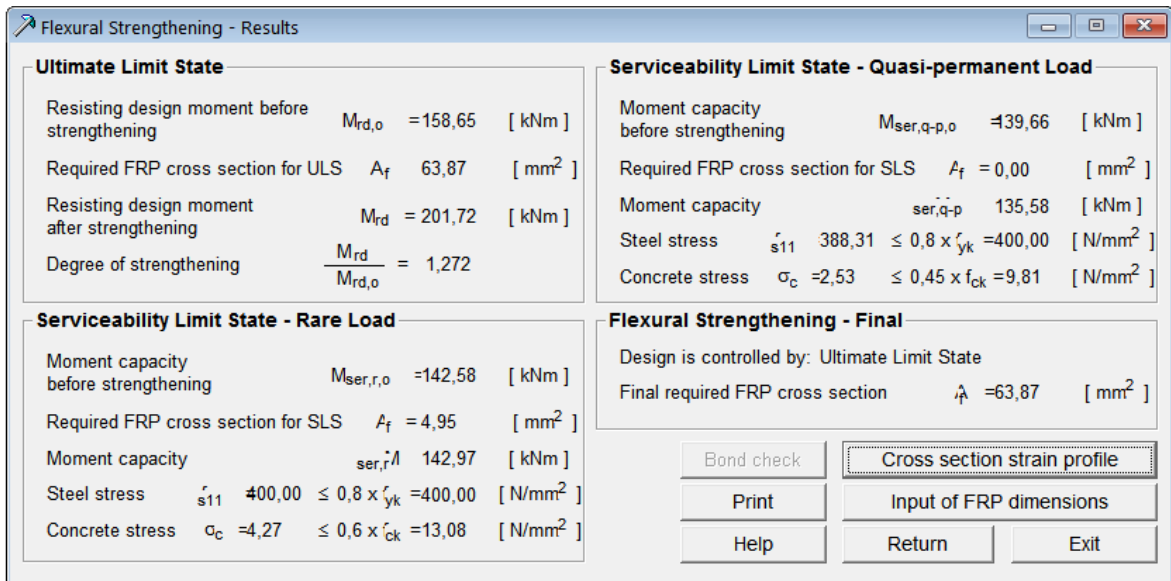


Figura 89 - Resultado inicial de dimensionamento pelo FRP Analysis

[Fonte: Programa FRP Analysis – simulação realizada a 11-04-2014]

Verifica-se, através da figura 89, que a situação mais condicionante é para a verificação dos Estados Limites Últimos, pelo que o programa assume a área final de reforço obtida através de ELU. A área necessária é obtida pelo processo de cálculo matemático do programa, pelo que após a determinação desta, é pedido que se ajuste para os padrões de compósitos disponibilizados pela Sika, conforme se pode visualizar na figura 90.

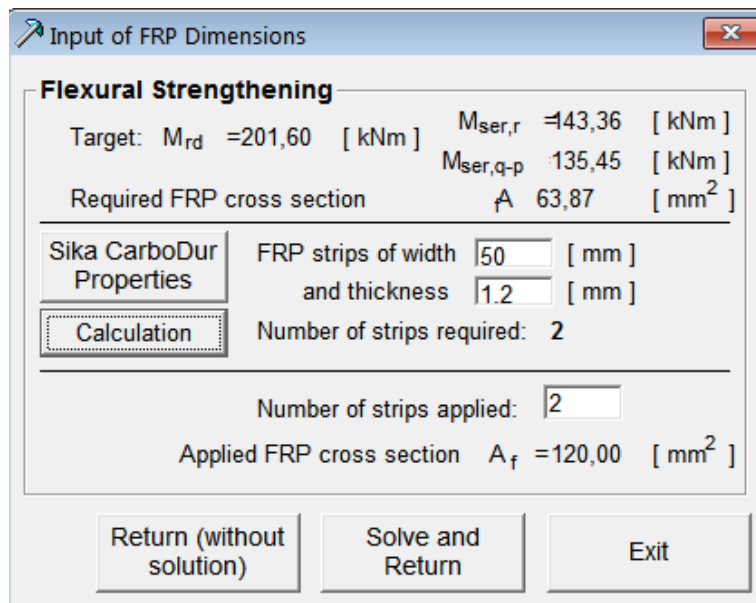


Figura 90 - Ajuste de solução com medidas comerciais

[Fonte: Programa FRP Analysis – simulação realizada a 11-04-2014]

Foi selecionado um compósito de lâmina de fibra de carbono, com 50 mm de largura e 1,2 mm de espessura (60 mm²), pelo que a secção transversal de uma lâmina não se mostra suficiente, uma vez que a área mínima necessária é de 63,87 mm². Em resultado, foram selecionadas duas lâminas, com um total de 120 mm² de área transversal.

Com a escolha de uma solução ajustada às soluções padrão de mercado, o programa reajusta os valores de momentos resistentes obtidos anteriormente. A figura 91 ilustra os valores ajustados de momentos resistentes, calculados pelo programa FRP Analysis.

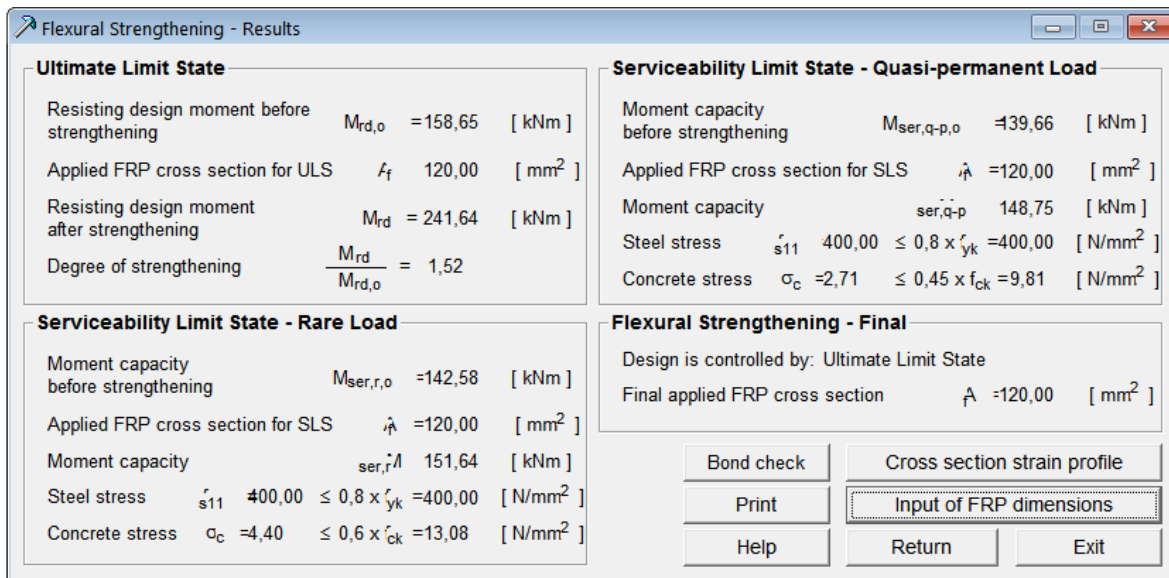


Figura 91 - Resultados com solução final de reforço

[Fonte: Programa FRP Analysis – simulação realizada a 11-04-2014]

A solução final apresentada por este programa é a aplicação de duas lâminas de fibra de carbono com 50 mm de largura e 1,2 mm de espessura cada uma. Tendo, aproximadamente, um aumento de 52% de resistência.

10.2.2 SIMULAÇÃO COM O SOFTWARE “SIKA CARBODUR”

À semelhança da simulação realizada com o programa “FRP Analysis”, a simulação realizada com o programa Sika CarboDur teve por base as informações gerais da viga, descritas anteriormente, com as mesmas considerações de momentos atuantes e momentos resistentes iniciais e requeridos após o reforço.

Os campos de introdução de dados são semelhantes ao da versão atual, embora o programa, que se pretende implementar, permita a criação de secções mais desenvolvidas e de geometria variável, não se limitando a secções em T ou retangulares.

As premissas para o início de cálculo são a definição do tipo de reforço (flexão, corte ou encamisamento), da resistência à compressão característica de betão com o respetivo coeficiente de segurança aplicável ao país (no Brasil o coeficiente de segurança é de 1,4), da armadura interna com as respetivas distâncias da face de betão e o coeficiente de segurança aplicável ao país (no Brasil o coeficiente de segurança é de 1,15), o momento resistente antes do reforço, o momento resistente requerido para ELU, o momento resistente requerido para ELS (combinação de ações características e quase-permanentes). Ver figuras 92, 93 e 94.

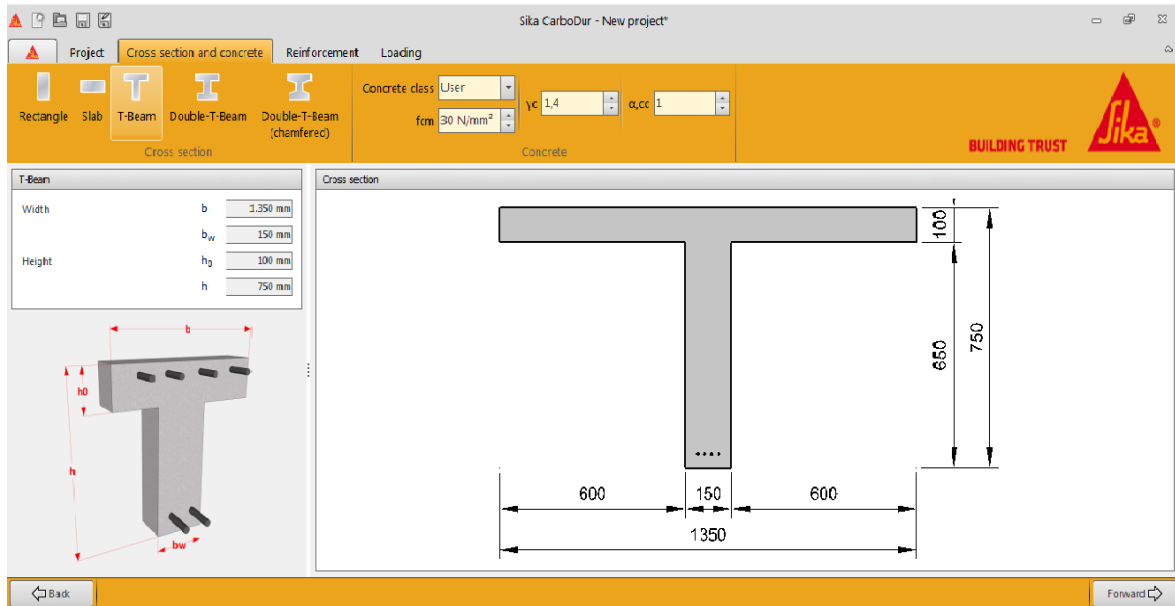


Figura 92 – Definição da secção de viga, resistência do betão e coeficiente de segurança

[Fonte: Programa Sika CARboDur – simulação realizada a 11-04-2014]

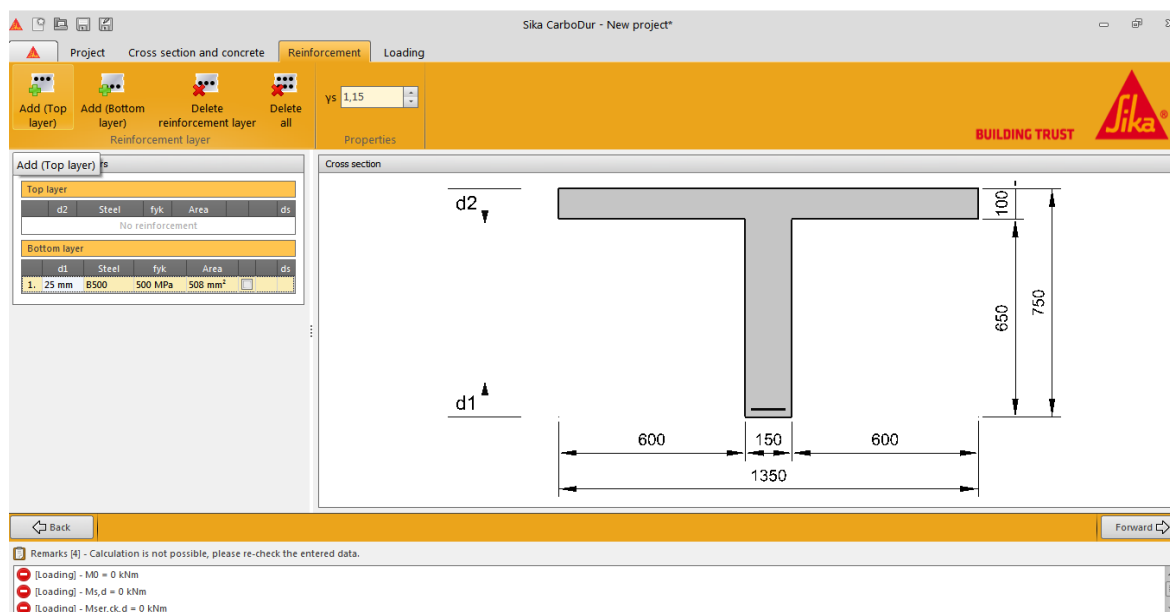


Figura 93 - Definição da armadura interna

[Fonte: Programa Sika CarboDur – simulação realizada a 11-04-2014]

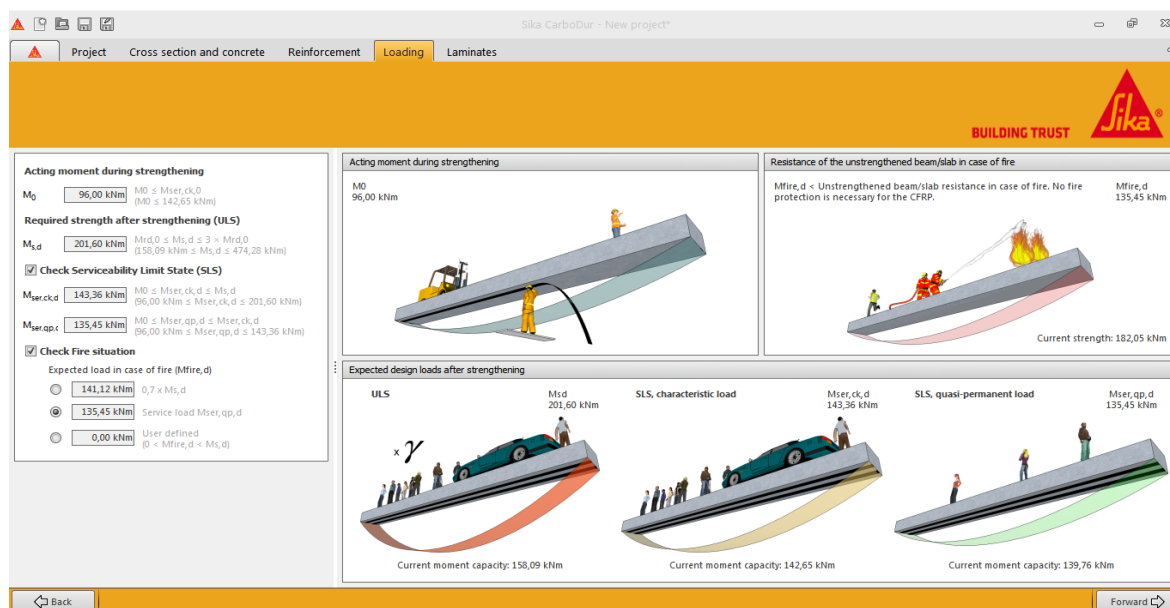


Figura 94 - Introdução dos momentos para dimensionamento

[Fonte: Programa Sika CarboDur – simulação realizada a 11-04-2014]

O programa permite, também, a verificação da necessidade de proteção ao fogo do sistema, assumindo o valor do momento em serviço para a combinação de ações quase-permanentes, o

valor de 70% do momento requerido após o reforço ou o momento definido pelo utilizador (figura 94).

À semelhança do programa “FRP Analysis”, a limitação de extensão do compósito é importante para a solução final de área de reforço necessária. Logicamente, quanto menor for a extensão permitida pelo utilizador, maior vai ser a área necessária de FRP. A figura 95 ilustra o campo que permite a limitação de extensão e as possíveis soluções de reforço de lâminas disponíveis no mercado. A área de reforço necessária é de 63 mm^2 , no entanto são necessárias, no mínimo, o uso de 2 lâminas de 60 mm^2 .

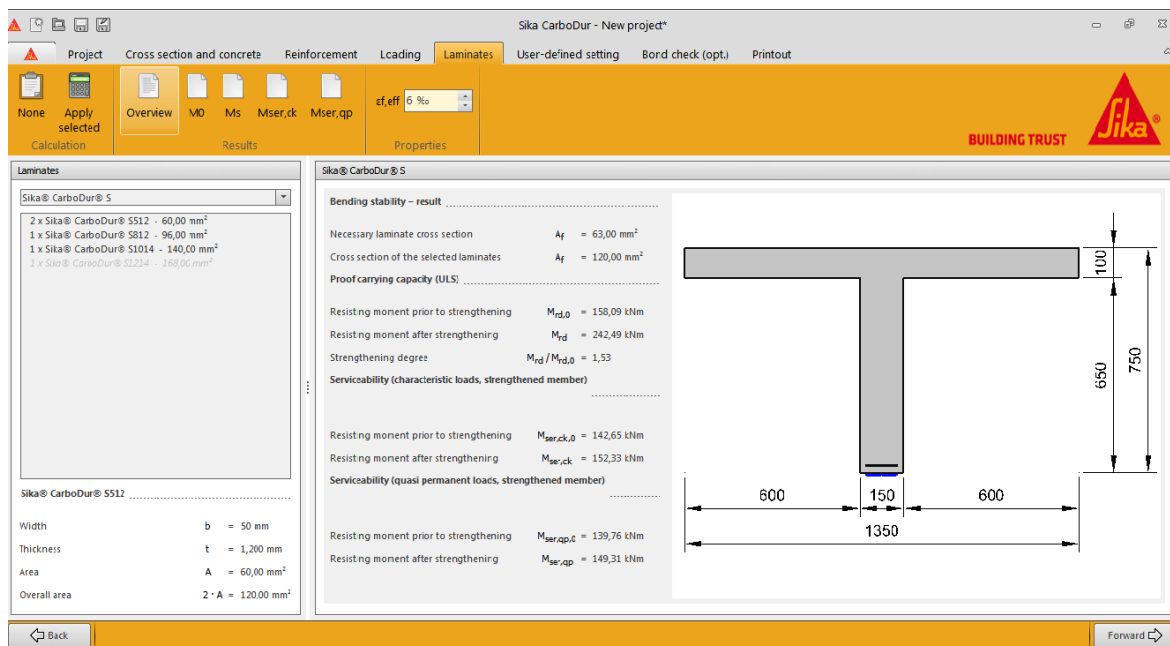


Figura 95 - Solução final de reforço pelo programa Sika CarboDur

[Fonte: Programa Sika CarboDur – simulação realizada a 11-04-2014]

A solução final foi a mesma nos dois programas, sendo que em ambos a área de reforço necessária foi de 63 mm^2 , tendo a solução mínima adotada de 2 lâminas de $50 \text{ mm} \times 1,2 \text{ mm}$ (60 mm^2). As comparações dos resultados obtidos podem ser avaliados no ponto seguinte.

10.3 COMPARAÇÃO DE SIMULAÇÕES

Este ponto tem como objetivo resumir os valores essenciais extraídos em ambos os programas de dimensionamento de reforço de compósitos de fibra de carbono, apontando as principais diferenças e as vantagens para projetistas no uso de programas de dimensionamento. O modelo de cálculo em ambos segue os pressupostos definidos no Bulletin 14 *fib*:01, aplicando métodos de cálculo

auxiliares e adicionais com base no Eurocódigo 2 – Projecto de estruturas de betão. De maneira a facilitar a visualização dos resultados, os mesmos encontram-se na tabela 11.

Tabela 11 - Resultados para ELU e ELS nos dois programas

		Resultados	FRP Analysis	Sika CarboDur
ELU		$M_{Rd,0}$	158,65 kN.m	158,09 kN.m
		$A_{f,requerida}$	63,87 mm ²	63,00 mm ²
		$A_{f,aplicada}$	120,00 mm ²	120,00 mm ²
		$M_{Rd,reforço}$	241,64 kN.m	242,49 kN.m
ELS	Combinação Característica de Ações	$M_{ser,r,0}$	142,58 kN.m	142,65 kN.m
		$A_{f,requerida}$	4,95 mm ²	9,00 mm ²
		$M_{ser,r}$	151,64 kN.m	152,33 kN.m
	Combinação Quase- Permanente de Ações	$M_{ser,q-p,0}$	139,66 kN.m	139,76 kN.m
		$A_{f,requerida}$	0,00 mm ²	0,00 mm ²
		$M_{ser,q-p}$	148,75 kN.m	149,31 kN.m

Em que:

$M_{Rd,0}$ – momento resistente antes do reforço para ELU;

$A_{f,requerida}$ – área de compósito para reforço;

$A_{f,aplicada}$ – área de solução de reforço obtida;

$M_{Rd,reforço}$ – momento resistente após o reforço para ELU;

$M_{ser,r,0}$ – momento resistente antes do reforço para ELS na combinação característica de ações;

$M_{ser,r}$ – momento resistente após o reforço para ELS na combinação característica de ações;

$M_{ser,q-p,0}$ – momento resistente antes do reforço para ELS na combinação quase-permanente de ações;

$M_{ser,q-p}$ – momento resistente após o reforço para ELS na combinação quase-permanente de ações.

Conforme se pode verificar na tabela 11, os valores obtidos em ambos os programas de dimensionamento são bastante semelhantes, uma vez que os processos de cálculo são baseados nas mesmas considerações. As diferenças que existem nos resultados são reflexo do impedimento de alteração de dados automaticamente introduzidos no programa. Como exemplo, refere-se o impedimento na alteração do coeficiente de segurança do betão no programa FRP Analysis, que o programa atual assume automaticamente o valor de 1,5, sendo que no Brasil, de acordo com a ABNT NBR 6118, o coeficiente de segurança do betão assume o valor de 1,4. Existirão, certamente, outros fatores de programação que influenciam a pequena variação dos resultados entre um software e o outro, que não se verificam de todo significativos para a solução final.

A grande vantagem do programa Sika CarboDur é a possibilidade de criação de secções mais arrojadas, que no uso do programa FRP Analysis se verifica muito limitativo. A possibilidade de verificação da necessidade de proteção ao fogo é um ponto de grande importância, sendo que a verificação é baseada nas condições da estrutura inicial e não em função das características do adesivo ou da fibra de carbono. Isto significa, na opinião da Sika, que a característica do sistema compósito à situação de incêndio é importante para que o projetista/aplicador estejam informados do comportamento do mesmo num possível cenário de fogo, mas que a verificação de segurança em situação de incêndio deve ser analisada pelas características da estrutura inicial (antes do reforço), conforme é aconselhado pela *fib*, no Bulletin 14 *fib*:01.

Conforme os resultados, a situação mais desfavorável para a estrutura é na verificação ao Estado Limite Último, onde a estrutura apresenta, em ambos os programas, uma solução de reforço com incremento de aproximadamente 50% no momento resistente.

10.4 VALIDADE DE APLICABILIDADE DO SOFTWARE

Um dos maiores desafios que se interpõe a este programa é a verificação real da sua aplicabilidade e a contextualização do seu uso. É importante avaliar o impacto positivo, bem como o impacto negativo, que este tipo de soluções pode provocar no caso de uso indevido ou inexperiente.

O programa foi desenvolvido para auxiliar os projetistas no processo de dimensionamento de soluções de reforço com compósitos de fibra de carbono. Não se pretende, com a implementação deste programa de dimensionamento, a desvirtualização, a desresponsabilização ou o facilitismo do processo de dimensionamento elaborado através de outros métodos de cálculo. O objetivo principal do programa, no dimensionamento à flexão, é auxiliar no cálculo para situações genéricas de reforço, que permitam ao projetista avaliar as resistências obtidas pelo programa, verificar a resistência de ancoragem, bem como dimensionar o seu comprimento máximo e mínimo e verificar a necessidade de sistemas de proteção ao fogo.

As premissas de cálculo permitem que o programa seja adaptável a nível mundial, principalmente pela possibilidade de alteração dos coeficientes parciais de segurança, tanto no betão como no aço. Além disso, permite ao utilizador a limitação de extensão de FRP, valor esse que varia em função do documento normativo que se segue. Os pressupostos de cálculo estão fundamentados nas indicações da *fib*, no entanto, existem parâmetros que permitem flexibilidade na consideração, por exemplo, do momento resistente ao fogo, conforme indicado no ponto 10.2.2.

Tecnicamente, o programa está desenvolvido para cumprir as considerações necessárias de dimensionamento. No entanto, o seu maior desafio é a atual viabilidade do seu uso nos gabinetes de projeto. Acontece que, na grande maioria dos casos de reforço, a solução de CFRP está combinada com outro tipo de solução de reforço convencional, sendo esta uma situação que não se encontra disponível no programa de dimensionamento. O programa assume uma solução de reforço inteiramente realizada por compósitos de fibra de carbono, o que à partida exclui a possibilidade de dimensionamento para situações combinadas. Outra limitação que impede o uso do programa convenientemente, é o desconhecimento real da estrutura a reforçar, como a disposição e quantidade de armadura interior, as condições de carregamento reais, entre outras que já foram destacadas em pormenor anteriormente.

A falta de divulgação técnica a respeito do dimensionamento de FRP faz com que muitos projetistas procedam a métodos de dimensionamento que não se adaptam de todo aos modelos de cálculo previstos nas normas, guias de dimensionamento ou até mesmo nos programas de auxílio ao dimensionamento. É necessário que os projetistas estejam disponíveis para a formação técnica neste sentido, e que entendam que no processo de dimensionamento de um reforço à flexão com compósito de fibra de carbono não se procede da mesma forma que no dimensionamento de um reforço à flexão com armaduras metálicas, por exemplo. Com o objetivo de formalizar esta solução, é necessário fazer um esforço conjunto entre o mercado e as entidades educativas de engenharia para promover o correto manuseamento desta tecnologia.

11 Conclusões e Observações

A par das conclusões que foram expostas no decorrer deste documento, serve o presente capítulo para elencar as conclusões, observações e contribuir com algumas considerações, para a realização de trabalhos futuros no âmbito do reforço estrutural com compósitos de fibras.

A oportunidade de realização de um estágio curricular na empresa Sika, “abriu portas” para o conhecimento de uma nova tecnologia de reforço, conhecida até então, de forma muito generalizada e teórica. Neste momento, existe um conhecimento daqueles que são os principais sistemas de reforço com compósitos FRP, das respetivas características, vantagens, desvantagens, cuidados na sua aplicação, entre outros. O contacto direto com os produtos, que envolvem os sistemas CFRP, permitiu a aquisição de novos conceitos cedidos por profissionais da área, desde técnicos da Sika, projetistas e aplicadores. Após a realização da pesquisa necessária para a elaboração deste documento, pode concluir-se que a utilização de sistemas CFRP, apesar de estar em mercado oficialmente desde a década de 80, ainda parece ter muito a desenvolver. Fundamentalmente, conclui-se que os processos de fabrico e os sistemas de aplicação estão bem definidos pela prática comum e pelo conhecimento experimentado, no entanto, a vertente teórica e processos de dimensionamento não estão ainda muito difundidos, pelo que muitas vezes se incorrem em erros grosseiros na fase de projeto.

A fase de projeto de um reforço CFRP deve ser vista com a mesma seriedade que um projeto estrutural de betão armado, onde o projetista segue os pressupostos normativos bem definidos. O facto de não se ter ainda um documento de carácter vinculativo e normativo, dá a oportunidade de justificação para processos de dimensionamento pouco ortodoxos. Processos esses que, eventualmente poderão pôr em causa a segurança da estrutura e até mesmo a segurança dos utilizadores da mesma. Devem ser feitos esforços no sentido de sensibilizar os profissionais da área a renovar os seus conhecimentos técnicos, com peritos especializados, que altere a postura que promove dimensionamentos pouco lógicos ou a sobredimensionamentos que, como se sabe, poderão pôr em causa a segurança da estrutura, conforme foi referido especificamente neste documento.

Do conhecimento adquirido, pode afirmar-se que a utilização de sistemas compósitos apresenta múltiplas vantagens em contraste com os sistemas de reforço convencionais. A facilidade da sua aplicação, a rapidez de execução, a durabilidade, o baixo peso próprio do reforço, a flexibilidade dos elementos são exemplos de vantagens que se podem encontrar nos CFRP. Evidentemente, o sistema não é perfeito, nem infalível, como muitos querem fazer parecer. O reforço com CFRP tem as suas debilidades como a mão-de-obra especializada para a sua aplicação e a resistência do adesivo à situação de incêndio. Existe uma vantagem no uso de sistemas compósitos que é o

aumento de esforço resistente da estrutura pelo bom desempenho do módulo de elasticidade e da resistência à tração dos compósitos de fibra de carbono. No entanto, exaltar o reforço CFRP como tendo uma resistência dez vezes superior ao aço, é um erro grave que ocorre frequentemente. Analisando isoladamente um tecido de fibra de carbono, ele certamente terá uma resistência à tração muitíssimo superior ao aço, no entanto, quando o tecido é impregnado com a resina de colagem, a sua resistência à tração tem um decréscimo considerável. Por outro lado, a limitação de extensão do FRP reduz automaticamente a força máxima que poderá ser aplicada naquele sistema, o que certamente não será coincidente com os valores enfatizadores de alguns fornecedores.

A situação de incêndio é ainda hoje, uma questão que tem dado azo a opiniões divergentes. Conforme foi referido várias vezes neste documento, é da opinião do autor que a situação de incêndio não poderá ser uma justificação para o não uso da tecnologia de colagem exterior de CFRP. As fundamentações de opinião foram dadas no capítulo 6, no entanto, é de salientar que está sugerida, em vários documentos de dimensionamento, a verificação da situação de incêndio para estrutura sem reforço. Caso haja falha total do reforço numa situação de incêndio, a estrutura terá de ter as características necessárias para resistir à situação de incêndio, em função do tipo de edificação ou estrutura. É consensual que, numa situação de incêndio, a maior resistência possível do sistema de reforço é uma característica desejável, pelo que já existem mecanismos de proteção ao fogo que poderão minimizar os efeitos de ação do fogo.

A análise feita às fichas técnicas dos principais fabricantes de sistemas CFRP no Brasil, demonstrou uma disparidade no tipo e na quantidade de informação cedida pelos mesmos. Acontece que, enquanto a exigência de dimensionamento sob considerações normativas não estiver totalmente definida, não existe qualquer obrigatoriedade por parte dos fabricantes na divulgação de informação profundamente técnica. A divulgação de informação genérica, até mesmo enganosa, parece funcionar nos padrões que se tem dado a esta tecnologia. É da opinião do autor, que se deve continuar a trabalhar no sentido de providenciar informação técnica a todos os intervenientes para garantir tanto a seriedade como a segurança do sistema, passando por fornecedores, projetistas, aplicadores e até mesmo professores e estudantes de engenharia.

Ferramentas, como os programas auxiliares de cálculo, devem continuar a ser desenvolvidas com o objetivo de reforçar o caráter metódico de cálculo inerente a um reforço com FRP e desvincular a ideia de que um reforço deste género não pressupõe conceitos teóricos da engenharia e que simplesmente se baseia na prática comum e na experiência de quem com ele trabalha. É de notar que a experiência neste assunto é de suma importância, no entanto deixa-se claro que a experiência combinada com o conhecimento teórico promove uma mudança ideológica para os que usam este sistema e para aqueles que ainda não confiam ou não acreditam nas potencialidades do mesmo.

Com o trabalho desenvolvido no departamento de Refurbishment da Sika Brasil (Reforço e Recuperação), foi possível criar uma postura crítica em relação a determinados aspetos do reforço estrutural com compósitos de fibra de carbono. No início da pesquisa, foi consultada muita informação que valorizava exageradamente as características mecânicas dos FRP, alegando grandes valores de módulo de elasticidade e de resistência à tração. Na verdade, podem encontrar-se fibras de carbono com características muito superiores a uma chapa metálica, mas tem de se avaliar a questão com aspeto crítico e analisar os detalhes como a limitação de extensão, limitação de reforço no encamisamento para impedir a rotura frágil, a diminuição da capacidade resistente de uma fibra combinada com o adesivo, entre outros. A situação de incêndio, por exemplo, para um compósito colado externamente à superfície de betão, é uma consideração a ter em conta e de elevada importância. Já foi referido nesta conclusão que, apesar do elemento a ser reforçado ter de cumprir os requisitos de verificação à situação de incêndio sem o reforço, devem ser contemplados mecanismos ou soluções que minimizem o grau de estragos na ocorrência de um incêndio.

De acordo com a necessidade de melhoria dos sistemas e evitar argumentação sistemática das características do adesivo à situação de fogo, o autor procedeu a um aconselhamento de novas soluções para o mercado da Sika Brasil, como sistemas de ancoragem mecânica, para impedir o descolamento nas extremidades no caso de incêndio e para a possibilidade de realização de pré-tensão no compósito. Também serão introduzidas, na gama de produtos da Sika Brasil, lâminas de fibra de carbono com diferentes espessuras, para se poder fornecer ao mercado mais variedade de soluções, nomeadamente lâminas que possibilitem a técnica NSM (Near Surfaced Mounted). A técnica NSM permite que sejam introduzidas as lâminas de fibra de carbono no interior da estrutura de betão, pelo recobrimento mínimo exigível, sendo que o reforço nesta situação fica mais salvaguardado da situação de incêndio. A introdução de lâminas para NSM pressupõe a acoplagem de uma argamassa polimérica para selar as ranhuras de introdução das mesmas.

É do entendimento do autor, que devem continuar a ser introduzidos, nos planos de estudo, os mecanismos teóricos e práticos de novas soluções de reforço estrutural, sendo que existe um crescimento gradual de novas soluções e as novas gerações de engenheiros devem acompanhar esse crescimento desde a sua formação académica. Deve ser feito um esforço contínuo entre as entidades de ensino e o mercado para promover a investigação e a publicação de artigos científicos, como tem sido feito por algumas entidades de ensino portuguesas, pela partilha de informação e conhecimentos. Considera-se importante que os trabalhos académicos, neste âmbito, aumentem e se foquem com mais detalhe, uma vez que o reforço com FRP é uma matéria muito ampla e passível de dispersão.

A realização de ensaios laboratoriais era uma ambição para este trabalho, que terminou por não se concretizar. Existiu a possibilidade de realização de ensaios laboratoriais, para vigas submetidas à

flexão, na Universidade São Judas (São Paulo), mas, lamentavelmente, não foi possível a realização dos mesmos a tempo de introduzir neste trabalho, devido ao tempo de cura do betão dos corpos de prova. Outro ensaio previsto seria o ensaio de tração de um tecido unidirecional impregnado com resina, que também terminou por não se concretizar devido às características dos equipamentos de ensaio, que não respeitavam os requisitos normativos e pelas pegadas de tração não terem a força mínima de rotura de FRP, conforme ficha técnica da Sika. Seria muito positivo para este trabalho a realização desses mesmos ensaios, para comparações do que se pode consultar na teoria em contraste com a prática.

Para finalizar, a pesquisa realizada focou o reforço à flexão e reforço ao corte, no entanto verificou-se, após este trabalho, que o reforço ao encamisamento ainda não se encontra tão desenvolvido como os outros tipos de reforço. Pelo que se tornaria interessante, para trabalhos futuros, uma abordagem ao reforço por encamisamento, tanto para aprendizagem do autor, como para melhoria da informação atualmente disponível.

Referências bibliográficas

Azevedo D., 2008. Reforço de estruturas de betão com colagem ed sistemas compósitos de CFRP, Recomendações para Dimensionamento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 238 pp. (Dissertação de Mestrado).

Buletin 14 *fib*:01, 2001. Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures, Technical Report on the Design and Use of Externally Bonded Fibre Reinforced Polymer Reinforcement (FRP EBR) for Reinforced Concrete Structures, Task Group 9.3 FRP Reinforcement for Concrete Structures, International Federation for Structural Concrete (*fib*), Switzerland.

Carrazedo R., 2005. Mecanismos de confinamento em pilares de concreto encamisados com polímeros reforçados com fibras submetidos à flexo-compressão. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. (Tese de Doutoramento).

Carvalho T., 2010. Reforço à flexão de vigas de betão armado com compósitos de CFRP. Universidade Nova de Lisboa. 185 pp (Dissertação de Mestrado).

Filho A., Sousa S. & Dutra M., 2009. Um estudo sobre materiais compósitos e a sua aplicação na produção de dutos para perfuração de petróleo. V Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Belo Horizonte – Minas Gerais. Brasil. 9 pp.

Juvandes L., 2002. Materiais Compósitos Reforçados com Fibras, FRP. Formação Profissional – Ordem dos Engenheiros, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Laboratório de Estruturas, Departamento de Engenharia Civil. 76 pp.

Juvandes L., 2002. Reforço e reabilitação de estruturas, Módulo 2. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 93 pp.

Lebrão G., 2008. Fibra de Carbono. Revista Plástico Sul. 3 pp.

Leite C., 2010. Reforço estrutural em vigas de concreto armado aplicando-se mantas flexíveis de fibra de carbono. Universidade Federal da Bahia. 130 pp. (Monografia de Bacherelato).

Machado A., ano não identificado. Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono. Editora & Gráfica Digital Better. 206 pp.

Manzano M., 2012. Análise experimental do reforço híbrido de vigas “T” de concreto armado com colagem externa de compósitos de fibras de carbono e de vidro. Universidade de Brasília. (Dissertação de Mestrado).

Documentação consultada

NP EN 1990:2009 – Eurocódigo – Bases para projecto de estruturas

Oliveira C., 2012. Sistemas de proteção para concreto reforçado com CFRP em situação de incêndio. Universidade Estadual de Campinas. 313 pp. (Tese de Doutorado).

Rodrigues C., 2013. Apontamentos teóricos de apresentação número 1 a número 14 da disciplina de Inspeção e Reforço de Estruturas do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP).

Rodrigues T., 2009. Reforço de estruturas com FRP's. Universidade de Aveiro. 178 pp (Dissertação de Mestrado).

Silva J., 2013. Comportamento ao fogo de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de fibras de carbono (CFRP). Instituto Técnico de Lisboa. 191 pp. (Dissertação de Mestrado).

Sika Services AG, 2014. Technical Article – Design and protection in case of fire. SikaWrap and Sika CarboDur. Version 1.0. 12 pp.

Tarso P., 2005. Dimensionamento de Reforços Estruturais com Compósitos de Fibra de Carbono À Luz da NBR 6118. Brasil. 55 pp.

Documentação consultada

ABNT NBR 6118, 2007 – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma Brasileira. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Brasil. 221 pp.

ACI 178 – American Concrete Institute, 2008. Acceptance criteria for inspection and verification of concrete and reinforced and unreinforced masonry strengthening using fiber-reinforced polymer (FRP) composite systems. American Concrete Institute. 7 pp.

ACI 318-95, 1995. Building Code Requirements for Structural Concrete. American Concrete Institute. 373 pp.

ACI 440.2R-08, 2008. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. American Concrete Institute. 80 pp.

Al-Mahaidi R., Taplin G. & Susa J., un-known date. Strengthening of Shear-Damaged Reinforced Concrete T-Beam Bridges with CFRP strips. Department of Civil Engineering, Monash University, Clayton, Australia.

BS EN ISO 527-5 – British Standard (European Standard), 2009. Plastics – Determination of tensile properties. Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites.

Carneiro L. & Teixeira A., 2009. Aplicações de materiais compósitos de resina e fibras na engenharia de construção. Instituto Militar de Engenharia do Brasil.

Castro P., 1997. Barras de FRP: Avaliando o Módulo de Elasticidade não Destrutivamente. Universidade Federal Fluminense, Niteroi, Rio de Janeiro, Brasil. (Relatório de Ensaio).

Dias S., Juvandes L. & Figueiras J., 2002. Comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão com sistemas compósitos de CFRP Unidirecionais. Estudo laboratorial número 14. Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil. 14 pp.

Einsfeld R., Velasco M. & Sánchez E., 2006. Modelo de dimensionamento à força cortante de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibras de carbono. 48º Congresso Brasileiro do Concreto. Brasil. 13 pp.

França P., Costa A. & Appleton J., 2004. Reforço de estruturas com laminados de CFRP Pré-esforçados. Encontro Nacional Betão Estrutural, 2004.

Haddad M., Bandeira A., Merighi J., Fortes R., Prizskulnik S. & Junior A., 2008. Theoretical, computational and experimental analysis of concrete structures reinforced with carbon fiber. Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2008). Zurich, Switzerland. 6 pp.

ISO 527-1 – International Standard, 2012. Determination of tensile properties. Part 1 – General Principles.

Jacob J., 2007. Flexural Strengthening of Glued Laminated Timber Beams with Steel and Carbon Fiber Reinforced Polymers. Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology. Goteborg, Sweden. 164 pp. (Tese de Mestrado).

Matos D., ano não identificado. Apontamentos das aulas teóricas da disciplina Conservação e Reabilitação de Estruturas da Licenciatura em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 62 pp.

Menon N. & Padaratz I., 2008. Desempenho de duas técnicas de reforço ao cisalhamento em vigas de concreto armado através de inserção de laminados de CFRP. Revista Tecnológica, volume 17, pp. 19-28.

Nanni A. & Lopez A., 2006. Composite Strengthening Technologies – Field evaluation and monitoring of five reinforced concrete bridges. 12th International Congress on the Chemistry Cement. Montréal, Canada.

NP EN 1991-1-1:2009 – Eurocódigo 1 – Acções em estruturas, Parte 1-1: Acções gerais

NP EN 1991-1-2:2009 – Eurocódigo 1 – Acções em estruturas, Parte 1-2: Acções gerais, Acções em estruturas expostas ao fogo

NP EN 1992-1-1:2010 – Eurocódigo 2 – Projecto de estruturas de betão, Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios

NP EN 1992-1-2:2010 – Eurocódigo 2 – Projecto de estruturas de betão, Parte 1-2: Regras gerais, Verificação da resistência ao fogo

Pereira B., 2005. Estudo do reforço externo à força cortante em vigas de concreto armado utilizando compósitos de fibras de carbono. Capítulo 2. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. (Dissertação de Mestrado).

Silva B., ano não identificado. Projecto de Reforço de um Edifício com CFRP Pré-Esforçado. Instituto Superior Técnico. 106 pp. (Dissertação de Mestrado).

Silva J., 2005. Pré-impregnados de matriz termoplástica: fabrico e transformação por compressão a quente e enrolamento filamentar. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 301 pp. (Dissertação de Doutoramento).

Sika Services AG, 2004. Sika at Work No 1 – Structural Strengthening, Case Study on the longest post-tensioned CFRP plate: Audi plant in Gyor (Hungary).

Sika Services AG, 2004. Sika at Work No 5 – Structural Strengthening, An important Russia Sika CarboDur Project: Dmitrovskoye Shosse Bridge, Moscow.

Sika Services AG, 2005. Sika at Work No 02 – Refurbishment and Structural Strengthening, Strengthening of the first Cooling Tower in Germany with SikaWrap Fabrics – A Case Study.

Sika Services AG, 2005. Sika at Work No 05 – Seismic upgrading of Buildings with Sika Composite Strengthening Systems, International Case Studies.

Sika Services AG, 2006. Test Specification – Procedure for the Evaluation of the SikaWrap Laminate Properties. Switzerland.

Sika Services AG, 2007. Sika at Work No 01.07 – Strengthening with Post-tensioned CarboDur CFRP Plates, Increasing Earthquake Resistance.

Sika Services AG, 2008. Sika at Work No 08.08 – Bridge Strengthening with CFRP, Case Studies in Bulgaria.

Sika Services AG, 2010. Sika at Work No 01.10 – Rehabilitation and Strengthening, Hopkings & Clinton Street Bridges, Ohio.

Sika Services AG, 2014. Method Statement Sika CarboDur Near Surface Mounted Reinforcement. Version 2.1. 13 pp.

Sika Services AG, 2014. Method Statement Sika CarboDur System. Version 2.0. 16 pp.

Sika Services AG, 2014. Method Statement SikaWrap wet application. Version 2.0. 17 pp.

Sika Services AG, 2014. Method Statement Sika CarboShear L System. Version 2.0. 17 pp.

Sika, 1998. Bonding of CFRP strips under dynamics load. Static testing of prestressed narrow slabs post-strengthened with CFRP strips. Report No. 170'569e-1, Section 116. Sika Services AG.

Sika, 2006. Guía de Diseño e Instalación – Platinas Sika CarboDur, Tejidos SikaWrap, Platinas en forma de L Sika CARboShear, Platinas Preesforzadas Sika Leoba CarboDur y Sika StressHead. Sika Colombia.

Sika, 2013. User Guide Sika Carbodur calculation software. Sika Services AG. Versão 1.

Tarso P., 2005. Critérios para o dimensionamento do reforço do concreto armado com elementos compósitos de fibra de carbono. Congresso de pontes e Estruturas, 2005. Rio de Janeiro, Brasil. 16 pp.

Tarso P., 2005. Uma abordagem sobre o modo de dimensionamento do reforço do concreto armado com elementos compósitos de carbono – Mitos e Verdades. Botafogo, Rio de Janeiro, Brasil. 17 pp.

Transportation Research Board of the National Academies, NCHRP – National Cooperative Highway Research Program, 2003. Bonded Repair and Retrofit of Concrete Structures Using FRP Composites. USA. 102 pp.

Documentação consultada

Vieira F., 2011. Características, Aplicações e Processamento dos Polímeros. Apontamentos teóricos do Bachelorado em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal dos Vales de Jequitinhonha e Mucuri. Minas Gerais, Brasil. 33 pp.

Fichas de produto consultadas:

MC-Bauchemie Brasil Indústria e Comércio Ltda., 2009. Ficha de produto MC-Dur 1209TX.

MC-Bauchemie Brasil Indústria e Comércio Ltda., 2009. Ficha de produto MC-Dur 1209.

MC-Bauchemie Brasil Indústria e Comércio Ltda., 2009. Ficha de produto MC-Dur CF-Sheets.

MC-Bauchemie Brasil Indústria e Comércio Ltda., 2010. Ficha de produto MC-Dur CFK-Lamellen.

MC-Bauchemie Brasil Indústria e Comércio Ltda., 2013. Ficha de produto MC-Dur 1280.

Sika Brasil, 2006. Ficha de produto SikaWrap – 530 C (VP).

Sika Brasil, 2010. Ficha de produto Sikadur 30.

Sika Brasil, 2010. Ficha de produto Sikadur 330.

Sika Brasil, 2013. Ficha de produto Sika Carbodur S.

Sika Brasil, 2013. Ficha de produto SikaWrap – 300 C.

S&P Clever Reinforcement Company. Ficha de produto S&P C-Sheet 240.

S&P Clever Reinforcement Company. Ficha de produto S&P Laminates CFK.

S&P Clever Reinforcement Company. Ficha de produto S&P Resin Epoxy 50/55.

S&P Clever Reinforcement Company. Ficha de produto S&P Resin 220 Epoxy Adhesive.

Viapol, 2011. Ficha de produto Viapol Carbon

Anexos

ANEXO I – FICHAS TÉCNICAS S&P CLEVER REINFORCEMENT COMPANY

ANEXO II – FICHA TÉCNICA VIAPOL

ANEXO III – FICHAS TÉCNICAS MC-BAUCHEMIE

ANEXO IV – FICHAS TÉCNICAS SIKA

ANEXO I – FICHAS TÉCNICAS S&P CLEVER REINFORCEMENT
COMPANY



S&P Laminates CFK

Laminados pré-fabricados em fibra de carbono

01/05

- Dados técnicos dos S&P Laminates CFK**

Tipo: **S&P Laminates CFK 150 / 2000**

Tipo: **S&P Laminates CFK 200 / 2000**

Laminados aplicados superficialmente:

Tipo de Laminado	Secção transversal	Força de tracção a 0.6 % de extensão	Força de tracção a 0.8 % de extensão
150/2000 Resistência à tracção: > 2800 N/mm ² Modulo de elasticidade: 168'000 N/mm ²	[mm ²]	Resistência à tracção teórica para o cálculo: 1000 N/mm²	Resistência à tracção teórica para o cálculo: 1300 N/mm²
50 / 1.2	60	60.0 kN	78.0 kN
50 / 1.4	70	70.0 kN	91.0 kN
60 / 1.4	84	84.0 kN	109.2 kN
80 / 1.2	96	96.0 kN	124.8 kN
80 / 1.4	112	112.0 kN	145.6 kN
90 / 1.4	126	126.0 kN	163.8 kN
100 / 1.2	120	120.0 kN	156.0 kN
100 / 1.4	140	140.0 kN	182.0 kN
120 / 1.2	144	144.0 kN	187.2 kN
120 / 1.4	168	168.0 kN	218.4 kN
200/2000 Resistência à tracção: > 2500 N/mm ² Modulo de elasticidade: 210'000 N/mm ²	[mm ²]	Resistência à tracção teórica para o cálculo: 1250 N/mm²	Resistência à tracção teórica para o cálculo: 1650 N/mm²
50 / 1.4	70	87.5 kN	115.5 kN
60 / 1.4	84	105.0 kN	138.6 kN
80 / 1.4	112	151.0 kN	184.8 kN
90 / 1.4	126	170.1 kN	207.9 kN
100 / 1.4	140	189.0 kN	231.0 kN
120 / 1.4	168	226.8 kN	277.2 kN

Laminados aplicados em ranhuras (Cut in):

Tipo de laminado	Secção transversal	Resistência à tracção recomendada para o cálculo:
150/2000 Módulo de elasticidade: 168kN/mm ²	[mm ²]	Resistência à tracção recomendada para o cálculo: 1850 N/mm²
10 / 1.4	14	25.9 kN
20 / 1.4 *	28	51.8 kN
200/2000 Modulo de elasticidade: 210 kN/mm ²	[mm ²]	Resistência à tracção recomendada para o cálculo: 2200 N/mm²
10 / 1.4 *	14	30.8 kN
20 / 1.4 *	28	61.6 kN

*)Sob pedidot, em grandes quantidades!

• **Embalagens**

Rolos de 150 ml ou cortados à medida. Esta disponível uma máquina de desenrolamento dos laminados. Dimensões especiais sob pedido.

• **Aplicação**

Os S&P Laminates CFK são usados por colagem para reforço à flexão de elementos estruturais em betão armado, madeira e pedra natural.

• **Campos de aplicação**

Adaptação e reforço de elementos de betão armado a:

- Modificação do sistema estático
- Incremento de cargas de serviço

Melhoramentos na capacidade de carga:

- Redução de deflexão
- Absorção de vibrações
- Reforço sísmico

Reparações de defeitos em estruturas de betão armado:

- Danos causados por corrosão
- Acidentes, e.g. fogo, impacto, explosões, etc.
- Erros de execução e planeamento

• **Vantagens**

- Peso próprio baixo
- Reduzida espessura de aplicação
- Aplicação económica,
- Elevadas resistências à tracção
- Elevado modulo de elasticidade
- Excelente comportamento à fadiga
- Resistente à corrosão
- Pode ser pintado ou rebocado

- Laminados especiais CFK laminates, e.g. com modulo de elasticidade de 300,000 N/mm², estão disponíveis sob pedido. No entanto aplicação deste tipo de laminados de elevado modulo não é económica já que a utilização da resistência à tracção total é apenas marginal.

Como em todas as indicações e informações técnicas dadas pela nossa empresa, o único propósito desta ficha técnica é descrever a natureza deste produto, bem como as suas possíveis aplicações e campos de uso. No entanto, não garante certas propriedades deste produto ou a sua aplicabilidade para um determinado uso ou aplicação; mais se informa que, as indicações dadas nesta ficha técnica não estão completas. Dado que a ficha técnica esta sujeita a modificações, é dever nos nossos clientes pedir a versão mais atualizada da ficha técnica.

A atualização das fichas técnicas pode ser solicitada em qualquer das nossas delegações. Em adiantamento, termos gerais comerciais são aplicáveis.



Germany:
S&P Reinforcement GmbH
Beyerbachstrasse 5, D-85830 Kriftel
Tel.: +49 6192 96128-30
Fax: +49 6192 96128-29
info@sp-reinforcement.de
www.sp-reinforcement.de

Switzerland:
S&P Clever Reinforcement Company AG
Dammstrasse 2, CH-6440 Brunnen
Tel.: +41 41 825 00 70
Fax: +41 41 825 00 75
info@sp-reinforcement.ch
www.reinforcement.ch

Portugal e Espanha:
Clever Reinforcement Iberica Lda
Quinta Santa Sofia, 2845-263 Seixal
Tel.: +351 21 225 33 71
Fax: +351 21 225 24 36
info@sp-reinforcement.pt
www.frp.ch



S&P C-Sheet 240

Mantas de fibra de carbono para dry e wet lay up

11/04

Dados técnicos (unidireccional)	200 g/m ²	300 g/m ²	400 g/m ²
Módulo elástico [kN/mm ²]	240	240	240
Resistência à tracção [N/mm ²]	3800	3800	3800
Gramagem da fibra [g/m²] (direcção principal)	200	300	400
Gramagem por unidade de área de manta [g/m ²]	230	330	430
Densidade [g/cm ³]	1.7	1.7	1.7
Extensão de rotura [%]	1.55	1.55	1.55
Espessura para o cálculo (Gramagem da fibra/densidade) [mm]	0.117	0.176	0.234
Secção transversal teórica de calculo por 1000 mm largura [mm ²]	117	176	234
Factor de redução para calculo (Laminação manual/ UD)	1.2 (recomendado por S&P)	1.2 (recomendado por S&P)	1.2 (recomendado por S&P)
Força de tracção ultima 1000 mm de largura [kN]	$\frac{117 \times 3800}{1.2} = 370.5$	$\frac{176 \times 3800}{1.2} = 557.3$	$\frac{234 \times 3800}{1.2} = 744.0$
Força de tracção para 1000 mm largura a 0.6% ε para o cálculo [kN]	140	211	282
Embalagens: (Mantas especiais sob pedido)	largura: 300 ou 600 mm comprimento : 150 m	largura: 300 ou 600 mm comprimento: 150 m	largura: 300 ou 600 mm comprimento: 100 m
Aplicação :	<ul style="list-style-type: none"> • Reforço à flexão • Reforço de carga axial em pilares • Reposição de cintas em pilares 		

Nota: Outras gramagens de fibra S&P C-Sheet 240 podem ser fabricadas sob pedido.



Germany:
S&P Reinforcement GmbH
Beyerbachstrasse 5, D-65830 Krieffel
Tel.: +49 6192 96128-30
Fax: +49 6192 96128-29
info@sp-reinforcement.de
www.sp-reinforcement.de

Switzerland:
S&P Clever Reinforcement Company AG
Dammstrasse 2, CH-8440 Brunnen
Tel.: +41 41 825 00 70
Fax: +41 41 825 00 75
info@sp-reinforcement.ch
www.reinforcement.ch

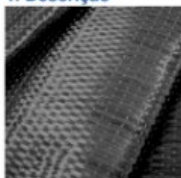
Portugal e España:
Clever Reinforcement Iberica Lda
Quinta Santa Sofia, 2845-263 Seixal
Tel.: +351 21 225 33 71
Fax: +351 21 225 24 36
info@sp-reinforcement.pt
www.frp.ch

ANEXO II – FICHAS TÉCNICAS VIAPOL



Viapol® Carbon

1. Descrição



Viapol® Carbon é um sistema de reforço estrutural à base resinas e fibras de carbono. O sistema está disponível em duas versões, sendo uma moldada in loco, e a outra com o uso de lâminas já pré-fabricadas.

2. Vantagens

O sistema Viapol® Carbon oferece os seguintes benefícios aos usuários:

- Elevada resistência à tração e poder de aderência;
- Fácil aplicação;
- Baixíssimo peso e espessura;
- Rapidez na execução dos reforços;
- Não sofre efeitos de corrosão em ambientes marinhos ou industriais;
- Resistente à fadiga.

3. Características Técnicas

Viapol® Carbon CFW 300

Característica	Especificação	Unidade
Gramatura	300	g/m ²
Espessura da manta	0,166	Mm
Resistência máxima de tração	4900	MPa
Módulo de elasticidade	230	GPa
Alongamento na ruptura	2,1	%

Viapol Carbon Plate 50/12 e 50/14

Característica	Especificação	Unidade
Conteúdo de fibras	> 68	%
Resistência à tração	> 3000	MPa
Módulo de elasticidade	> 165	GPa
Espessura do laminado	1,2 ou 1,4	mm
Largura	50	mm
Alongamento na ruptura	> 1,7	%
Densidade	1,5	g/cm ³

Viapol Carbon Primer

www.viapol.com.br

Pág. 1



Característica	Especificação	Unidade
Cura final	7	dias
Secagem ao toque	de 8 a 12	horas
Resistência à aderência	> 2	MPa
Temperatura de aplicação	10 a 30	° C
Pot life	20 a 50	minutos

Viapol Carbon Stuc

Característica	Especificação	Unidade
Densidade (A+B)	1,45	g/cm ²
Resistência à aderência	> 2	MPa
Secagem ao toque	2	horas
Pot life	40 a 50	minutos

Viapol Carbon Saturante

Característica	Especificação	Unidade
Pot life - 20 °C	aproximadamente 40	minutos
Tempo de secagem ao toque	< 11	horas
Cura total	7	dias
Relação de mistura (p1-P2)	2:1	n/a
Viscosidade	5000	Cps
Resistência à tração	29	MPa
Resistência à compressão	68	MPa
Módulo de compressão	1470	MPa
Resistência ao cisalhamento	9,8	MPa

Viapol Carbon Adesivo

Característica	Especificação	Unidade
Resistência à aderência	> 3,5	MPa
Resistência à compressão	> 60	MPa
Resistência à tração	> 30	MPa
Resistência ao cisalhamento	> 15	MPa
Relação de mistura (P1 - P2)	2:1	n/a
Cura total	7	dias



4. Utilização

Viapol® Carbon é ideal para uso como reforço estrutural em diversos tipos de aplicações, tais como:

- Reforço de vigas e colunas de concreto e madeira;
- Reforço de lajes;
- Reforço em elementos estruturais que terão aumento de cargas;
- Redução de deformações estruturais e movimento de fissuras;
- Reforço em elementos sujeitos a grandes vibrações ou atividades sísmicas;
- Paredes e Chaminés;
- Reforço de estruturas degradadas.

5. Instrução de Uso

Preparo da superfície

Superfície de concreto

A superfície deverá estar sólida, sem partículas soltas, limpa, livre de impregnações, tais como óleos, graxas, nata de cimento, ferrugens, etc. Em se tratando de substratos cimentícios poderá haver umidade de até 4%. Superfícies lisas de concreto devem ser lixadas, de forma a se obter uma superfície porosa. Películas de cura química, pinturas existentes e endurecedores de superfície deverão ser removidos mecanicamente.

Superfície de madeira

A superfície deverá estar perfeitamente fixada e lixada com os rejuntamentos calafetados. Para a perfeita calafetação dos rejuntamentos, recomenda-se o uso da **Massa F12** (fabricada em 11 cores). O lixamento deve ser feito preferencialmente até a lixa 120. Remova completamente o pó de toda a área lixada, com aspirador, vassoura de pêlos e pano. Não utilize a estopa, ela pode deixar fiapos na superfície.

Aplicação

Preparo da Superfície de concreto

A superfície deverá estar sólida, com resistência à compressão de no mínimo 18 MPa, sem partículas soltas, limpa, livre de impregnações, como óleo, graxa, nata de cimento, ferrugens, desmoldante, tinta, etc. Poderá haver umidade, porém, sem saturação. Superfícies lisas de concreto devem ser escarificadas e lixadas, de forma a se obter uma superfície íntegra e rugosa, sem rebarbas ou imperfeições superiores a 0,5 mm.

Mistura das Resinas

Inicie a mistura das resinas do produto somente após o preparo da superfície.

Faça uma pré-mistura separada dos componentes 1 e 2. Em seguida, despeje todo o conteúdo do componente 2 (endurecedor) ao recipiente do componente 1, e inicie a mistura do produto com o uso de agitador mecânico de baixa rotação por no mínimo 3 minutos, até se obter um material homogêneo e sem grumos. Aplique em seguida.

Aplicação – Sistema moldado in loco Viapol Carbon CFW300

Imprimação: A superfície deverá receber uma imprimação com o **Viapol Carbon Primer** para tampar a porosidade do concreto, promover uma aderência adequada no substrato e prepará-lo para receber as próximas etapas.

Estucamento: A superfície deverá receber um estucamento com o **Viapol Carbon Stuc**, apenas se existirem buracos ou falhas de concretagem que necessitem de preenchimento mais profundo.

Aplicação da Fibra: Primeiramente, com auxílio de desempenadeira ou rolo, aplique uma camada de aproximadamente 0,30 a 0,40 kg/m² de **Viapol Carbon Saturante**, e prossiga imediatamente com a colagem da fibra sobre o material ainda em estado plástico. A fibra deverá ser pressionada firmemente ao substrato por meio de rolo com ranhuras metálicas apropriado. Após aproximadamente 40 minutos, aplique uma nova camada de **Viapol Carbon Saturante**, de mesmo consumo que a anterior.



Recuperação • Reforço
Estrutural

Aplicação – Sistema laminado: Viapol® Carbon Plate 50/12 e 50/14

Limpeza: Estenda a lâmina de Viapol Carbon Plate 50/12 ou 50/14 sobre a bancada de trabalho e efetuar a limpeza com álcool.

Imprimação: A superfície de concreto deverá receber uma imprimação com o Viapol Carbon Primer com a finalidade de tampar a porosidade do concreto, promover uma aderência adequada no substrato e prepará-lo para receber as próximas etapas. Eventualmente, esta aplicação pode ser dispensada para concretos com alta compacidade.

Aplicação da Fibra: Primeiramente, com auxílio de uma espátula, aplique uma camada de aproximadamente 2 mm (0,5 kg/m) de Viapol Carbon Adesivo sobre o Viapol Carbon Plate 50/12 ou 50/14. Ainda durante o tempo em aberto da resina (cerca de 30 minutos a 25 °C), comprima a lâmina Viapol Carbon Plate 50/12 ou 50/14 sobre o concreto, e com o uso de um rolo de borracha, pressione fortemente contra o substrato a reforçar. Remova o excesso de resina expulsa pelas laterais da lâmina antes do endurecimento da resina.

Verificação: Verifique o serviço realizado com pancadas suaves, usando instrumento metálico. Recomenda-se efetuar testes de aderência, que devem ser superiores a 1,5 MPa.

Recomendações

Limpe as ferramentas que tiveram contato com o produto composto de solventes, tais como: toluol, aguarrás, etc. Depois de homogeneizadas, as resinas devem ser utilizadas no prazo máximo de 40 minutos.

Segurança

Utilize EPI's adequados: luvas e botas impermeáveis, óculos de segurança química. Evite contato com a pele e olhos. O contato prolongado com a pele pode causar dermatites.

Não beba, coma ou fume durante o manuseio. É importante lavar as mãos antes de uma pausa ou depois do trabalho.

No caso de contato do produto com a pele, limpe com água e sabão neutro ou pasta de limpeza. Este produto é não inflamável e não explosivo. Este produto não é considerado tóxico, mas é impróprio para o consumo humano e nunca deve ser ingerido. Para mais detalhes, consulte a ficha de segurança do produto.

6. Embalagens

Viapol Carbon Primer : kits de 5 kg;

- Viapol Carbon Saturante: kits de 15 kg;
- Viapol Carbon Stuc: kits de 4 kg ;
- Viapol Carbon Adesivo: Kits de 15 Kg;
- Viapol Carbon Fiber CFW300: Rolos com 50 m²;
- Viapol Carbon Plate: Rolos com 100 m.

7. Estocagem

As resinas possuem validade de 12 meses e as fibras, 10 anos, desde que armazenadas em locais adequados.

8. Consumo

Os consumos aproximados são:

Viapol® Carbon Primer: 100 a 250 g/m².

Viapol® Carbon Saturante: 0,6 a 0,8 kg/m² (considerando as duas aplicações).

Viapol® Carbon Stuc: de acordo com as características do substrato; estimado em 0,4 kg/ m².

Viapol® Carbon Adesivo: 0,3 Kg/m.

9. Nota

www.viapol.com.br

Pág. 4



Recuperação • Reforço
Estrutural

As informações contidas nesta ficha baseiam-se em nosso conhecimento para a sua ajuda e orientação. Salientamos que o desempenho dos nossos produtos depende das condições de preparo de superfície, aplicação e estocagem, que não estão sob nossos cuidados. O rendimento prático depende da técnica de aplicação, das condições do equipamento e da superfície a ser revestida. Não assumimos assim, qualquer responsabilidade relativa ao rendimento e ao desempenho de qualquer natureza em decorrência do uso indevido do produto.

Para obter mais informações, consulte nosso Departamento Técnico (sac@viapol.com.br).

*A Viapol reserva-se o direito de mudar as especificações ou informações contidas neste folheto sem prévio aviso.
Rev.04-06/212011*

www.viapol.com.br

Pág. 5

ANEXO III – FICHAS TÉCNICAS MC-BAUCHEMIE



MC-DUR CF-Sheets

Manta de fibra de carbono para reforço estrutural

Propriedades

- Manta de fibra de carbono unidirecional
- Elevada resistência à tração, pequena seção transversal e baixa espessura.
- Fácil aplicação, baixo peso próprio e altamente eficiente.
- Utilização otimizada das propriedades mecânicas
- Fornecida em rolos de 100 metros lineares

Áreas de aplicação

- Reforço de alta resistência à tração para reforço de componentes estruturais em concreto armado e alvenaria
- Restringe a abertura de fissuras
- Confinamento de pilares e vigas

Aplicação

Inspeção Preliminar

Antes da aplicação, a estrutura a ser reforçada deve ser analisada e verificadas as deformações e a capacidade de suporte de acordo com as recomendações publicadas pelas normas técnicas nacionais vigentes.

Análise Estrutural

A análise do reforço da estrutura é realizada de acordo com recomendações gerais das normas ACI 440 – 2R ou Boletim 14 da fib.

Desempenho

A aplicação e monitoração são realizadas de acordo com as recomendações gerais das normas utilizadas. A aplicação somente deve ser realizada por equipe qualificada.

Preparação do Substrato

A superfície deve estar seca, limpa e livre de quaisquer partículas soltas, como poeira, óleos, nata de cimento e outros agentes contaminantes. A umidade superficial deve ser menor que < 6%. A resistência ao arranque do substrato deve ser maior do que 1,5 MPa.

Todos os substratos devem ser preparados preferencialmente através de métodos que não utilizem água. Recomenda-se o lixamento mecânico com discos de vídeo ou apicoamento com pistola de agulhas.

Antes da aplicação do MC-DUR CF-Sheets, as irregularidades no concreto devem ser verificadas. A argamassa MC-DUR 1000 P09 pode ser usada para nivelamento (rugosidades < 1,0 cm).

Se a manta de fibra de carbono for aplicada sobre os cantos de pilares ou vigas, deve-se prever o arredondamento destes. O raio mínimo é de 2,5 cm.

Aplicação

O adesivo epóxi MC-DUR 1209 TX é tixotrópico, e deve ser aplicado no substrato usando uma desempenadeira metálica, com espessura de pelo menos 0,5 mm. A manta de fibra de carbono MC-DUR CF-Sheets é pressionada contra o adesivo ainda fresco usando um rolo apropriado com discos metálicos e, em seguida, a manta é impregnada com a resina de laminação MC-DUR 1209 aplicada com rolo de pêlo curto, ou outra camada de MC-DUR 1209 TX aplicada com espátula.

Deve-se tomar cuidado durante a aplicação, para que a manta de fibra de carbono seja completamente saturada com a resina. Se forem aplicadas várias camadas, as camadas subseqüentes devem ser pressionadas e depois impregnadas novamente com MC-DUR 1209. Se for usada em superfícies expostas à intempérie, a manta de fibra de carbono deve ser protegida contra a incidência de sol pela aplicação de um sistema de proteção superficial.

Informações Gerais

Altas temperaturas encurtam o "pot life" e os intervalos de aplicação enquanto que baixas temperaturas aumentam. Como regra, 10°C a menos na temperatura ambiente duplica o "pot life"; 10°C a mais reduz pela metade.

Segurança

Em todo trabalho com resinas deve ser usada uma roupa protetora apropriada (óculos de segurança, luvas, etc.). O endurecedor não misturado é altamente alcalino e irritante à pele, portanto deve-se evitar o contato, especialmente com as membranas mucosas. Se a resina entrar nos olhos, remova-a imediatamente com um colírio e procure um médico.

Limpeza

Na conclusão dos trabalhos ou em qualquer intervalo longo, todos os equipamentos e ferramentas devem ser limpos com MC-Reinigungsmittel U.

1



Os dados técnicos relatados referem-se à fibra de carbono não pré-impregnada.

Característica	Unidade	Valores 300/300; 300/600
Peso próprio	g/m ²	300
Seção transversal da fibra	mm ² /m	≥ 172
Resistência à tração	MPa	≥ 3.860
Módulo de elasticidade	MPa	≥ 242.000
Alongamento na ruptura	%	≥ 1,50
Largura	mm	300; 600
Comprimento do rolo	m	Padrão 100 metros ou sob encomenda

Características – MC-DUR CF-Sheets

Tipo de produto	Fibras de carbono unidirecionais
Estado	sólido
Cor	preto
Armazenagem	Armazenar em local seco, coberto e arejado. Durabilidade ilimitada
Embalagem	Rolos de 100 metros; Larguras e comprimentos especiais são disponíveis sob encomenda.
Descarte	Para a preservação do meio ambiente, favor esvaziar completamente as embalagens.

Nota: As informações contidas nesta ficha técnica estão baseadas em nossa experiência e no melhor do nosso conhecimento, porém devem ser ajustada a cada projeto, aplicação e principalmente às condições locais. Nossos dados se referem a práticas aceitas na engenharia que devem ser considerados durante a aplicação. Não nos responsabilizamos por aplicações erradas. Recomendações verbais diferentes das contidas aqui, não são válidas sem a confirmação por escrito da MC-Bauchemie.

Edição 06/2009. Esta ficha técnica substitui a anterior. Caso seja necessária atualização, uma nova edição pode ser impressa em substituição a esta.



MC-DUR CFK-Lamellen

Surface-bonded carbon-fibre strips for structural reinforcement

Product Properties

- MC-DUR CFK-Lamellen based on an epoxy resin matrix, reinforced with unidirectional carbon fibres
- High tensile strength at small cross-section and low structural height
- Easy application, low weight, high efficiency
- Ready-to-use supply due to protective foil on the adhesive surfaces
- No additional cleaning effort
- Optimised utilisation of mechanical properties due to alternative types/qualities

Areas of Application

- Subsequent reinforcement of structural components made of reinforced concrete, pre-stressed concrete, masonry and wood
- Increase and reconstruction of load-bearing capacity and/or serviceability
- Reduction of structural deformation and subsequent restriction of crack widths
- Interior and exterior areas of new and old structures

Application

Preliminary inspection

Prior to application the actual state of the structure to be reinforced must be determined and the application requirements for the process must be verified according to the general building approval issued by the German Building Institute (DIBt) in Berlin.

Structural analysis

The structural analysis is carried out in accordance with the general building approval issued by the DIBt Berlin or an approved structural verification by an authorised institute.

Performance of work

Application and monitoring is carried out according to the general building approval by the DIBt Berlin. Application must only be carried out by qualified staff with an additional certificate for application of MC-DUR CFK-Lamellen issued by MC.

Substrate preparation

All substrates to be reinforced must be prepared by suitable manner, e.g. granulate blasting. The surface must be sound, dry (residual moisture $\leq 6\%$) and free from any dust and grease. Depending on the existing surface roughness the surface might have to be levelled with MC-DUR 1000 Parat 09.

Application

The MC-DUR CFK-Lamellen must not be bent at right angles or subjected to sharp lateral pressures. The strips can be cut to size on site. The MC-DUR CFK-Lamellen are pre-roughened and protected with a removable foil which is removed immediately before application of the adhesive. Additional cleaning is only required in case of subsequent staining.

The adhesive is mixed according to the manufacturer's advice and applied according to the general building approval. The MC-DUR CFK-Lamellen do not require any support whilst hardening.

If used on surfaces exposed to weathering the MC-DUR CFK-Lamellen must be protected against direct sun by application of a surface protection system.

If used on surfaces exposed to mechanical impact the strips must be protected respectively.

Quality assurance

Production of the MC-DUR CFK-Lamellen is subject to an in-house production control and an external surveillance. Application is monitored according to the general building approval.




Technical Data for MC-DUR CFK-Lamellen

Characteristic	Unit	160/2400	160/2800	200/300
		Value	Value	Value
Tensile strength	MPa	≥ 2,475	≥ 2,950	≥ 2,950
E-Modulus "characteristic"	GPa	≥ 160	≥ 167	≥ 200
E-Modulus "average"	GPa	≥ 170	≥ 175	≥ 220
Elongation at break	%	≥ 1.38	≥ 1.67	≥ 1.30
Fibre content	vol.-%	≥ 68	≥ 68	≥ 68
Standard profiles (width/thickness)*	mm/mm	50/1.2	50/1.2	50/1.4
		80/1.2	80/1.2	80/1.2
		100/1.2	100/1.4	100/1.4
			120/1.4	
Density	kg/dm ³	1.60	1.60	1.60
Length of roll	m	on request	on request	on request
Minimum flexural roll diameter	m	0.90	0.90	0.90

* special profiles and lengths available on request

Product Characteristics for MC-DUR CFK-Lamellen

Matrix	epoxy resin		
Colour	black		
Durability	unlimited, provided proper storage		
Strip preparation	none, protective tape to be removed		
UV protection	MC surface protection systems		
System products	MC-DUR 1280	- duromer adhesive	
	MC-DUR 1009 HB	- bond coat for levelling mortar	
	MC-DUR 1000 Parat 09	- levelling mortar	
	Colusal VL	- corrosion protection primer	
General approval by building authorities (DIBt, Berlin)	Z-36.12-77		
Comments	MC-DUR CFK-Lamellen are equipped with protective tape on both sides		

Note: The information on this data sheet is based on our experiences and correct to the best of our knowledge. It is, however, not binding. It has to be adjusted to the individual structure, application purpose and especially to local conditions. Our data refers to the accepted engineering rules, which have to be observed during application. This provided we are liable for the correctness of this data within the scope of our terms and conditions of sale-delivery-and-service. Recommendations of our employees which differ from the data contained in our information sheets are only binding if given in written form. The accepted engineering rules must be observed at all times.

Edition 07/10. Some technical changes have been made to this print medium. Older editions are invalid and may not be used anymore. If a technically revised new edition is issued, this edition becomes invalid.

②

MC-Bauchemie • Am Kruppwald 1-8 • 46238 Bottrop • Tel. +49 (0) 20 41-101 10 • Fax: +49 (0) 20 41-101 188
info@mc-bauchemie.de • www.mc-bauchemie.de

ANEXO IV – FICHAS TÉCNICAS SIKKA

Product Data Sheet
Edition 13/6/2006
Identification no:
02 04 01 02 001 0 000XXX
SikaWrap®-530 C (VP)

SikaWrap®-530 C (VP)

Woven Carbon Fiber Fabric for Structural Strengthening

Construction

Product Description

SikaWrap®-530 C (VP) is a unidirectional woven carbon fabric for the wet application process.



Uses

Strengthening of reinforced concrete structures, brickwork and timber to increase flexural and shear load capacity. Reasons:

- Prevention of defects caused by seismic action
- Blast mitigation (accidents or terrorism)
- Improved seismic performance of masonry walls
- Substitute missing rebars
- Strength and ductility of columns
- Increasing loading capacity of structural elements
- Change of building utilisation
- Structural design construction defects
- Improved serviceability
- Structural upgrading to comply with current standards

Characteristics / Advantages

- Manufactured with weft fibers to keep the fabric stable (heat-set process)
- Multifunctional use for every kind of strengthening requirement
- Flexibility of surface geometry (Beams, columns, chimneys, piles, walls, silos)
- Low density for minimal additional weight
- Economical compared to traditional techniques

Product Data

Form

Fiber Type

Mid strength carbon fibers.

Fabric Construction

Fiber orientation: 0° (unidirectional).

Warp: black carbon fibers (99% of total areal weight).

Weft: white thermoplastic heat-set fibers (1% of total areal weight).

Packaging

	Fabric length / roll	Fabric width
1 roll in cardboard box	≥ 50 m	300 mm



Storage	
Storage Conditions / Shelf Life	24 months from date of production if stored properly in undamaged original sealed packaging in dry conditions at temperatures between +5°C and +35°C. Protect from direct sunlight.
Technical Data	
Areal Weight	530 g/m ² ± 20 g/m ²
Fabric Design Thickness	0.293 mm (based on fiber content).
Fiber Density	1.8 g/cm ³
Mechanical / Physical Properties	
Dry Fiber Properties	<p>Tensile strength: 3'800 N/mm² (nominal).</p> <p>Tensile E-modulus: 231'000 N/mm²</p> <p>Elongation at break: 1.64% (nominal).</p>
Laminate Properties	<p>Laminate thickness: 1.0 mm per layer (impregnated with Sikadur®-300).</p> <p>Ultimate load: 700 kN/m width per layer (at typical laminate thickness of 1.0 mm).</p> <p>Tensile E-modulus: 63.0 kN/mm² (based on typical laminate thickness of 1.0 mm).</p> <p>Note: The above values are typical and indicative only. The achievable laminate properties obtained from tensile test are dependant on the impregnating/laminating resin used and the type of tensile testing procedure. Apply material reduction factors according to the relevant design standard.</p>
Design	<p>Design strain: This value is dependent on the type of loading and must be adapted according to therelevant design standards.</p>
System Information	
System Structure	<p>The system configuration as described must be fully complied with and may not be changed.</p> <p>Concrete primer - Sikadur®-330 / Sikadur®-300. Impregnating / laminating resin - Sikadur®-300. Structural strengthening fabric - SikaWrap®-530 C (VP). For detailed resin properties, fabric application details and general information, refer to Sikadur®-300 Product Data Sheet.</p>
Application Details	
Consumption	<p>Primer on prepared substrate (depending on the roughness):</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Smooth surface: approximately 0.5 kg/m² (Sikadur®-300 or Sikadur®-330). ■ Rough surface: ~ 0.5 - 1.0 kg/m² (Sikadur®-330 or Sikadur®-300 mixed with maximum 5% thixotropic agent Sikadur®-513). <p>Impregnation resin for every layer (manually or with saturator):</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ ≥ 0.85 - 1 kg/m² (Sikadur®-300).
Substrate Quality	<p>Specific requirements: Minimal substrate tensile strength: 1.0 N/mm² or as specified in the strengthening design.</p>

Application Instructions

Application Method / Tools The fabric can be cut with special scissors or razor knife. Never fold the fabric! Refer to Sikadur®-300 Product Data Sheet for impregnating / laminating procedure.

Notes on Application / Limitations This product may only be used by experienced professionals.

Minimum radius required for application around corners: > 20 mm. Grinding edges or building up with Sikadur® mortars may be necessary.

In fiber direction, overlapping of the fabric must be at least 100 mm depending on SikaWrap® type or as specified in the strengthening design.

For side-by-side application, no overlapping length in the weft direction is required. Overlaps of additional layers must be distributed over the column circumference.

The strengthening application is inherently structural and great care must be taken when choosing suitably experienced contractors.

The SikaWrap®-530 C (VP) fabric is coated to ensure maximum bond and durability with the Sikadur® impregnating/laminating resins. To maintain system compatibility do not interchange system parts.

The SikaWrap®-530 C (VP) may be / must be coated with a cementitious overlay or coatings for aesthetic and / or protective purposes. Selection will be dependent on exposure requirements. For basic UV protection use Sikagard®-550 W Elastic, Sikagard® ElastoColor-675 W or Sikagard®-680 S.

Notes All technical data stated in this Product Data Sheet are based on laboratory tests. Actual measured data may vary due to circumstances beyond our control.

Local Restrictions Please note that as a result of specific local regulations the performance of this product may vary from country to country. Please consult the local Product Data Sheet for the exact description of the application fields.

Health and Safety Information For information and advice on the safe handling, storage and disposal of chemical products, users should refer to the most recent Material Safety Data Sheet containing physical, ecological, toxicological and other safety-related data.

Legal Notes

The information, and, in particular, the recommendations relating to the application and end-use of Sika products, are given in good faith based on Sika's current knowledge and experience of the products when properly stored, handled and applied under normal conditions in accordance with Sika's recommendations. In practice, the differences in materials, substrates and actual site conditions are such that no warranty in respect of merchantability or of fitness for a particular purpose, nor any liability arising out of any legal relationship whatsoever, can be inferred either from this information, or from any written recommendations, or from any other advice offered. The user of the product must test the product's suitability for the intended application and purpose. Sika reserves the right to change the properties of its products. The proprietary rights of third parties must be observed. All orders are accepted subject to our current terms of sale and delivery. Users should always refer to the most recent issue of the local Product Data Sheet for the product concerned, copies of which will be supplied on request



Sika Gulf B. S.C (c)
 Bldg. 925, Road 115, Sitra Area 601
 P.O. Box 15776
 Adliya, Kingdom of Bahrain
 TEL: +973 17738 188
 Fax: +973 17732 476
 E-mail: sika.gulf@bh.sika.com
 Web: http://www.sika.com/bh



Ficha de Produto
Edição 03/07/2013
Identificação no:
02 04 01 01 001
Sika® CarboDur® S

Sika® CarboDur® S

Lâminas de fibra de carbono para reforço estrutural

<p>Descrição do Sistema</p>	<p>Sika® CarboDur® Plates são lâminas pultrudadas de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) para reforço de estruturas de concreto, madeira, alvenaria, aço e estruturas de polímeros reforçados com fibras.</p> <p>Sika® CarboDur® Plates é aderida à estrutura como reforço por colagem externa utilizando-se adesivo epóxi Sikadur®-30 (para a aplicação do produto em temperaturas normais) ou Sikadur®-30 LP (para a aplicação do produto em temperaturas altas).</p> <p>Sika CarboDur® Plates é aderida à estrutura em sulcos de reforço embutidas próximas à superfície (sistema NSM) utilizando-se adesivo epóxi tipo Sikadur®-30 ou Sikadur®-330 se a aplicação do produto for realizada a uma temperatura normal. Se a temperatura de aplicação do produto é alta utiliza-se o adesivo epóxi Sikadur®-30 LP. O adesivo epóxi Sikadur®-300 pode ser utilizado porém somente em aplicações horizontais; adicionalmente, os adesivos Sikadur®-33, Sika® AnchorFix®-3+ e Sikadur® AnchorFix®-4, fornecidos em cartuchos, podem ser usados.</p> <p>Para maiores detalhes sobre as características dos adesivos consulte a respectiva ficha técnica do produto.</p>
<p>Usos</p>	<p>Os sistemas Sika® CarboDur® são usados para melhorar, incrementar ou reparar o desempenho e resistência das estruturas:</p> <p><i>Incremento da capacidade de carga:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Aumento da capacidade de lajes de piso e vigas ■ Aumento da capacidade de pontes para alteração do "Trem Tipo" ■ Instalação de equipamentos pesados ■ Estabilização de estruturas para vibração ■ Alteração do uso do edifício <p><i>Danos em Elementos Estruturais devido a:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Deterioração dos materiais de construção originais ■ Corrosão das armaduras ■ Acidentes (Impacto de veículos, fogo, terremotos) <p><i>Melhoria das Condições de Serviço e durabilidade:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Redução das deformações e das aberturas de fissuras ■ Alívio de cargas na armadura ■ Redução da fadiga <p><i>Mudanças no Sistema Estrutural:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Remoção de paredes e/ou colunas ■ Remoção de pisos e seções de muros para criar acessos. <p><i>Resistência a possíveis eventos:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Aumento da resistência da estrutura aos terremotos, explosões, etc. <p><i>Defeitos de Projeto ou Executivos:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Armadura insuficiente / inadequada ■ Seções insuficientes / inadequadas



Características / Vantagens

- Não corrosivo
- Altas resistências mecânicas
- Excelente durabilidade e resistência à fadiga.
- Sem limite de comprimento, não requer juntas
- Baixa espessura do sistema, simples execução de cruzamentos de lâminas
- Fácil de transportar (rolos)
- Baixo peso, muito fácil de instalar, especialmente sobre-cabeça
- Requer mínimo preparo das lâminas e aplicável em mais de uma camada
- Extremidades sem fibras expostas devido ao processo de pultrusão
- Aprovações e certificações em diversos países no mundo

Testes**Aprovações / Normas**

França: CSTB – Avis Technique 3/10-669, SIKA CARBODUR SIKA WRAP

Noruega: NBI Teknisk Godkjenning, NBI Technical Approval, No. 2178, 2001, (Norwegian).

Slovaquia: TSUS, Building Testing and research institutes, Technical approval NoTO – 09/0080, 2009: Systém dodatočného zosilňovania železobetonových a drevených konštrukcií Sika CarboDur® (Slovak).

Polónia: Technical Approval ITB AT - AT-15-5604/2011: Zestaw wyrobów Sika CarboDur do wzmacniania i napraw konstrukcji betonowych (Polish)

Polónia: Technical Approval IBDiM Nr AT/2008-03-0336/1 „Płaskowniki, pręty, kształtki i maty kompozytowe do wzmacniania betonu o nazwie handlowej: Zestaw materiałów Sika CarboDur® do wzmacniania konstrukcji obiektów mostowych (Polish)

Fib, Technical Report, bulletin 14: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures, July 2001 (International).

EUA: ACI 440.2R-08, Guide for the Design and construction of Externally Bonded FRP Systems for strengthening concrete structures, Julio 2008, (USA).

Reino Unido: Concrete Society Technical Report No. 55, Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite material, 2012 (UK).

Suíça: SIA 166:2004 Klebebewehrungen .

Itália: CNR-DT 200/2004 – Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures.

Dados do Produto**Forma****Aparência / Cores**

Matriz epóxi reforçada com fibras de carbono, cor preta.

Embalagem

Rolos de 100m ou 250 m ou conforme comprimento total encomendado.

Tipos

(*) Modelos disponíveis na linha de produtos da Sika Brasil. Demais modelos disponíveis somente sob consulta. Consulte o Departamento Técnico da Sika Brasil.

Tipo	Largura	Espessura	Seção
Sika CarboDur® S1.030	10 mm	3.0 mm	30 mm ²
Sika® CarboDur® S1.525	15 mm	2.5 mm	37,5 mm ²
Sika® CarboDur® S2.025	20 mm	2.5 mm	50 mm ²
Sika® CarboDur® S212	20 mm	2.5 mm	24 mm ²
Sika® CarboDur® S214 ^(*)	20 mm	1,4 mm	28 mm ²
Sika® CarboDur® S512 ^(*)	50 mm	1,2 mm	60 mm ²
Sika® CarboDur® S514 ^(*)	50 mm	1,4 mm	70 mm ²



Sika® CarboDur® S612	60 mm	1,2 mm	72 mm ²
Sika® CarboDur® S613	60 mm	1,3 mm	78 mm ²
Sika® CarboDur® S614	60 mm	1,4 mm	84 mm ²
Sika® CarboDur® S626	60 mm	2,6 mm	156 mm ²
Sika® CarboDur® S812	80 mm	1,2 mm	96 mm ²
Sika® CarboDur® S814 ⁽¹⁾	80 mm	1,4 mm	112 mm ²
Sika® CarboDur® S912	90 mm	1,2 mm	108 mm ²
Sika® CarboDur® S914	90 mm	1,4 mm	126 mm ²
Sika® CarboDur® S1012	100 mm	1,2 mm	120 mm ²
Sika® CarboDur® S1014 ⁽¹⁾	100 mm	1,4 mm	140 mm ²
Sika® CarboDur® S1212	120 mm	1,2 mm	144 mm ²
Sika® CarboDur® S1214	120 mm	1,4 mm	168 mm ²
Sika® CarboDur® S1512	150 mm	1,2 mm	180 mm ²

Armazenagem

Condições de Armazenagem / Validade	Validade ilimitada. O produto não expira desde que armazenado em local seco, protegido da luz direta do sol e com temperaturas máximo de 50°C.
	Transporte: Deve ser transportado na embalagem original, caso contrário, deve ser adequadamente protegido contra danos mecânicos.

Dados Técnicos

Densidade	1,60 g/cm ³
Temperatura de Transição Vítre	> 100°C (conforme EN 61008)
Teor de fibras (volume)	> 68%

Propriedades Físicas / Mecânicas

Módulo de Elasticidade	Valores referente ao sentido longitudinal das fibras	(conforme EN 2561)
	Valor médio	165.000 N/mm ²
	Valor mínimo	> 160.000 N/mm ²
	5% da tensão de ruptura	162.000 N/mm ²
	95% da tensão de ruptura	180.000 N/mm ²
Resistência a tração	Valores referente ao sentido longitudinal das fibras	(conforme EN 2561)
	Valor médio	3.100 N/mm ²
	Valor mínimo	> 2.800 N/mm ²
	5% da tensão de ruptura	3.000 N/mm ²
	95% da tensão de ruptura	3.600 N/mm ²
Deformação na ruptura	Valores referente ao sentido longitudinal das fibras	(conforme EN 2561)
	Valor mínimo	> 1,70%



Informações do Sistema

Estrutura do Sistema A estrutura do sistema e sua configuração devem ser atendidas integralmente como descrito, não podendo ser alteradas.

Resina adesiva: Sikadur[®]-30 ou Sikadur[®]-30 LP

Lâminas de fibra de carbono para reforço estrutural: CarboDur S

Para informações detalhadas sobre Sikadur[®]-30 e Sikadur[®]-30 LP, juntamente com os detalhes de aplicação, consulte a ficha técnica do Sikadur[®]-30 ou Sikadur[®]-30 LP e o "Método de Aplicação Sika CarboDur[®] em Reforços Aderidos Externamente" Ref: 850 41 05 ou o "Método de Aplicação Sika CarboDur[®] em Reforços Embutidos (NSM - Near Surface Mounted Reinforcement)" Ref: 850 41 07.

Detalhes de Aplicação

Consumo

Largura da Lâmina CarboDur [®]	Consumo de Sikadur [®] -30 ^(*)
50 mm	~ 0,16 kg/m
60 mm	~ 0,20 kg/m
80 mm	~ 0,25 kg/m
90 mm	~ 0,30 kg/m
100 mm	~ 0,35 kg/m
120 mm	~ 0,40 kg/m
150 mm	~ 0,50 kg/m

(*) Nota: Consumo teórico aproximado para espessura média de 2mm de adesivo podendo variar de acordo com as condições do substrato. Não consideradas perdas devido à aplicação ou irregularidades do substrato.

Qualidade do Substrato

Lâminas Sika CarboDur[®] aderidas externamente à superfície do concreto:

A resistência de aderência ideal para o substrato preparado é de 2,0 N/mm², sendo admitido valor mínimo de 1,5 N/mm².

A resistência de aderência do substrato após o preparo da superfície deve sempre ser verificada.

Caso não seja possível alcançar estes valores, existem soluções alternativas:

- Lâminas Sika CarboDur[®] aplicadas como reforço embutido em sulcos abertos próximos à superfície (sistema NSM).
- Tecido SikaWrap[®]: Consulte a ficha do produto para os tecidos SikaWrap[®].

O concreto deve ter no mínimo 28 dias (dependendo da resistência do concreto e condições de cura no local).

Lâminas Sika CarboDur[®] aderidas externamente aos outros substratos:

Para detalhes de aplicação do CarboDur[®] a todos os outros substratos (pedra, aço, madeira, fibra de polímero, etc.) consulte o "Método de Aplicação Sika CarboDur[®] em Reforços Aderidos Externamente" Ref: 850 41 05

Lâminas Sika CarboDur[®] embutidas em sulcos na superfície (sistema NSM):

Para detalhes de aplicação consulte o "Método de Aplicação Sika CarboDur[®] em Reforços Embutidos" Ref: 850 41 07



Preparo do Substrato	<p>O concreto deve ser preparado e limpo até que se obtenha superfície livre de nata e contaminantes e textura rugosa com porosidade aberta.</p> <p><u>Para aplicação aderida externamente:</u></p> <p>Consulte o "Método de Aplicação Sika CarboDur® em Reforços Aderidos Externamente" Ref: 850 41 05</p> <p><u>Para aplicação em sulcos próximos à superfície:</u></p> <p>Consulte o "Método de Aplicação Sika CarboDur® em Reforços Embutidos" Ref: 850 41 07</p>
-----------------------------	---

Condições de Aplicação / Limitações

Condições de aplicação/ limitações	<p><u>Para aplicação aderida externamente:</u></p> <p>Consulte a ficha técnica de produto dos adesivos epóxi da Sika®:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sikadur®-30 - Sikadur®-30 LP <p><u>Para aplicação em sulcos próximos à superfície:</u></p> <p>Consulte a ficha técnica de produto dos adesivos epóxi da Sika®:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sikadur®-30 - Sikadur®-30 LP - Sikadur®-330 - Sikadur®-300 - Sikadur®-33 - Sikadur® Anchorfix®-4
---	--

Instruções de Aplicação

Métodos de aplicação / ferramentas	<p><u>Para aplicação aderida externamente:</u></p> <p>Consulte a ficha técnica dos produtos adesivos epóxi da Sika® :</p> <ul style="list-style-type: none"> -Sikadur®-30 -Sikadur®-30 LP <p>Por favor, consulte o "Method de Aplicação Sika CarboDur® em Reforços Aderidos Externamente" Ref: 850 41 05</p> <p><u>Para aplicação embutido em sulcos próximos à superfície:</u></p> <p>Por favor consulte a respectiva ficha do produto</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sikadur®-30 - Sikadur®-30 LP - Sikadur®-330 - Sikadur®-300 - Sikadur®-33 - Sika® AnchorFix®-4 <p>Para detalhes de aplicação consulte o "Método de Aplicação Sika CarboDur® em Reforços Embutidos" Ref: 850 41 07</p>
---	---



Construção

Notas sobre a Aplicação / Limitações	<p>O projeto de reforço deve ser elaborado por profissional experiente e qualificado para dimensionamento com fibras de carbono.</p> <p>Este produto se destina a uso estrutural e sua aplicação deve ser conduzida com grande cuidado por profissionais experientes e qualificados.</p> <p>O sistema de reforço Sika® CarboDur® com as laminas Sika® CarboDur® devem ser protegidas da exposição direta à luz do sol, umidade e/ou água. Por favor, consulte o Método de Aplicação e a ficha técnica do produto para a selecionar adequadamente os materiais de revestimento quando o sistema este exposto ou parcialmente exposto.</p> <p>Máxima temperatura de serviço permitida: aprox. +50°C. Nota: quando se utiliza o Sika® CarboHeater em conjunto com Sikadur®-30 LP esta temperatura pode ser elevada para no máx. +80°C (consulte a ficha técnica do produto Sika® CarboHeater).</p> <p>Por favor, consulte o respectivo Método de Aplicação para conhecer as limitações e diretrizes.</p> <p>- "Método de Aplicação Sika CarboDur® em Reforços Aderidos Externamente" - "Método de Aplicação Sika CarboDur® em Reforços Embutidos"</p> <p>Nota: Para maiores detalhes acerca das informações acima, consulte o Departamento Técnico da Sika.</p>
Proteção ao Fogo	<p>Se necessário, as lâminas Sika® CarboDur® podem receber revestimento específico para proteção contra fogo.</p>
Base dos Valores	<p>Todos os dados técnicos aqui contidos são baseados em testes de laboratórios. Medidas de valores em condições reais podem variar devido a condições fora de nosso controle.</p>
Informações de Segurança e Ecologia	<p>Para maiores informações sobre manuseio, estocagem e disposição dos resíduos consulte a versão mais recente de nossa Ficha de Segurança do Material que contém os dados disponíveis, das propriedades físicas, de ecologia, de toxicidade, e outros dados de segurança pertinentes.</p>
Nota Legal	<p>As informações e em particular as recomendações relacionadas com a aplicação e utilização final dos produtos Sika, são fornecidas de boa fé e baseadas no conhecimento e experiência dos produtos sempre que devidamente armazenados, manuseados e aplicados em condições normais. Na prática, as diferenças no estado do material, das superfícies, e das condições de aplicação no campo, são de tal forma imprevisíveis que nenhuma garantia a respeito da comercialização ou aptidão para um determinado fim em particular, nem qualquer responsabilidade decorrente de qualquer relacionamento legal, poderão ser inferidas desta informação, ou de quaisquer recomendações por escrito, ou de qualquer outra recomendação dada. Os direitos de propriedade de terceiros deverão ser observados. Todas as encomendas aceitas estão sujeitas às nossas condições de venda e de entrega vigentes. Os usuários deverão sempre consultar as versões mais recentes das fichas técnicas dos respectivos produtos, que serão entregues sempre que solicitadas.</p>



GBC BRASIL

Sika Brasil
 Av Dr Alberto Jackson Byington, 1525
 Vila Menck – Osasco – SP
 CEP: 06276-000
 Brasil

Tel. +55 11 3687 4800
 Fax +55 11 3601 0288
 e-mail : consumidor.atendimento@br.sika.com
www.sika.com.br

Sika® CarboDur® S
 6/6

Ficha de Produto
Edição 04/12/0213
Identificação no:
02 04 01 02 001 0 000011
SikaWrap®-300 C

SikaWrap®-300 C

Tecido de fibra de carbono unidirecional para reforço estrutural

Descrição do Produto

SikaWrap®-300 C é um tecido de fibra de carbono, unidirecional, para reforço estrutural, projetado para aplicações por processo úmido ou seco.



Usos

Reforço de estruturas de concreto armado, alvenaria e madeira em caso de sobrecargas devido a esforço de flexão ou cisalhamento devido a:

- Aumento da resistência ao sismo de paredes de alvenaria
- Complementação de seção de aço faltante
- Aumento da resistência e ductilidade das colunas
- Aumento da capacidade de carga de elementos estruturais
- Alteração na utilização da estrutura
- Correção de falhas no projeto estrutural ou erros construtivos
- Aumento da resistência a cargas sísmicas
- Aumento da vida de serviço e durabilidade da estrutura
- Adaptação a normas e requisitos de capacidade de carga de estruturas

Características / Vantagens

- Tecido multifuncional para uso em muitas aplicações de reforço estrutural
- Se adapta a diversos elementos e geometrias (vigas, colunas, chaminés, pilares, paredes, consolos, silos, etc.)
- Mínimo peso adicional por causa da baixa densidade
- Excelente relação custo - benefício em comparação com outras técnicas de reforço estrutural

Testes

Aprovações / Normas

Slovaquia: TSUS, Building Testing and research institutes, Technical Approval TO-09/0080, 2009: Systémy dodatočného zosilňovania konštrukcii Sika® CarboDure a SikaWrap® (Slovak).

Polónia: Technical Approval ITB AT-15-5604/2011: Zestaw wyrobów Sika CarboDur do wzmacniania i napraw konstrukcji betonowych (Polish)

Polónia: Technical Approval IBDiM Nr AT/2008-03-0336/1 „Płaskowniki, pręty, kształtki i maty kompozytowe do wzmacniania betonu o nazwie handlowej: Zestaw materiałów Sika CarboDure do wzmacniania konstrukcji obiektów mostowych (Polish)

EUA: ACI 440.2R-08, Guide for the Design and construction of Externally Bonded FRP Systems for strengthening concrete structures, July 2008

Reino Unido: Concrete Society Technical Report No. 55, Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite material, 2012 (UK).

Itália: CNR-DT 200/2004 - Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures.



Dados do Produto		
Forma		
Tipo de Fibra	Fibras de carbono.	
Composição do Tecido	Orientação das fibras: 0° (unidirecional). Longitudinal: fibras de carbono pretas (99% do peso total). Transversal: fibras termoplásticas brancas (1% do peso total).	
Embalagem	Rolo com 0,50m x 100m (50m ²)	
Armazenagem		
Condições de Armazenagem / Validade	24 meses, desde que adequadamente armazenado em sua embalagem original em local seco à temperatura entre +5°C e +35°C. Proteger da luz direta do sol.	
Dados Técnicos		
Gramatura	304 g/m ² ± 10 g/m ² (fibras de carbono)	
Espessura do Tecido	0,167 mm (baseado na quantidade de fibra).	
Densidade da Fibra	1,82 g/cm ³	
Propriedades Mecânicas/ Físicas		
Propriedades da Fibra Seca	Valores referente no sentido longitudinal das fibras (conforme ISO 101618)	
Resistência à Tração	Valor mínimo	4.000 N/mm ²
Módulo de Elasticidade	Valor mínimo	230.000 N/mm ²
Alongamento na Ruptura	Valor mínimo	1,7%
Propriedades do Laminado	Valores referente ao sentido longitudinal das fibras (Conforme a EN 2561*) Camada única, mínimo 27 amostras por teste.	
Espessura do laminado (nominal)		0,167 mm
Seção transversal (por 1000 mm de largura)		167 mm ²
Módulo de Elasticidade	Médio	225 kN/mm ²
	Nominal	220 kN/mm ²
Resistencia à tração	Média	3500 N/mm ²
	Nominal	3200 N/mm ²
* Amostra modificada com 50 mm		
Valores de cálculo	Os valores de projeto para cálculo devem ser definidos de acordo com as normas de projeto relevante e vigentes. Os valores indicados referem-se ao compósito formado pelo tecido SikaWrap [®] -300C impregnado com adesivo epóxi Sikadur [®] -330 ou Sikadur [®] -300.	
Resistência à tração	Média	585 kN/m
	Nominal	534 kN/m
No alongamento a 0,4%	Média	150 kN/m
	Nominal	147 kN/m
No alongamento a 0,6%	Media	225 kN/m
	Nominal	220 kN/m



Informações do Sistema

Estrutura do Sistema	A configuração do sistema descrito a seguir deve ser obedecida na íntegra e não pode ser alterada. Resinas adesivas para impregnação / imprimação e nivelamento do substrato de concreto: Sikadur [®] -330 ou Sikadur [®] -300 com areia de quartzo Sikadur [®] -512 Resina de impregnação / laminação do tecido de fibra de carbono: Sikadur [®] -330 ou Sikadur [®] -300. Tecido para reforço estrutural: SikaWrap [®] -300 C. Para obter as propriedades detalhadas da resina, detalhes de aplicação do tecido e informações gerais, consulte a ficha técnica do Sikadur [®] -330 ou Sikadur [®] -300. Consulte a ficha técnica do produto e o Método de Aplicação de Tecidos SikaWrap [®] no Sistema Seco (Ref. 850 41 02), ou no Sistema Úmido (Ref. 850 41 03 e Ref. 850 41 04) para mais informações.
-----------------------------	--

Detalhes da Aplicação

Consumo	<u>Sistema Seco com Sikadur[®]-330:</u> - Impregnação da 1ª camada incluso primer: ~ 1,0 – 1,5 kg/m ² . - Impregnação das demais camadas: ~ 0,8 kg/m ² por camada. <u>Sistema Úmido com Sikadur[®]-300:</u> - Impregnação da 1ª camada incluso primer: ~ 1,0 – 1,5 kg/m ² . - Impregnação das demais camadas: ~ 0,7 kg/m ² por camada. Consulte o Método de Aplicação de Tecidos SikaWrap [®] no Sistema Seco (Ref. 850 41 02), ou no Sistema Úmido (Ref. 850 41 03 e Ref. 850 41 04) para mais informações.
----------------	---

Qualidade do Substrato	Resistência mínima de aderência do substrato: 1,0 N/mm ou as especificadas no cálculo de reforço. Por favor, verifique o Method Statement de SikaWrap [®] para aplicação com sistema seco (Ref. 850 41 02), SikaWrap [®] para aplicação com sistema úmido (Ref. 850 41 03) ou SikaWrap [®] aplicação máquina úmida (Ref. 850 41 04).
-------------------------------	--

Preparo do Substrato	O concreto deve ser previamente limpo e preparado de forma a se obter uma superfície com porosidade aberta e livre de nata de cimento e contaminantes. Consulte a ficha técnica do produto e o Método de Aplicação de Tecidos SikaWrap [®] no Sistema Seco (Ref. 850 41 02), ou no Sistema Úmido (Ref. 850 41 03 e Ref. 850 41 04) para mais informações.
-----------------------------	---

Instruções de Aplicação

Método de Aplicação / Ferramentas	O tecido deve ser cortado com tesoura afiada. Nunca dobre o tecido! SikaWrap [®] é aplicado utilizando o sistema de aplicação seco ou úmido. Consulte a ficha técnica do produto e o Método de Aplicação de Tecidos SikaWrap [®] no Sistema Seco (Ref. 850 41 02), ou no Sistema Úmido (Ref. 850 41 03 e Ref. 850 41 04) para mais informações.
--	--

Notas sobre a Aplicação / Limitações	Este produto deve ser aplicado somente por profissionais experientes. O tecido SikaWrap [®] é feito para garantir a máxima efetividade e duração com os produtos Sikadur [®] adesivos/ primer / resinas. Para segurar a compatibilidade e bom desempenho do reforço não altere os componentes do sistema. O produto SikaWrap [®] pode ser coberto com revestimento cimentício ou outros revestimentos para fins estéticos ou de proteção. A seleção do produto depende das condições de exposição e dos requisitos do projeto. Para proteção adicional contra UV em áreas expostas, use Sikagard [®] -550 W Elastic, Sikagard [®] -670W ElastoColor ou Sikagard [®] -680 S.
---	---



Construção

	Consulte a ficha técnica do produto e o Método de Aplicação de Tecidos SikaWrap® no Sistema Seco (Ref. 850 41 02), ou no Sistema Úmido (Ref. 850 41 03 e Ref. 850 41 04) para mais informações.
Base dos Valores	Todos os dados técnicos aqui contidos são baseados em testes de laboratórios. Medidas de valores em condições reais podem variar devido a condições fora de nosso controle.
Informações de Segurança e Ecologia	Para maiores informações sobre manuseio, estocagem e disposição dos resíduos consulte a versão mais recente de nossa Ficha de Segurança do Material que contém os dados disponíveis, das propriedades físicas, de ecologia, de toxicidade, e outros dados de segurança pertinentes.
Nota Legal	As informações e em particular as recomendações relacionadas com a aplicação e utilização final dos produtos Sika, são fornecidas de boa fé e baseadas no conhecimento e experiência dos produtos sempre que devidamente armazenados, manuseados e aplicados em condições normais. Na prática, as diferenças no estado do material, das superfícies, e das condições de aplicação no campo, são de tal forma imprevisíveis que nenhuma garantia a respeito da comercialização ou aptidão para um determinado fim em particular, nem qualquer responsabilidade decorrente de qualquer relacionamento legal, poderão ser inferidas desta informação, ou de quaisquer recomendações por escrito, ou de qualquer outra recomendação dada. Os direitos de propriedade de terceiros deverão ser observados. Todas as encomendas aceitas estão sujeitas às nossas condições de venda e de entrega vigentes. Os usuários deverão sempre consultar as versões mais recentes das fichas técnicas dos respectivos produtos, que serão entregues sempre que solicitadas.



GBC BRASIL



Sika Brasil
 Av Dr Alberto Jackson Byington, 1525
 Vila Menck – Osasco – SP
 CEP: 06276-000
 Brasil

Tel. +55 11 3687 4600
 Fax +55 11 3601 0288
 e-mail : consumidor.atendimento@br.sika.com
www.sika.com.br