

isec
Engenharia

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

**Dimensionamento de Reforços em
Compósitos Reforçados com Polímeros
de Fibra, em Elementos Estruturais de
Betão Armado**

Autor

Joana Catarina Cardoso de Carvalho

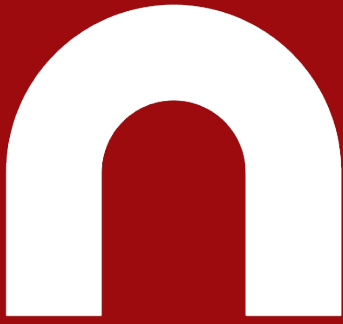
Orientador

Prof. Doutor António José Pedroso de Moura Correia

INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA

Coimbra, dezembro, 2021



isec

Engenharia

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Dimensionamento de Reforços em Compósitos Reforçados com Polímeros de Fibra, em Elementos Estruturais de Betão Armado

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil
Especialização em Construção Urbana

Autor

Joana Catarina Cardoso de Carvalho

Orientador

Prof. Doutor António José Pedroso de Moura Correia

INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA

Coimbra, dezembro, 2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, ao meu orientador Professor Doutor António Correia, pela orientação, disponibilidade, estímulo e paciência. A elaboração desta dissertação aconteceu num período muito difícil, mas a sua perseverança e dedicação foram determinantes na sua conclusão. Eternamente grata!

Agradeço também à empresa S&P, em particular à Eng.^a Joana Pereira, pelo tempo despendido, explicações, orientações e material fornecido, nomeadamente o software de dimensionamento utilizado neste trabalho.

A todo o corpo docente e não docente do ISEC com o qual me cruzei neste Mestrado, expressei o meu agradecimento pela dedicação, disponibilidade e ensinamentos.

Aos meus colegas de percurso, em especial ao João Pedro Oliveira, pelo constante incentivo, apoio e companheirismo.

Quero também expressar a minha gratidão aos meus colegas de trabalho pelo incentivo, apoio e compreensão nos períodos de ausência.

À minha família! Sem eles seria impensável a concretização deste Mestrado. O apoio incondicional do meu marido Pedro, a paciência dos meus filhos Francisco e Rodrigo relativamente à minha ausência. O apoio da minha sogra Isilda e do meu cunhado Jorge, foram essenciais e tranquilizantes.

Ao meu irmão João e cunhada Anabela, pelo interesse e incentivo.

Aos meus pais, agradeço tudo. O apoio, e esta vontade de tentar sempre mais e de achar que se pode tudo!

RESUMO

A presente dissertação tem como objetivo abordar a temática do dimensionamento de reforços de estruturas de betão com reforços de polímeros reforçados com fibras, em alternativa às técnicas tradicionais. Para tal, efetuou-se uma pesquisa sobre os compósitos reforçados com Fibras (FRP), o que são, como se compõem, quais as suas características e o que os distingue. Este trabalho aborda também o desenvolvimento das metodologias de cálculo sugeridas por vários documentos publicados.

Relativamente ao dimensionamento de reforços com compósitos reforçados com fibras de carbono (CFRP) objetivamente, utiliza-se um software de cálculo, desenvolvido pela empresa *S&P – Reinforcement*, num caso de estudo, cujo objetivo é averiguar de forma expedita qual o reforço com compósitos de CFRP necessário realizar às vigas de um determinado piso de um edifício, que hipoteticamente terá que sofrer remodelação.

Finalmente, procedem-se às principais conclusões e indicam-se algumas perspetivas de desenvolvimento e investigações futuras.

Palavras-Chave: Materiais Compósitos Reforçados com Fibras (FRP), Reforço e Reabilitação de estruturas, Técnica EBR. Técnica NSM, Laminados.

ABSTRACT

This dissertation aims to address the theme of the dimensioning of reinforcement of concrete structures with fiber reinforced polymer reinforcements, as an alternative to traditional techniques. To this end, research was carried out on fiber reinforced composites (FRP), what they are, how they are composed, what are their characteristics and what distinguishes them. This work also addresses the development of calculation methodologies suggested by several published documents.

Regarding the design methodologies of reinforcements with composites reinforced with carbon fibers (CFRP) objectively, a calculation software is used, developed by the company S&P - Reinforcement, in a case study. The objective is to expeditiously ascertain which reinforcement with composites of CFRP necessary to carry out the beams of a given floor of a building, which will hypothetically have to undergo remodeling.

Finally, conclusions are drawn out and recommendations some perspectives for future development and research.

Palavras-Chave: Fiber Reinforced Polymers (FRP), Structural strengthening and rehabilitations, EBR technique, NSM technique,

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	ENQUADRAMENTO	11
1.2	OBJETIVOS E METODOLOGIA	12
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	12
2	COMPÓSITOS DE POLÍMEROS DE FIBRA (FRP)- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	14
2.2	MATERIAIS CONSTITUINTES DOS FRP	15
2.2.1	Fibras	15
2.2.2	Matriz	17
2.2.3	Resinas.....	18
2.3	REVESTIMENTOS DE PROTEÇÃO	19
2.4	PROPRIEDADES FÍSICAS DOS FRP	21
2.4.1	21
2.4.1	Densidade.....	21
2.4.2	Coeficiente de Expansão Térmica.....	21
2.4.3	Efeito das Altas Temperaturas.....	22
2.5	PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS FRP.....	23
2.5.1	Comportamento à Tração.....	23
2.5.2	Comportamento à Compressão.....	23
2.6	COMPORTEAMENTO A LONGO PRAZO DOS FRP	24
2.6.1	Durabilidade	24
2.6.2	História de Carga	25
2.6.3	Comportamento ao Fogo	26
2.7	COMPÓSITOS DE POLÍMEROS DE FIBRAS DE CARBONO (CFRP).....	27
2.7.1	Tipos de Compósitos de CFRP.....	28
2.7.2	Laminados.....	30
2.7.3	Mantas.....	36
3	DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS CFRP	43
3.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	43
3.2	PROTECÇÃO E REPARAÇÃO DE ESTRUTURAS E BETÃO- NORMA EN 1504.....	44
3.3	REGULAMENTAÇÃO E NORMAS.....	47
3.4	COMPORTEAMENTO DE VIGAS REFORÇADAS À FLEXÃO	50
3.4.1	Estado Inicial.....	51
3.4.2	Modos de Ruína.....	53
3.4.3	Interface betão-compósito.....	56
3.4.4	Modelos de comportamento.....	58
3.5	VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA.....	63
3.5.1	Estado Limite de Serviço (ELS)	64
3.5.1.1	Limitação das tensões	64
3.5.1.2	Limitação das deformações	65

3.5.1.3	Limitação da abertura de fendas	66
3.5.1.4	Limitação da fendilhação nas interfaces	67
3.5.2	Estado Limite Último (ELU)	68
3.5.2.1	Ductilidade	70
3.5.2.2	Ação conjunta betão-FRP	71
3.5.2.3	Esmagamento do betão após cedência das armaduras	71
3.5.2.4	Rotura do material FRP após cedência das armaduras	73
3.5.2.5	Perda de ação do material compósito	74
3.5.2.6	Destacamento em fendas de corte	74
3.5.2.7	Destacamento em zonas de flexão e zonas de ancoragem	75
3.5.2.8	Falha por corte nas extremidades de reforço	76
3.5.2.9	Destacamento com origem em irregularidades na superfície	77
4	CASO DE ESTUDO	78
4.1	<i>CONSIDERAÇÕES GERAIS</i>	78
4.2	<i>PROJETO DE REFORÇO DA ESTRUTURA</i>	79
4.3	<i>REFORÇO À FLEXÃO E AO CORTE USANDO MATERIAIS DE FRP</i>	101
4.3.1	Interface do programa “FRP Lamella”	102
4.3.1.1	Entrada de dados	102
4.3.1.2	Dimensionamento do Reforço	108
4.3.1.3	Saída de resultados (ELU) e (ELS)	109
4.3.1.4	Amarração do FRP na extremidade	111
4.3.1.5	Saída de resultados amarração do FRP na extremidade	112
4.3.1.6	Amarração da armadura de flexão no apoio	113
4.3.1.7	Dados sobre esforço transversal – armadura e cargas	113
4.3.1.8	Sistema FRP – Reforço ao corte	114
4.3.1.9	Secção transversal de FRP – Reforço ao corte	115
4.3.1.10	Saída de resultados de reforço ao corte	115
4.3.2	Dimensionamento de Reforços FRP das Vigas do Piso 0 (FRP Lamella da S&P)	116
5	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	124
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126
7	ANEXOS	129

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Relação tensão-deformação das fibras, matriz e FRP (CNR-DT200/2004)	18
Figura 2- Relação tensão-deformação em função da fração volumétrica (CNR-DT200/2004).....	18
Figura 3- Comportamento à fluência de um FRP a baixas e altas tensões. (Juvandes, 1999).....	25
Figura 4- Compósito de FRP -Formas Pré-Fabricada e Curada “in Situ”. (Juvandes 2011).....	29
Figura 5- Laminado de CFRP (Catálogo S&P C-Laminate).....	31
Figura 6- Exemplo de aplicação de laminados em lajes pela técnica EBR (Manual de Aplicação S&P C-Laminate)	31
Figura 7- Exemplo de aplicação de laminados em viga, pela técnica NSM (Catálogo S&P C-Laminate).....	32
Figura 8- Exemplo de aplicação de laminados em pilar, pela técnica NSM (Catálogo S&P C-Laminate)	32
Figura 9- Exemplo de aplicação de laminados cruzados e sobrepostos em lajes, pela técnica EBR (Catálogo S&P C-Laminate).....	33
Figura 10- Exemplo de elemento de CFRP laminado com sistema mecânico de ancoragem na extremidade (Catálogo S&P C-Laminate)	34
Figura 11- Exemplo de elemento de CFRP laminado, com sistema de pré-esforço (Catálogo S&P C-Laminate)	35
Figura 12- Exemplo de elemento de CFRP laminado com sistema de pré-esforço (Catálogo S&P C-Laminate)	35
Figura 13- Exemplo de tecido de fibra de carbono. (catálogo Clipcarbono)	37
Figura 14- Exemplo de aplicação de manta de CFRP no reforço de um monumento (Juvandes, 2011).....	37
Figura 15- Exemplo de manta em CFRP (Manual de Aplicação S&P C-Sheet 640)	38
Figura 16- Exemplo de manta em plinto de aparelho de apoio de obra de arte (Ficha Técnica/catálogo S&P – C-Sheet 240)	39
Figura 17- Exemplo de manta em CFRP aplicada em pilar, em complemento de laminados de CFRP (Ficha Técnica/catálogo S&P – C-Sheet 240)	39
Figura 18- Exemplo de aplicação de manta em CFRP, aplicada em viga (Ficha Técnica/catálogo S&P – C-Sheet 240).....	40
Figura 19- Exemplo de manta em CFRP, aplicada em vigas (Manual de Aplicação S&P – C-Sheet 240).....	40
Figura 20- Exemplo de manta em CFRP aplicada em vigas (Ficha Técnica S&P C-Sheet 640).....	41
Figura 21- Soluções de reforço (Catálogo – Reforço estrutural com compósitos em fibra S&P FRP SYSTEMS).	41
Figura 22- Etapas principais dum processo de reparação/reforço de uma estrutura de betão. (Silva, 2008).....	45
Figura 23- Relação multilinear carga-deslocamento central em vigas reforçadas (Ross et al, 1999).....	51
Figura 24- Situação inicial (Bulletin 14, <i>fib</i>).....	52
Figura 25- Distribuição de tensões e deformações numa seção de betão armado em ELU (Azevedo, 2008)	52
Figura 26- Diferentes modos de rutura de FRP (Au e Büyüköztürk, 2006). (Pohoryles, 2016).....	55
Figura 27- Modos de ruína de vigas reforçadas à flexão com CFRP (Buyukozturk et al., 2004).....	55
Figura 28- Roturas típicas de sistemas NSM. (Carvalho, 2010)	56
Figura 29- Modelos experimentais de caracterização da interface betão-compósito (ACI 440.XR, 2006)	57
Figura 30- Distribuição das tensões de corte nos modelos experimentais de flexão (a) ou de corte (b) (Silva, 2008)	58
Figura 31- Distribuição real e aproximada de tensões na interface (Buyukozturk et al, 2004)	59
Figura 32 - Leis de comportamento tensão de corte – escorregamento na interface (Juvandes, 1999).....	61
Figura 33- Diagrama de tensões-deformações do Aço e FRP. (Azevedo, 2008)	69
Figura 34- Análise da seção transversa para Estados Limites Últimos com reforço: (a) geometria, (b) distribuição de forças, (c) distribuição de tenções). (Bulletin 14, <i>fib</i>)	72
Figura 35- Destacamento causado por fendas de corte. (Bulletin 14 <i>fib</i>).....	74
Figura 36- a) conceito de vão fictício de corte; (b) analogia modelar para a análise de falha por corte na extremidade do reforço. (Bulletin 14, <i>fib</i>)	76
Figura 37- Planta do edifício em estudo	79
Figura 38- Corte Transversal do Edifício em estudo.....	80
Figura 39- Planta estrutural do Piso 0.....	80
Figura 40- Pormenor do Pórticos 9 (Pilar P1 a P6) e Pórtico 7 (Pilar 13 a 18).....	81
Figura 41- Pormenor do Pórtico 5 (Pilar P25 a P30) e Pórtico 3 (Pilar P37 a P42)	81
Figura 42- Pormenor do Pórtico 1 (Pilar P50 a P54).....	81
Figura 43- Pormenor do Pórtico 11 (segmentado) – Pilar P49 a P1.....	82
Figura 44- Pormenor do Pórtico 12 (Segmentado) – Pilar 54 a P6.....	82
Figura 45- Diagrama de Esforços Inicial – Momento Fletor (sobrecargas de 3KN/m ²) – Vão 49-50, vão 50-51, vão 51-52, vão 52-53 e vão 53-54 – Pórtico 1	83

Figura 46- Diagrama de Esforços Inicial – Momento Fletor (sobrecargas de 3KN/m ²) – Vão 37-38, vão 38-39, vão 39-40, vão 40-41 e vão 41-42 – Pórtico 3.....	84
Figura 47- Diagrama de Esforços Inicial – Momento Fletor (sobrecargas de 3KN/m ²) – Vão 25-26, vão 26-27, vão 27-28, vão 28-29 e vão 29-30 – Pórtico 5.....	84
Figura 48- Diagrama de Esforços Inicial – Momento Fletor (sobrecargas de 3KN/m ²) – Vão 13-14, vão 14-15, vão 15-16, vão 16-17 e vão 17-18 – Pórtico 7.....	85
Figura 49- Diagrama de Esforços Inicial – Momento Fletor (sobrecargas de 3KN/m ²) – Vão 1-2, vão 2-3, vão 3-4, vão 4-5 e vão 5-6 – Pórtico 9.....	86
Figura 50- Diagrama de Esforços Inicial – Momento Fletor (sobrecargas de 3KN/m ²) – Vão 49-37, vão 37-25, vão 25-13 e vão 13-1 – Pórtico 11.....	87
Figura 51- Diagrama de Esforços Inicial – Momento Fletor (sobrecargas de 3KN/m ²) – Vão 54-42, vão 42-30, vão 30-18 e vão 18-6 – Pórtico 12.....	87
Figura 52- Diagrama de Esforços Inicial – Momento Transverso (sobrecargas de 3KN/m ²) – Vão 49-50, vão 50-51, vão 51-52, vão 52-53 e vão 53-54 – Pórtico 1.....	88
Figura 53- Diagrama de Esforços Inicial – Momento Transverso (sobrecargas de 3KN/m ²) – Vão 37-38, vão 38-39, vão 39-40, vão 40-41 e vão 41-42 – Pórtico 3.....	89
Figura 54- Diagrama de Esforços Inicial – Momento Transverso (sobrecargas de 3KN/m ²) – Vão 25-26, vão 26-27, vão 27-28, vão 28-29 e vão 29-30 – Pórtico 5.....	89
Figura 55- Diagrama de Esforços Inicial – Momento Transverso (sobrecargas de 3KN/m ²) – Vão 13-14, vão 14-15, vão 15-16, vão 16-17 e vão 17-18 – Pórtico 7.....	90
Figura 56- Diagrama de Esforços Inicial – Momento Transverso (sobrecargas de 3KN/m ²) – Vão 1-2, vão 2-3, vão 3-4, vão 4-5 e vão 5-6 – Pórtico 9.....	90
Figura 57- Diagrama de Esforços Inicial – Momento Transverso (sobrecargas de 3KN/m ²) – Vão 49-37, vão 37-25, vão 25-13, vão 13-1 – Pórtico 11.....	91
Figura 58- Diagrama de Esforços Inicial – Momento Transverso (sobrecargas de 3KN/m ²) – Vão 54-42, vão 42-30, vão 30-18, vão 18-6 – Pórtico 12.....	91
Figura 59- Diagrama de Esforços Final – Momento Fletor (sobrecarga 4KN/m ²) - Vão 49-50, vão 50-51, vão 51-52, vão 52-53 e vão 53-54 – Pórtico 1.....	93
Figura 60- Diagrama de Esforços Final – Momento Fletor (sobrecarga 4KN/m ²) - Vão 37-38, vão 38-39, vão 39-40, vão 41-41, vão 41-42 – Pórtico 3.....	93
Figura 61- Diagrama de Esforços Final – Momento Fletor (sobrecarga 4KN/m ²) - Vão 25-26, vão 26-27, vão 27-28, vão 28-29, vão 29-30 – Pórtico 5.....	94
Figura 62- Diagrama de Esforços Final – Momento Fletor (sobrecarga 4KN/m ²) - Vão 13-14, vão 14-15, vão 15-16, vão 16-17 e vão 17-18 – Pórtico 7.....	94
Figura 63- Diagrama de Esforços Final – Momento Fletor (sobrecarga 4KN/m ²) - Vão 1-2, vão 2-3, vão 3-4, vão 4-5, vão 5-6 – Pórtico 9.....	95
Figura 64- Diagrama de Esforços Final – Momento Fletor (sobrecarga 4KN/m ²) – Vão 49-37, vão 37-25, vão 25-13 e vão 13-1 – Pórtico 11.....	95
Figura 65- Diagrama de Esforços Final – Momento Fletor (sobrecarga 4KN/m ²) – Vão 54-42, vão 42-30, vão 30-18 e vão 18-6 – Pórtico 12.....	96
Figura 66- Diagrama de Momentos Final - Esforços Transversos - (sobrecarga 4KN/m ²) – Vão 49-50, vão 50-51, vão 51-52, vão 52-53, vão 53-54 – Pórtico 1.....	97
Figura 67- Diagrama de Momentos Final - Esforços Transversos - (sobrecarga 4KN/m ²) – Vão 37-38, vão 38-39, vão 39-40, vão 40-41 e vão 41-42 – Pórtico 3.....	97
Figura 68- Diagrama de Momentos Final - Esforços Transversos - (sobrecarga 4KN/m ²) – Vão 25-26, vão 26-27, vão 27-28, vão 28-29, vão 29-30 – Pórtico 5.....	98
Figura 69- Diagrama de Momentos Final - Esforços Transversos - (sobrecarga 4KN/m ²) – Vão 13-14, vão 14-15, vão 15-16, vão 16-17, vão 17-18 – Pórtico 7.....	98
Figura 70- Diagrama de Momentos Final - Esforços Transversos - (sobrecarga 4KN/m ²) – Vão 1-2, vão 2-3, vão 3-4, vão 4-5, vão 5-6 – Pórtico 9.....	99
Figura 71- Diagrama de Momentos Final - Esforços Transversos - (sobrecarga 4KN/m ²) – Vão 49-37, vão 37-25, vão 25-13 e vão 13-1 – Pórtico 11.....	99
Figura 72- Diagrama de Momentos Final - Esforços Transversos - (sobrecarga 4KN/m ²) – Vão 54-42, vão 42-30, vão 30-18 e vão 18-6 – Pórtico 12.....	100
Figura 73- Programa FRP Lamella - Aspeto geral do layout inicial.....	102
Figura 74- Programa FRP Lamella - Dados relativos à geometria da viga.....	102
Figura 75- Programa FRP Lamella - Dados relativos ao betão.....	103
Figura 76- Programa FRP Lamella - Dados relativos ao Aço.....	104
Figura 77- Programa FRP Lamella - Dados relativos à armadura de flexão.....	105
Figura 78- Programa FRP Lamella – Dados relativos à extremidade da armadura.....	105
Figura 79- Programa FRP Lamella – Solicitações pré-reforço.....	106

Figura 80- Programa FRP Lamella – Solicitações pós-Reforço.....	106
Figura 81- Programa FRP Lamella – Seleção do tipo de reforço e método a utilizar	107
Figura 82- Programa FRP Lamella – secção transversal do FRP	108
Figura 83- Programa FRP Lamella – Dimensionamento do Reforço (janela inferior)	109
Figura 84- Programa FRP Lamella – Avaliação em Estado Limite Último (ELU).....	109
Figura 85- Programa FRP Lamella – Avaliação em Estado Limite de Serviço (ELS)	110
Figura 86- Programa FRP Lamella – Amarração do FRP na extremidade	111
Figura 87- Programa FRP Lamella – Verificação da amarração do FRP na extremidade.....	112
Figura 88- Programa FRP Lamella – Verificação da aderência do FRP – cintagem do reforço no ponto E	112
Figura 89- Programa FRP Lamella – Amarração de armadura de flexão no apoio	113
Figura 90- Programa FRP Lamella – Esforço Transverso – armadura e cargas	114
Figura 91- Programa FRP Lamella – Sistemas FRP – Reforço ao corte	114
Figura 92- Programa FRP Lamella – secção transversal de FRP – reforço ao corte	115
Figura 93- Programa FRP Lamella – Verificação do reforço ao corte.....	116
Figura 94- Esquema de posicionamento de laminados inseridos, corte transversal e corte longitudinal - Apoio 49 - Pórtico 11.....	120
Figura 95- Esquema de posicionamento de laminados inseridos (A_f), corte transversal e longitudinal – Vão 25-26 - Pórtico 5.....	121
Figura 96- Esquema de posicionamento de laminados aderidos externamente (A_f), corte longitudinal – Vão 49-37 - Pórtico 11	121
Figura 97- Esquema de posicionamento de laminados aderidos externamente (A_f) com manta de confinamento transversal (a_w)- Vão 54-42 - Pórtico 12	121
Figura 98- Esquema longitudinal do Pórtico 1, com localização dos reforços resultantes do dimensionamento. 122	

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 Propriedades típicas das fibras usadas em FRP (ACI 440.2R-08)	16
Tabela 2- Propriedades de tração de barras de FRP com 50% a 70% de volume de fibra (ACI 440.2R-08 – apêndice A)	16
Tabela 3- Propriedades de tração dos laminados de FRP com 40% a 60% de fibra (ACI 440.2R-08 – apêndice A)	16
Tabela 4- Força de tração última de alguns FRP comerciáveis (ACI 440.2R-08 – Apêndice A)	17
Tabela 5- Propriedades típicas de resinas epoxídicas (Bulletin 14 – <i>fib</i>).....	19
Tabela 6- Valores típicos de densidade dos materiais FRP (ACI 440.2R-08)	21
Tabela 7- Valores típicos de expansão térmica dos materiais FRP (ACI 440.2R-08).....	22
Tabela 8- Soluções do Sistema de reforço [baseado em Reforço estrutural com compósitos em fibra S&P SYSTEMS].....	42
Tabela 9- Fatores de segurança(γ_{fF}) de materiais compósitos FRP (Bulletin 14 da <i>fib</i>)	68
Tabela 10- Resultado da análise de reforços FRP ao Pórtico 1	117
Tabela 11- Resultado da análise de reforços FRP ao Pórtico 3	117
Tabela 12- Resultado da análise de reforços FRP no Pórtico 5	118
Tabela 13- Resultado da análise de reforços FRP no Pórtico 7	118
Tabela 14- Resultado da análise de reforços FRP no Pórtico 9	119
Tabela 15- Resultado da análise de reforços FRP no Pórtico 11	119
Tabela 16- Resultado da análise de reforços FRP no Pórtico 12	120

SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS

ACI	- <i>American Concrete Institute</i> , EUA
AFRP	- Polímeros (ou compósitos) reforçados com fibras de aramida (A)
ASTM	- <i>American Standard Testing Materials</i>
CCC	- <i>Association of Composite materials using Continuous fiber for Concrete Reinforcement</i>
CEB	- Comité Euro-International du Béton
CEN	- Comité Européen de Normalização
CFRP	- Polímeros (ou compósitos) reforçados com fibras de carbono (C)
CFS	- <i>Carbon fibre sheets</i> , mantas de FRP
CNR	Consiglio Nazionale delle Ricerche
DIBt	- <i>Deutsches Institut für Bautechnik</i> , na Alemanha
EBR	- <i>Externally Bonded Reinforcement</i>
EC1	- Eurocódigo 1
EC2	- Eurocódigo 2
ELS	- Estados Limite de Serviço
ELU	- Estado Limite Último
<i>fib</i>	- <i>Fédération Interbationale du Béton</i>
FRP	- Família geral dos polímeros (ou compósitos) reforçados com fibras contínuas
GFRP	- Polímeros (ou compósitos) reforçados com fibras de vidro (G)
IBMB	- <i>Institute for building Materials, Concrete Construction and Fire Protection</i>
ISEC	- Instituto Superior de Engenharia Civil
IST	- Instituto Superior Técnico
ISIS	- <i>Intelligent Sensing for Innovative Structures</i> , Canadá
JCI	- <i>Japanese Concrete Institute</i> , Japão
JPDPA	- <i>Japan Building Disaster Prevention Association</i>
JSCE	- <i>Japanese Society of Civil Engineers</i>
LNCE	- Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MR	- Modo de ruína
NSM	- <i>Near Surface Mounted</i>
RC	- <i>Reinforced Concrete</i>
SIA	- <i>Swiss Society of Engineers and Architects</i>
SY	- <i>Steel Yielding</i>
UFRJ	- Universidade Federal do Rio de Janeiro
UC	- Universidade de Coimbra
UG	- <i>Universiteit Gent</i>
UM	- Universidade do Minho
UNL	- Universidade Nova de Lisboa

NOTAÇÕES ESCALARES LATINAS

a	- vão de corte (m)
a_1	- deformação na seção não fendilhada
a_2	- deformação na seção fendilhada
a'	- Distância medida desde a fibra mais comprimida até à camada de armaduras de compressão (cm)
A_c	- área da secção transversal de betão (cm^2)
A_f	- área de FRP dimensionada (cm^2)
a_L	- translação do diagrama de forças M_{sd}/z (cm)
a_{L0}	- vão de corte fictício (cm)
A_{ceff}	- Altura efetiva de tração na seção
A_s	- área da armadura ordinária de tração (cm^2)
A'_s	- Área de armadura ordinária de compressão (cm^2)

b	- largura da seção do elemento de betão armado a reforçar (m)
b_f	- largura de cada laminado/manta de FRP dimensionado (mm)
c	- recobrimento da armadura de aço de tração (cm)
c'	- recobrimento da armadura de aço de compressão (cm)
d	- altura útil (cm)
E_s	- módulo de elasticidade do aço da armadura de tração (GPa)
E_m	- módulo de elasticidade da matriz
E_f	- módulo de elasticidade do reforço FRP a utilizar no reforço (GPa)
E_{fu}	- módulo de elasticidade na rotura (GPa)
E_l	- módulo de elasticidade do sistema compósito
f	- distância da extremidade do reforço FRP à face do apoio (cm)
F_c	- Força de compressão no betão (KN)
F_f	- Força à tração das fibras (KN)
f_c	- tensão de compressão no betão (MPa)
f_{c0}	- valor de cálculo da tensão de compressão no betão no instante de aplicação do reforço (MPa)
f_{ck}	- valor característico da tensão de compressão do betão (MPa)
f_{yk}	- valor característico da tensão de cedência do aço (MPa)
f_{cm}	- valor médio da tensão de compressão no betão (MPa)
f_{ct}	- tensão de tração do betão (MPa)
f_f	- resistência à tração das fibras (MPa)
f_l	- resistência à tração do sistema compósito (MPa)
f_m	- resistência à tração da matriz (MPa)
G_F	- energia de fratura
h	- altura da seção retangular do elemento de betão armado a reforçar (cm)
I_{02}	- Momento de Inércia da seção inicial em estado fendilhado (m^4)
l	- laminado
k	- fator
k_m	- coeficiente de segurança relacionado com a noção de extensão eficaz do ACI
L_0	- distância da extremidade do reforço FRP ao eixo do apoio (cm)
M_0	- momento fletor inicial apenas devido a cargas permanentes ($KN.m$)
M_{cr}	- momento de inicio de fendilhação ($KN.m$)
M_r	- momento fletor resistente ($KN.m$)
M_{rd}	- valor de cálculo do momento fletor resistente ($KN.m$)
n	- número de camadas de FRP orientadas na direção das tensões principais
n_f	- número de camadas de cada laminado/manta de FRP dimensionado (mm)
N_{s1}	- força na armadura ordinária (KN)
N_f	- força no FRP num teste de aderência (KN)
m_f	- número de FRP colado justaposto lado a lado
t_f	- espessura do reforço FRP dimensionado (mm)
t_l	- espessura do laminado FRP (mm)
t_w	- espessura nominal de uma camada de reforço ao corte dom FRP - manta [mm]
V_f	- percentagem de volume de fibras por unidade de volume do laminado
V_{sd}	- valor do esforço transversal a usar no modelo de Jansze para verificar a fenda de corte na extremidade devida a cargas concentradas (KN)
V_{rd}	- valor de cálculo do esforço transversal resistente da seção (REBAP) (KN)
w	- largura das fendas (mm)
x	- profundidade do eixo neutro medida desde a fibra mais comprida (cm)
z	

NOTAÇÕES ESCALARES GREGAS

α	- parâmetro relacionado com o grau de reforço ao corte
β_1	- coeficiente que tem em consideração as características de aderência do reforço
β_2	- coeficiente que tem em conta o tipo de carregamento
γ	- coeficiente de bloco retangular de tensões no betão
γ_f	- coeficiente de segurança para o FRP a ser dimensionado
δ_G	- coeficiente do diagrama parábola-retângulo
ε_c	- extensão na fibra mais oprimida de betão (‰)
ε_{b0}	- extensão inicial na face a reforçar devida apenas a ações permanentes (‰)
ε_f	- extensão do reforço de FRP (‰)
ε_{fu}	- extensão última no reforço de FRP (‰)
ε_{su}	- valor da extensão na armadura ordinária de tração na rotura (‰)
ε_{fue}	- valor eficaz da extensão última no reforço de FRP (‰)
ε_{fum}	- valor médio da extensão última no reforço de FRP (‰)
ε_s	- extensão na armadura ordinária de tração (‰)
ε_r	- extensão ao nível do reforço (‰)
ε_{cu}	- extensão última no betão correspondente ao esmagamento (‰)
ε_{sy}	- extensão de cedência do aço de armadura de tração (‰)
ε_0	- O mesmo que ε_{b0}
ϕ	- coeficiente de segurança para a combinação em ELS
φ	- fator de limitação da tensão de compressão no betão
η	- igual a γ
ξ	- parâmetro dado pelo quociente entre x e d
τ	- tensão de corte rasante na interface betão-FRP
τ_{sm}	- tensão média de aderência do aço
τ_{f1}	- tensão de pico (MPa)
τ_{Rk}	- valor característico da tensão resistente de corte (MPa)
ν	- fator de eficácia
ρ_{eq}	- percentagem de armadura equivalente (%)

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

Os elementos com estrutura de betão, quando bem dimensionados e bem executados, têm um largo período de tempo de vida útil. Porém, este tempo pode ser posto em causa e sofrer alterações por variadas razões.

Nos últimos anos, pela conjuntura económica e social que se atravessa, a necessidade de reabilitar, reparar e reforçar estruturas de betão armado aumentou consideravelmente e a tendência é que assim continue, ou até que aumente.

Quer seja pela necessidade de adaptabilidade dos edifícios a outros tipos de utilização (aumento de cargas a atuar nas estruturas), pela ocorrência de erros de projeto e /ou construção, pela manutenção dos materiais que com o tempo e a utilização sofrem de redução de resistência e degradação (carbonatação do betão e corrosão das armaduras); quer seja pelo envelhecimento dos materiais (desgaste), ou pela ocorrência de acidentes (sismos, incêndios, explosões, cheias, vandalismos...), há efetivamente uma grande aderência à reabilitação e há procura de novas técnicas de reforço e reparação das estruturas. Novas técnicas têm vindo a ser desenvolvidas, que sejam mais práticas, mais eficazes, mais adaptáveis e contingentemente mais em conta.

Uma nova técnica de reforço à flexão e ao corte de estruturas de betão armado tem vindo a ser desenvolvida nos últimos anos - Técnicas de Reforço de Estruturas de Betão com utilização de materiais Compósitos - FRP (*Fibre Reinforced Polymmer*). Esta técnica surge como uma boa alternativa aos métodos tradicionais que utilizam materiais como as argamassas cimentícias, o aço, e as alvenarias.

A utilização de materiais compósitos FRP, em alternativas às técnicas de reforço tradicionais, tem vindo a tornar-se uma boa opção, evitando os aspetos menos positivos destas últimas. Esta técnica tem vindo a mostrar-se de fácil utilização e de simples execução. A principal característica assenta no facto de que os FRP apresentam baixo peso específico e elevadas resistências mecânicas, sendo imunes à corrosão.

Existem no mercado vários tipos de fibras, de várias naturezas, orgânicas e inorgânicas. As mais utilizadas são a fibra de vidro - GRFP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*); a fibra de aramida ou kevlar - AFRP (*Aramid Fiber Reinforced Polymer*) e a fibra de carbono - CFRP (*Carbon Reinforced Polyme*).

Na engenharia Civil, os polímeros de carbono são os que têm vindo a demonstrar maior campo de aplicação. E é sobre este tipo de polímero que vai incidir este trabalho.

1.2 OBJETIVOS E METODOLOGIA

Esta Dissertação enquadra-se no Curso de Mestrado de Engenharia Civil – especialização em construção urbana e tem como principais objetivos:

- Aprofundar os conhecimentos na área do Reforço e reabilitação de Estruturas;
- Estudar e compreender os compósitos de polímeros em fibra;
- Estudar as particularidades dos reforços em CFRP de estruturas existentes;
- Aplicar métodos de dimensionamento de reforço de elementos estruturais de betão armado, através da utilização de compósitos com polímeros de fibras de carbono, utilizando um programa de dimensionamento desenvolvido pela empresa S&P.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta Dissertação é composta por 5 capítulos organizados da seguinte forma:

Capítulo 1 – Introdução, neste capítulo é procedesse à introdução do tema a desenvolver, identificam-se o os objetivos pretendidos e apresenta-se a estrutura do documento;

Capítulo 2 – Compósitos de Polímeros de Fibra (FRP) – Revisão bibliográfica, neste capítulo apresenta-se o resultado da pesquisa feita sobre os materiais compósitos, o que são, como são constituídos, quais as suas propriedades físicas e mecânicas e qual o seu comportamento ao longo do tempo. Neste capítulo apresentam-se também quais os compósitos mais utilizados na engenharia civil, e os tipos de reforços utilizados.

Capítulo 3 – Dimensionamento de CFRP, este capítulo foca-se no trabalho que tem vindo a ser desenvolvido um pouco por todo o mundo em redor da temática do reforço de estruturas de betão com reforços de compósitos de fibras de carbono, no sentido de regulamentar, estabelecer requisitos e normas adequadas ao dimensionamento e à utilização deste tipo de materiais. Explica-se aqui quais as referências normativas que são tidas em conta no processo do reforço e reabilitação de estruturas de betão armado.

Capítulo 4 – Caso de Estudo, tendo como base um caso concreto de uma estrutura em betão armado necessitada de reforço, motivada pela alteração de utilização da mesma, utilizou-se o programa informático desenvolvido pela empresa S&P –

“Lamella 5.6” para verificar a viabilidade do reforço de vigas através do uso de mantas de CFRP. Neste capítulo apresenta-se os princípios básicos do programa usado e o processo do reforço e respetivas verificações.

Capítulo 5 – Conclusões, neste capítulo apresentam-se as conclusões resultantes deste trabalho, sugerindo-se futuros desenvolvimentos sobre o tema;

Capítulo 6 – apresentam-se neste capítulo as referências bibliográficas.

2 COMPÓSITOS DE POLÍMEROS DE FIBRA (FRP)- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o incremento do interesse neste tipo de soluções, e a abrangente aplicabilidade que estes produtos têm vindo a demonstrar no campo da reabilitação e reforço de elementos estruturais, surgem cada vez mais publicações sobre esta matéria. Grande parte deste trabalho tem como base a pesquisa feita através de publicações e relatórios de estudos experimentais que têm vindo a ser desenvolvidos.

Para fundamentar o tema deste trabalho foi feita uma análise ampla às publicações e bibliografia académica existentes sobre os polímeros reforçados com fibras (FRP) e especialmente o uso de fibras de Carbono.

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

No âmbito da engenharia civil, o uso de materiais compósitos é recente e ainda reduzido. No entanto, outras indústrias como a aero-espacial, automobilística, ferroviária e naval, têm já grande experiência no uso deste tipo de material.

Mais recentemente, tem-se vindo a registar maior interesse e aplicação destes produtos no âmbito da engenharia, mais concretamente na reabilitação e reforço de estruturas de betão armado.

Numa primeira análise, o custo inicial deste tipo de técnica de reforço, com uso de polímeros reforçados, é mais elevado do que as técnicas tradicionais que usam o betão e o aço. No entanto, o custo associado à mão-de obra e equipamento de instalação necessários à utilização de reforço estrutural usando os FRP pode ser bem menor na maioria dos casos.

No que concerne à sua constituição os produtos de FRP são anisotrópicos e na sua composição, as fibras são praticamente o que confere a capacidade resistente do sistema.

O reforço e reabilitação de elementos de betão utilizando materiais compósitos tem vindo a demonstrar-se muito versátil: pode utilizar-se elementos de FRP como armaduras não metálicas, ou técnicas executadas com produtos compósitos, como mantas ou laminados (pré-esforçados ou não), em que os mesmos são colados nas faces dos elementos (para resistir à flexão e ao corte) ou até incrustados nos elementos. Pode também utilizar-se cabos de FRP pós-tensionados e não aderentes, exteriormente aos elementos a reforçar, ou até utilizar técnicas de reforço por encamisamento total ou parcial de pilares em situações de anomalias devido a sismos.

Outro campo de utilização deste tipo de produtos, que não é abordado neste documento, mas que começa a ser frequentemente usado na engenharia civil, é no âmbito do reforço de pavimentos, através de grelhas de fibra de carbono pré-

revestidas de betume. Este tipo de material contribui para o reforço estrutural do pavimento.

2.2 MATERIAIS CONSTITUINTES DOS FRP

As propriedades físicas e mecânicas dos FRP influenciam e explicam o comportamento e as propriedades que estes elementos conferem às estruturas de betão armado. Muito se tem escrito e investigado sobre os efeitos de carregamento e durabilidade, temperatura e humidade destas soluções.

Os materiais constituintes normalmente utilizados nos sistemas FRP, tais como resinas, primários, massas, adesivos, fibras..., têm vindo a ser desenvolvidos e testados para poderem ser usados no reforço estrutural de elementos de betão de uma forma mais consistente e fundamentada.

Os Polímeros Reforçados com Fibras (*FRP*), são materiais compósitos (plásticos) reforçados com fibras extremamente fortes e leves. Basicamente, estes materiais compósitos, são constituídos essencialmente por duas partes: a matriz e a fibra.

A MATRIZ, é geralmente uma resina polimérica, tal como epóxi ou polyester. Esta matriz, com características relativamente dúcteis, tem a função de envolver os reforços de forma a que estes funcionem em conjunto.

A FIBRA é o reforço, constituído por filamentos de pequeno diâmetro, esta apresenta grande resistência e elevado módulo de elasticidade.

2.2.1 Fibras

As fibras comercialmente mais utilizadas em sistemas FRP são as fibras de vidro, aramida e de carbono.

São as fibras que conferem ao sistema força e rigidez.

Fiber type	Elastic modulus		Ultimate strength		Rupture strain, minimum, %
	10 ³ ksi	GPa	ksi	MPa	
Carbon					
General purpose	32 to 34	220 to 240	300 to 550	2050 to 3790	1.2
High-strength	32 to 34	220 to 240	550 to 700	3790 to 4820	1.4
Ultra-high-strength	32 to 34	220 to 240	700 to 900	4820 to 6200	1.5
High-modulus	50 to 75	340 to 520	250 to 450	1720 to 3100	0.5
Ultra-high-modulus	75 to 100	520 to 690	200 to 350	1380 to 2400	0.2
Glass					
E-glass	10 to 10.5	69 to 72	270 to 390	1860 to 2680	4.5
S-glass	12.5 to 13	86 to 90	500 to 700	3440 to 4140	5.4
Aramid					
General purpose	10 to 12	69 to 83	500 to 600	3440 to 4140	2.5
High-performance	16 to 18	110 to 124	500 to 600	3440 to 4140	1.6

Tabela 1 Propriedades típicas das fibras usadas em FRP (ACI 440.2R-08)

FRP system description	Young's modulus, 10 ³ ksi (GPa)	Ultimate tensile strength, ksi (MPa)	Rupture strain, %
High-strength carbon/epoxy	17 to 24 (115 to 165)	180 to 400 (1240 to 2760)	1.2 to 1.8
E-glass/epoxy	4 to 7 (27 to 48)	70 to 230 (480 to 1580)	1.6 to 3.0
High-performance aramid	8 to 11 (55 to 76)	130 to 280 (900 to 11,930)	2.0 to 3.0

Tabela 2- Propriedades de tração de barras de FRP com 50% a 70% de volume de fibra (ACI 440.2R-08 – apêndice A)

FRP system description (fiber orientation)	Young's modulus		Ultimate tensile strength		Rupture strain at 0 degrees, %
	Property at 0 degrees	Property at 90 degrees	Property at 0 degrees	Property at 90 degrees	
	10 ³ ksi (GPa)	10 ³ ksi (GPa)	ksi (MPa)	ksi (MPa)	
High-strength carbon/epoxy, degrees					
0	15 to 21 (100 to 140)	0.3 to 1 (2 to 7)	150 to 350 (1020 to 2080)	5 to 10 (35 to 70)	1.0 to 1.5
0/90	8 to 11 (55 to 76)	8 to 11 (55 to 75)	100 to 150 (700 to 1020)	100 to 150 (700 to 1020)	1.0 to 1.5
+45/-45	2 to 4 (14 to 28)	2 to 4 (14 to 28)	25 to 40 (180 to 280)	25 to 40 (180 to 280)	1.5 to 2.5
E-glass/epoxy, degrees					
0	3 to 6 (20 to 40)	0.3 to 1 (2 to 7)	75 to 200 (520 to 1400)	5 to 10 (35 to 70)	1.5 to 3.0
0/90	2 to 5 (14 to 34)	2 to 5 (14 to 35)	75 to 150 (520 to 1020)	75 to 150 (520 to 1020)	2.0 to 3.0
+45/-45	2 to 3 (14 to 21)	2 to 3 (14 to 20)	25 to 40 (180 to 280)	25 to 40 (180 to 280)	2.5 to 3.5
High-performance aramid/epoxy, degrees					
0	7 to 10 (48 to 68)	0.3 to 1 (2 to 7)	100 to 250 (700 to 1720)	5 to 10 (35 to 70)	2.0 to 3.0
0/90	4 to 5 (28 to 34)	4 to 5 (28 to 35)	40 to 80 (280 to 550)	40 to 80 (280 to 550)	2.0 to 3.0
+45/-45	1 to 2 (7 to 14)	1 to 2 (7 to 14)	20 to 30 (140 to 210)	20 to 30 (140 to 210)	2.0 to 3.0

Notes:

FRP composite properties are based on FRP systems having an approximate fiber volume of 50% and a composite thickness of 0.1 in. (2.5 mm). In general, FRP bars have fiber volumes of 50 to 70%, precured systems have fiber volumes of 40 to 60%, and wet layup systems have fiber volumes of 25 to 40%. Because the fiber volume influences the gross-laminate properties, precured laminates usually have higher mechanical properties than laminates created using the wet layup technique.

Zero degrees represents unidirectional fiber orientation.

Zero/90 degrees (or +45/-45 degrees) represents fiber balanced in two orthogonal directions, where 0 degrees is the direction of loading, and 90 degrees is normal to the direction of loading.

Tension is applied to 0-degree direction. All FRP bar properties are in the 0-degree direction.

Tabela 3- Propriedades de tração dos laminados de FRP com 40% a 60% de fibra (ACI 440.2R-08 – apêndice A)

FRP system description (fiber type/saturating resin/fabric type)	Fabric weight		Ultimate strength [†]	
	oz/yd ³	g/m ³	lb/in.	kN/mm
General purpose carbon/resin unidirectional sheet	6	200	2600	500
	12	400	3550	620
High-strength carbon/resin unidirectional sheet	7	230	1800	320
	9	300	4000	700
	18	620	5500	960
High-modulus carbon/resin unidirectional sheet	9	300	3400	600
General-purpose carbon/resin balanced sheet	9	300	1000	180
E-glass/resin unidirectional sheet	27	900	4100	720
	10	350	1300	230
E-glass/balanced fabric	9	300	680	120
Aramid/resin unidirectional sheet	12	420	4000	700
High-strength carbon/resin precured, unidirectional laminate	70 [‡]	2380 [‡]	19,000	3300
E-glass/vinyl ester precured, unidirectional shell	50 [‡]	1700 [‡]	9000	1580

^{*}Values shown should not be used for design.

[†]Ultimate tensile strength per unit width of sheet or fabric.

[‡]Precured laminate weight.

Tabela 4- Força de tração última de alguns FRP comerciais (ACI 440.2R-08 – Apêndice A)

2.2.2 Matriz

A matriz de um material compósito é responsável pela proteção das fibras contra os agentes exteriores, assim como pela distribuição de tensões entre as mesmas. É a matriz que influencia os parâmetros de resistência mecânica dos compósitos, as suas propriedades em termos de compressão ou em corte, bem como as suas propriedades físicas e químicas. Deste modo, a escolha do tipo de matriz deve ser feita com base num estudo prévio.

As matrizes podem ser de dois tipos: as termoendurecíveis e as termoplásticas (do tipo polipropileno).

As matrizes do tipo termoendurecível, são as mais utilizadas (estão aqui incluídas as resinas epoxídicas, os poliésteres e o vinil). Estas apresentam maior resistência a agentes químicos, reduzida fluência e perda de tensões por relaxamento e considerável estabilidade perante ações térmicas.

De forma sintetizada, as fibras são responsáveis pela capacidade de carga e rigidez do compósito. Por outro lado, a matriz garante a transferência de tensões entre fibras, assim como a sua proteção relativamente ao meio exterior.

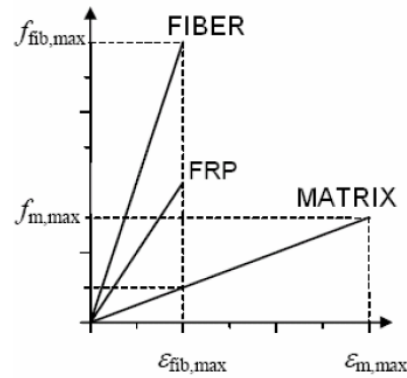


Figura 1- Relação tensão-deformação das fibras, matriz e FRP (CNR-DT200/2004)

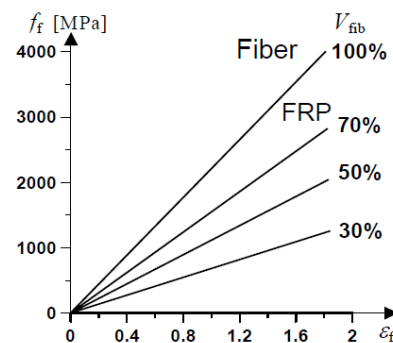


Figura 2- Relação tensão-deformação em função da fração volumétrica (CNR-DT200/2004)

2.2.3 Resinas

No que diz respeito às resinas, uma vasta gama de resinas poliméricas, incluindo primários, massas de enchimento, saturantes e adesivos, são usadas nos sistemas de FRP. Tipos de resinas comuns, como epóxi, vinil éster (éter de vinilo), poliésteres, são normalmente formuladas para serem usadas em variados tipos de ambientes, com diferentes condições. No que diz respeito às resinas a serem usadas nos sistemas de FRP, elas têm que apresentar:

- Compatibilidade e adesividade com o betão;
- Compatibilidade e adesividade com o próprio sistema FRP;
- Resistência aos efeitos ambientais, à humidade, água salgada, temperaturas extremas e aos químicos associados ao betão e à sua reação com o ambiente exterior;
- Características de preenchimento (viscosidade);
- Características de trabalhabilidade;
- Compatibilidade com a aplicação em causa e com a fibra em questão no que diz respeito à adesão;
- Características mecânicas apropriadas para o compósito de FRP.

- Primários – são usados para penetrar na superfície de betão de suporte, promovendo e potenciando a adesão da resina saturada ou adesivo.

- Massas de enchimento – servem para preencher pequenos vazios ou fissuras existentes na superfície de suporte, para obtenção de uma superfície suave a que o sistema FRP possa aderir. O preenchimento de vazios serve também para evitar a formação de bolhas durante o processo de cura da resina de saturação;

- Resina de Impregnação – é a própria resina que serve para impregnar as fibras de reforço, fixa-las no local e promovendo a transferência de esforços entre as fibras e destas para a superfície colada. Para sistemas curados “in situ”, a literatura internacional atribui o termo “Saturating Resin”, isto para diferencia-lo da designação corrente de adesivo no caso dos laminados, pré-fabricados.

- Adesivo - No caso de laminados pré-fabricados, o *agente adesivo* é um material distinto do compósito de FRP. Neste caso, são usados para adquirir um elo de adesão entre os laminados os laminados de FRP e a superfície de betão, promovendo uma superfície de tensão de corte entre o substrato de betão e o sistema de RFP de reforço. Os adesivos servem também para unir várias lâminas de laminados de FRP.

Propriedade (a 20°C)	Resina Epoxidica
Densidade (kg/m ³)	1100 – 1700
Módulo de Elasticidade (GPa)	0,5 – 20
Tensão de Tracção (MPa)	9 – 30
Tensão de Corte (MPa)	10 – 30
Tensão de Compressão (MPa)	55 -110
Extensão de Rotura (%)	0,5 – 5
Coefficiente de Expansão Térmica (10 ⁻⁶ /°C)	25 – 100
Temperatura de Transição Vítea (°C)	45 – 80

Tabela 5- Propriedades típicas de resinas epoxidicas (Bulletin 14 – *fib*)

2.3 REVESTIMENTOS DE PROTEÇÃO

Os revestimentos de proteção, servem precisamente para protegerem a ligação do reforço em FRP de potenciais danos ambientais ou feitos mecânicos.

Normalmente os revestimentos são aplicados na superfície exterior do sistema FRP finalizado, depois de curado o adesivo ou a resina de saturação.

Existem vários tipos de Revestimentos:

- Os revestimentos de proteção apresentam-se em várias formas: Revestimentos polímeros, geralmente de epóxi ou poliuretano;
- Revestimentos acrílicos, em sistemas simples de acrílico ou sistemas à base de cimento acrílico. Podem também surgir em diferentes texturas;
- Sistemas cimentícios, que podem exigir rugosidade da superfície de FRP (como a difusão de areia em resinas húmidas) e podem ser instalados da mesma forma em que seriam numa superfície de betão;
- Revestimentos intumescentes, que são revestimentos à base de polímero, usados para controlar a propagação de chamas e geração de fumaça por requisitos de código.

São várias as razões pelas quais é necessário o uso de revestimentos de proteção:

- Proteção da Luz Ultravioleta - Há um número de métodos disponíveis para proteger o sistema da luz ultravioleta. Estes incluem: revestimentos acrílicos, superfície cimentícia, revestimentos de poliuretano alifático, e outros. Certos tipos de resinas de vinilester têm maior durabilidade à luz ultravioleta do que resinas epóxi;
- Proteção ao Fogo - estruturas reforçadas com FRP deve estar em conformidade com todos os códigos de construção e incêndio aplicáveis. A resistência ao fogo dos elementos de FRP é baixa, pelo que estes sistemas podem ser usados para limitar a propagação de fumaça e chamas;
- Vandalismo - para resistir a situações de vandalismo, o sistema de proteção deve ser duro e durável. Existem diferentes níveis de sistemas de proteção contra vandalismo desde revestimentos de poliuretano que resistem ao corte e raspagem, a sobreposições cimentícias que fornecem muito mais proteção;
- Impacto, abrasão e desgaste - os sistemas de proteção para impacto, abrasão e desgaste são semelhantes aos usados para proteção contra situações de vandalismo. Porém, a abrasão e o desgaste resultam de uma exposição contínua, enquanto que o vandalismo de um evento único, pelo que os sistemas de proteção são geralmente em função da sua dureza e durabilidade;
- Estética - os acabamentos de proteção podem ser usados para ocultar o sistema FRP. Estes podem ser revestimentos de látex acrílico que são de cor cinza para combinar com a cor do betão, ou optar por outras cores e texturas para combinar com a estrutura existente;
- Resistência Química - Exposição a produtos químicos agressivos, como ácidos fortes, podem danificar o sistema FRP. Neste tipo de ambientes, revestimentos com produtos químicos de maior resistência, como uretanos e epóxi novolac, podem ser usados;

- Submersão em água potável - Em aplicações onde o sistema FRP tem que ser submerso em água potável, o sistema FRP pode lixiviar compostos para a água de abastecimento. Revestimentos de proteção que não lixiviam produtos químicos prejudiciais na água podem ser usados como uma barreira entre o sistema FRP e o abastecimento de água potável.

2.4 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS FRP

2.4.1 Densidade

Os materiais FRP têm densidades que variam de 75 a 130 lb / ft³ (1,2 a 2,1 g / cm³), o que é quatro a seis vezes inferior ao do aço (Tabela 6). A densidade reduzida leva a custos de transporte mais baixos, reduz a “carga morta” adicionada na estrutura, e facilita o manuseamento dos materiais no local do projeto;

Steel	GFRP	CFRP	AFRP
490 (7.9)	75 to 130 (1.2 to 2.1)	90 to 100 (1.5 to 1.6)	75 to 90 (1.2 to 1.5)

Tabela 6- Valores típicos de densidade dos materiais FRP (ACI 440.2R-08)

2.4.2 Coeficiente de Expansão Térmica

Os coeficientes de expansão térmica de materiais FRP unidirecionais diferem nas direções longitudinal e transversal, dependendo dos tipos de fibra, resina e fração de volume da fibra. A Tabela 7 lista os coeficientes longitudinais e transversais de expansão para materiais FRP unidirecionais típicos de materiais de FRP unidirecionais. Note-se que um coeficiente negativo de expansão térmica indica que o material se contrai com o aumento da temperatura e se expande com diminuição da temperatura. Para referência, o betão tem um coeficiente de expansão térmica que varia de 4×10^{-6} a $6 \times 10^{-6} / ^\circ \text{F}$ (7×10^{-6} a $11 \times 10^{-6} / ^\circ \text{C}$), e geralmente é assumido ser isotrópico (Mindess e Young 1981). O aço tem um coeficiente isotrópico de expansão térmica de $6,5 \times 10^{-6} / ^\circ \text{F}$ ($11,7 \times 10^{-6} / ^\circ \text{C}$).

Direction	Coefficient of thermal expansion, $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)		
	GFRP	CFRP	AFRP
Longitudinal, α_L	3.3 to 5.6 (6 to 10)	-0.6 to 0 (-1 to 0)	-3.3 to -1.1 (-6 to -2)
Longitudinal, α_T	10.4 to 12.6 (19 to 23)	12 to 27 (22 to 50)	33 to 44 (60 to 80)

*Typical values for fiber-volume fractions ranging from 0.5 to 0.7.

Tabela 7- Valores típicos de expansão térmica dos materiais FRP (ACI 440.2R-08)

2.4.3 Efeito das Altas Temperaturas

Além do T_g (que é o ponto médio de temperatura sobre a qual a resina muda de um estado vítreo para um estado viscoelástico), que ocorre num intervalo de temperaturas superiores a aproximadamente 30°C , o módulo de elasticidade de um polímero é significativamente reduzido devido a alterações na sua estrutura molecular. O valor de T_g depende do tipo de resina, mas está normalmente na região dos 60°C a 82°C . Num material composto de FRP, as fibras, que exibem melhores propriedades térmicas do que a resina, podem continuar a suportar alguma carga na direção longitudinal até que o limite de temperatura das fibras seja alcançado. Isto pode ocorrer a temperaturas superiores a 1000°C , para fibras de carbono e 175°C , para fibras de aramida. As fibras de vidro são capazes de resistir a temperaturas superiores a 275°C . No entanto, devido à redução na transferência de força entre as fibras através da ligação à resina, as propriedades de tração do composto no seu todo são reduzidas. Os resultados de testes realizados indicaram que as temperaturas de 250°C , muito mais altas do que a temperatura vítrea da resina T_g , irão reduzir a resistência à tração de materiais GFRP e CFRP em mais de 20% (Kumahara et al. 1993). Outras propriedades afetadas pela transferência de cisalhamento através da resina, tal como a resistência à flexão, são reduzidos significativamente a temperaturas mais baixas [Wang e Evans 1995]. Para aplicações críticas de ligação de sistemas FRP, as propriedades do polímero na interface fibra-betão são essenciais para manter a ligação entre o FRP e o betão. Para temperaturas próximas à sua T_g , no entanto, as propriedades mecânicas do polímero são significativamente reduzidas, e o polímero começa a perder sua capacidade de transferir as tensões do betão às fibras.

2.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS FRP

2.5.1 Comportamento à Tração

Quando carregados em tensão direta, os materiais FRP unidirecionais não exibem nenhum comportamento plástico (cedência) antes da rutura. O comportamento de tração dos materiais FRP, constituídos por um tipo de material de fibra, é caracterizado por uma relação tensão-deformação elástica linear até a falha, que é repentina e frágil.

As propriedades de tração de alguns tipos de FRP que se encontram no mercado encontram-se na Tabela 3. No entanto, cada fabricante deve determinar e fornecer as propriedades de tração do sistema de FRP em particular.

2.5.2 Comportamento à Compressão

Sistemas de FRP ligados externamente não devem ser usados como reforço de compressão devido à insuficiente existência de testes que permitam validar seu uso neste tipo de situação.

A realização de restes em laminados de FRP utilizados na reparação de betão mostram que a resistência à compressão é menor que a resistência à tensão [Wu 1990].

O modo de rutura para os laminados FRP submetidos à compressão longitudinal podem incluir rutura à tração transversal, micro-curvatura de fibra ou rutura por cisalhamento. O modo de rutura depende do tipo de fibra, a fração de volume da fibra e o tipo de resina.

Resistências à compressão de 55%, 78% e 20% da resistência de tração foi registada para GFRP, CFRP, AFRP, respetivamente (Wu, 1990).

Em geral, as resistências à compressão são maiores para materiais com maior resistência à tração, exceto no caso de AFRP, onde as fibras exibem comportamento não linear na compressão num nível relativamente baixo de tensão.

O módulo de elasticidade compressivo é geralmente menor do que o módulo de elasticidade de tração dos materiais de FRP.

De acordo com informação de relatórios publicados, o módulo de compressão de elasticidade é de aproximadamente 80% para GFRP, 85% para CFRP e 100% para AFRP relativamente ao módulo de tração de elasticidade para o mesmo produto (Ehsani, 1993).

2.6 COMPORTAMENTO A LONGO PRAZO DOS FRP

Como se tem vindo a referir, as propriedades de um sistema de FRP variam de um produto para o outro, em função dos seus materiais constituintes, como o tipo de fibra e de resina utilizados, e a percentagem de cada um na combinação do sistema e a orientação geral das fibras.

Conhecidas as propriedades do produto, é importante saber como é que as mesmas evoluem ao longo do tempo e o que é expectável acontecer ao longo do período de vida útil da estrutura que se reforçou.

Relativamente a esta questão do comportamento a Longo Prazo, é importante realçar o facto de que esta é uma técnica relativamente recente, pelo que as conclusões que podem ser tiradas provêm de um conjunto de informações e relatos de documentos de investigações e testes laboratoriais na área da engenharia civil, bem como de outras áreas que utilizam há mais tempo este tipo de materiais como a aeronáutica e automobilística.

Fatores como a durabilidade, a história de carga e o comportamento ao fogo são as situações mais críticas que podem ser identificadas e que interessam às estruturas de betão. E é a forma como os sistemas de FRP e seus constituintes se comportam mediante estes fatores que determina qual o comportamento destes elementos ao Longo do Prazo.

2.6.1 Durabilidade

A durabilidade é influenciada pelos agentes de origem ambiental, em consequência da natural exposição do sistema FRP à envolvente esperada para a estrutura de betão. Assim, a durabilidade depende da reação do sistema FRP relativamente à *Temperatura, Humidade, efeitos da radiação ultra-violeta e agressões químicas*.

Tendo em consideração tudo o que foi explanado anteriormente relativamente à constituição e propriedades destes materiais e tendo em consideração o que se comprova na bibliografia específica divulgada, torna-se evidente a necessidade de estabelecer requisitos de durabilidade ao nível de projeto utilizando sistemas de FRP.

Facto é que se verifica deterioração na generalidade dos sistemas de FRP. Porém, em termos gerais, os compósitos são mais duráveis no tempo do que os materiais tradicionais, com maior destaque para a melhor resistência global registada nos compósitos que utilizam fibra de carbono CFRP.

2.6.2 História de Carga

Neste campo destacam-se o *comportamento à fluência* e à *relaxação*, e o *Comportamento à fadiga*.

Os compósitos reforçados com fibras, devido às propriedades viscoelásticas do material, podem apresentar comportamentos diferentes à fluência e à relaxação quando sujeitos a ações constantes no tempo. Estas variações de deformação e tensão que ocorrem nos compósitos implicam fundamentalmente alterações na matriz, ao nível das forças internas de ligação.

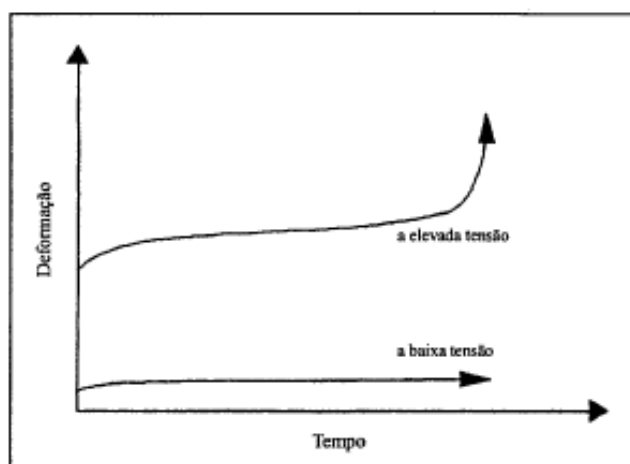


Figura 3- Comportamento à fluência de um FRP a baixas e altas tensões. (Juvandes, 1999)

No que diz respeito à resistência à fadiga, a informação é escassa, porém sabe-se que a ruína por fadiga de um compósito FRP é progressiva, ao contrário do aço, em que surge de forma rápida e no fim de tempo de fadiga estabelecido para o material.

A elevada resistência à fadiga de varões de CFRP foi comprovada após a realização de vários ensaios por (Uomoto et al, 1995).

De uma forma genérica, os resultados obtidos nos ensaios realizados sobre o comportamento à fadiga de laminados ou de mantas de FRP aplicados a reforços colados a estruturas de betão indicam que a resistência à fadiga das estruturas aumenta, ressalvando o facto de que os laminados apresentam maior insensibilidade do que os equivalentes em aço à “corrosão por fricção”.

Posto isso, os resultados obtidos não levam a crer que a resistência à fadiga seja um fator decisivo num reforço, mas sim o comportamento da estrutura de betão armado ou pré-esforçado.

Reforça-se a conclusão de que as propriedades à fadiga de um material compósito são consideravelmente boas quando as solicitações atuam na direção das fibras, mas insuficientes para carregamentos transversais ou de corte.

2.6.3 Comportamento ao Fogo

Tendo em consideração a informação exposta no ponto - Resinas 2.2.3, e a bibliografia publicada sobre o assunto, pode-se afirmar que o comportamento ao fogo poderá ser um ponto crítico na aplicabilidade de sistemas de FRP à construção civil.

Embora se verifique que a maioria dos compósitos não é diretamente inflamável, apresentando um comportamento satisfatório a elevadas temperaturas, devem existir na fase de projeto reservas. A resina utilizada na composição da matriz de um produto de FRP pode comprometer o elemento estrutural onde foi aplicada, quando sujeita a um incêndio durante um certo período de tempo.

Quando a temperatura atinge a temperatura de transição vítrea, o material do sistema de reforço que é mais presumível de falhar é a resina de colagem. Isto porque com as altas temperaturas, a resina passa de um estado vítreo para um estado viscoso, comprometendo toda a resistência do sistema de reforço, colocando em causa a segurança do elemento a reforçar e conseqüentemente da estrutura associada.

Não há, no entanto, estudos suficientes que expliquem o comportamento destes sistemas em situação de incêndio. Diversos regulamentos e normas aconselham desprezar o reforço estrutural de CFRP na resistência total do elemento.

O comportamento ao fogo de estruturas de betão armado reforçadas com CFRP, bem como o desenvolvimento de técnicas e sistemas de proteção estão identificados pela comunidade científica internacional como temas que carecem de maior estudo e detalhe. Registam-se aqui alguns dos sistemas de proteção ao fogo que podem ser utilizados e que têm vindo a ser alvo de estudo e experiências:

- Revestimentos intumescentes – esta solução permite incrementos no tempo de rotura de 30 a 120 minutos. São aplicados normalmente sob a forma de tinta, podendo atingir uma espessura máxima de 5 mm. Para maiores espessuras, podem usar-se revestimentos intumescentes na forma de gel, mantas ou tecido, podendo obter espessuras até 15mm. Há, no entanto, um condicionalismo no uso destas soluções, que é o facto de que estes sistemas intumescentes são ativados (expandem) para valores de temperatura entre 100 °C e 300°C. Por outro lado, o reforço CFRP, que tem no adesivo o ponto mais frágil, apresenta valores de temperatura de transição vítrea entre 50°C e 80°C. Ou seja, este método por si só não será eficaz, no entanto a sua aplicação em simultâneo com outras soluções poderá ter resultados eficazes;

- Revestimentos à base de Vermiculite e Perlite – as rochas de vermiculite e perlite apresentam bom comportamento na presença de temperaturas elevadas, tratando-se de um produto de baixa condutividade térmica. Por isso, os revestimentos à base de agregados destas rochas são úteis na proteção dos elementos ao fogo e podem ser aplicados na forma de argamassa, por projeção ou espátula, sendo as soluções mais utilizadas, podendo ainda ser utilizadas na forma de placas.
- Placas de silicato de cálcio – a sua aplicação é feita com recurso a fixação mecânica, por aparafusamento ou por colagem. O facto de serem submetidas a um processo de autoclave com incorporação de fibra no interior das placas garante uma estabilidade dimensional quando sujeitas a temperaturas elevadas.
- Projeção de fibras minerais – as fibras minerais podem ser utilizadas como principal constituinte de argamassas para proteção de elementos estruturais ao fogo. As fibras são normalmente obtidas a partir de rocha basáltica, sendo corrente a junção de escória de alto-forno para diminuição da massa volúmica da argamassa. A proteção é conferida pelas propriedades isolantes das próprias fibras;
- Mantas de fibras cerâmicas e Placas de lã de rocha – as mantas de fibras são compostas por fibras de sílica e alumina. Estas fibras são dispostas em várias direções, sendo entrelaçadas entre si, o que lhes confere grande flexibilidade e resistência mecânica nas várias direções que se apliquem. Embora sejam incombustíveis, não resistem a temperaturas superiores a 1300 °C, sendo que para valores superiores de temperatura, as suas propriedades isolantes degradam-se rapidamente e as próprias fibras começam a desintegrar-se. Estas mantas apresentam-se sob a forma de rolos e pode apresentar espessuras entre 10mm a 50mm. As placas de lã de rocha são produzidas a partir de rocha basáltica. As fibras que as constituem são dispostas de forma aleatória, procedendo-se depois à sua aglomeração através de resinas termoendurecíveis.

2.7 COMPÓSITOS DE POLÍMEROS DE FIBRAS DE CARBONO (CFRP)

O objeto desta tese é o reforço de estruturas de betão com reforços de Compósitos de Polímeros de Fibras de Carbono (CFRP), concretamente o reforço por colagem exterior de Sistemas de Compósitos de CFRP.

As fibras de carbono são as que apresentam melhores propriedades mecânicas, são as mais resistentes à ação de agentes químicos, imunes à corrosão e não absorvem água. Apresentam alta relação resistência-peso e rigidez, tendo, por isso mesmo, grande aplicabilidade na engenharia civil. As grandes vantagens destes sistemas são em termos de durabilidade, facilidade e simplicidade de aplicação e de excelente desempenho mecânico.

As fibras de carbono são constituídas por duas camadas de átomos de carbono. A sua organização atômica torna-as ortotrópicas, uma vez que as suas propriedades mecânicas variam entre a direção longitudinal e transversal da cadeia de átomos.

No setor da construção, os CFRP apresentam-se divididos em dois grupos:

- os elementos que funcionam à tração (cabos, mantas, laminados e as barras/varões);
- e os elementos que funcionam à flexão (painéis alveolares e os perfis).

No mercado atual existem algumas empresas dedicadas ao fabrico e comercialização de sistemas de reforço de CFRP, nomeadamente a S&P *Clever Reinforcement Company*, entre outras, que têm vindo a desenvolver produtos cada vez mais específicos e orientados para as necessidades da Engenharia Civil, divulgando-os no mercado e publicando recomendações técnicas para a utilização dos seus produtos.

2.7.1 Tipos de Compósitos de CFRP

É possível encontrar no mercado vários sistemas, com diferentes propósitos e funcionalidades.

De uma forma genérica, existem dois tipos opcionais de sistemas FRP ligados externamente: o primeiro tipo consiste em mantas de tecido fibroso saturadas numa resina epoxídica, normalmente designado por Sistemas Curados “In Situ” (“*Wet Lay-up Systems*”); O segundo tipo de sistema consiste no uso de laminados de fibras pré-fabricados (produzidos em fábrica), que são colados à superfície de betão por meio de um adesivo resinoso.

O sistema curado “in situ” é o mais versátil, pois as mantas são mais flexíveis e permitem uma melhor moldagem e adaptabilidade às formas do elemento a reforçar, no local.

Os sistemas FRP, incluindo resina, possuem espessuras entre 3-4mm.

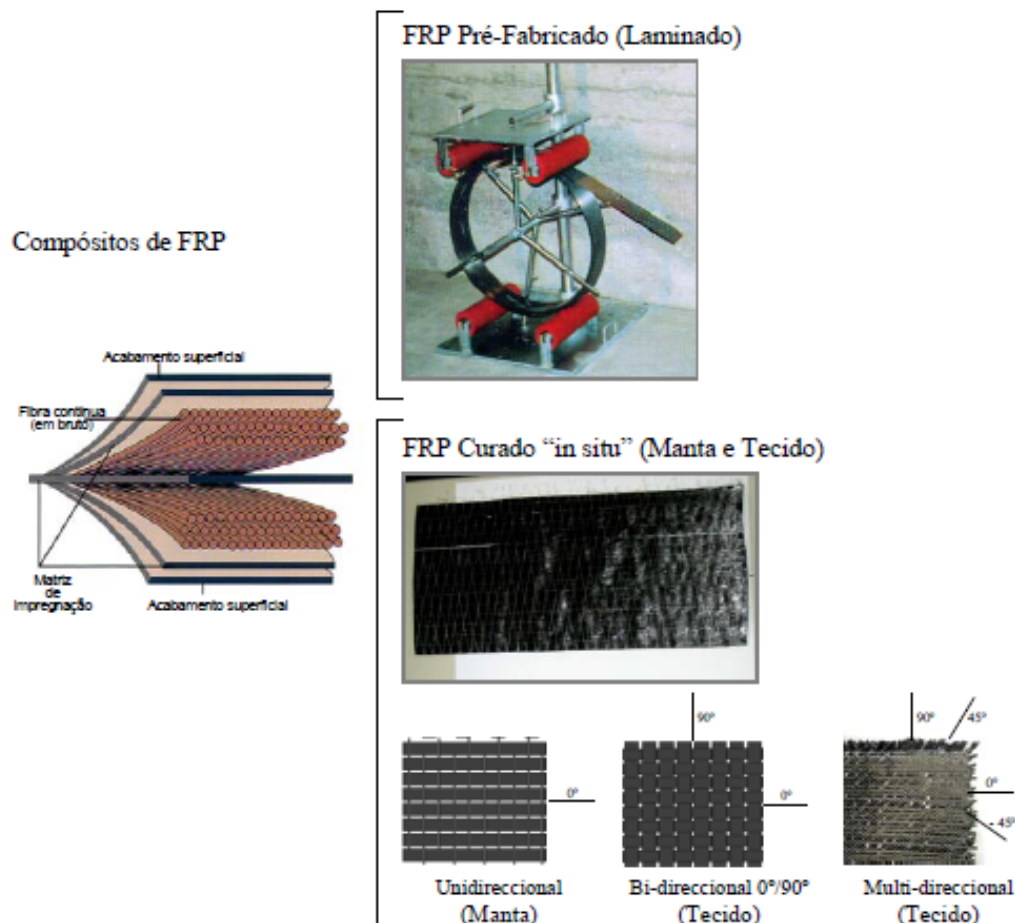


Figura 4- Compósito de FRP -Formas Pré-Fabricada e Curada "in Situ". (Juvandes 2011)

Em geral, a utilização deste tipo de soluções, independentemente da natureza da base, implica o tratamento do suporte onde se vai aplicar este tipo de soluções de reforço.

Há um conjunto de medidas que devem ser tomadas em consideração antes da aplicação do sistema de reforço de FRP, durante e após a aplicação, por forma a garantir ao máximo a eficácia do mesmo, designadamente:

- a avaliação da qualidade de betão da superfície do elemento estrutural a reforçar deve ser efetuada recorrendo a ensaios de tração direta de "pull-off". Para o caso de sistemas curados "in situ" recomenda-se que o betão apresente uma resistência á tração superficial superior a 1,0MPa e para sistemas pré-fabricados, a resistência deve ser superior a 1,5 MPa;
- A superfície deve estar isenta de irregularidades, sendo que se necessário deve ser tratada com argamassas de regularização designadas por "putty". A preparação da superfície implica a remoção de betão degradado, superfícies

irregulares, partículas soltas, arredondamento de arestas (principalmente no caso da utilização de mantas) e eventual reperfilamento da superfície e limpeza, para posterior aplicação do adesivo de colagem e consequentemente do sistema de reforço.

- A base do betão deve estar limpa e seca, e o teor de humidade não deverá exceder os 4%.
- a temperatura do ar deve ser, no mínimo de 10°C e pelo menos 3°C acima do ponto de orvalho (condensação/vapor de água);
- é recomendado a fixação de um limite superior para a amplitude térmica esperada numa aplicação normal da construção [T_c] de valor igual ao da temperatura de transição vítrea [T_g] das resinas ou dos adesivos, reduzido de 10°C a 20°C [$T_c \cong T_g - 10^\circ\text{C}$ (a 20°C)];
- As recomendações dos fornecedores relativamente aos produtos em si e à sua aplicação devem ser estritamente respeitadas;
- Deve ser respeitado o tempo prático de utilização (“pot-life”) das resinas e adesivos;
- Na aplicação do sistema de manta deve ser garantido o alinhamento das fibras e deve evitar-se a formação de bolhas de ar;
- Após a colagem do laminado, deve verificar-se, através de pancadas suaves, que não existem vazios entre o adesivo e o laminado;

2.7.2 Laminados

Os Laminados de fibra de carbono para reforço estrutural, são pré-fabricados (pultrudidos), são a forma mais corrente a nível comercial de polímeros reforçados com fibras de carbono para reforço estrutural de betão armado, alvenaria, aço ou madeira.

Este sistema resulta da impregnação de um conjunto de feixes de fibras contínuas (com orientação unidirecional) por uma resina termoendurecível, consolidados por um processo de pultrusão com controlo de espessura e da largura.

Existem duas técnicas possíveis de instalar estes elementos laminados:

1. Aplicados externamente - EBR (*Externally Bonded Reinforcement*) – consiste na colagem do laminado na superfície do elemento a reforçar;

2. Inseridos na estrutura - NSM (*Near Surface Mounted*) - o laminado é inserido e colado no interior da estrutura a reforçar, numa ranhura previamente executada. Esta solução apresenta vantagens relativamente à primeira, pois carece de menor trabalho na preparação da superfície de betão, favorece a aderência do elemento à superfície, com menor propensão ao descolamento, e neste caso, o elemento de reforço fica também mais protegido e inacessível a eventuais danos fortuitos, incêndios e vandalismo;



Figura 5- Laminado de CFRP (Catálogo S&P C-Laminate)



Figura 6- Exemplo de aplicação de laminados em lajes pela técnica EBR (Manual de Aplicação S&P C-Laminate)



Figura 7- Exemplo de aplicação de laminados em viga, pela técnica NSM (Catálogo S&P C-Laminate)



Figura 8- Exemplo de aplicação de laminados em pilar, pela técnica NSM (Catálogo S&P C-Laminate)

Os laminados aplicados externamente possuem espessuras entre 1,2 e 1,4 mm e larguras entre 50-150mm.

A escolha da secção de laminado depende do dimensionamento e da relação custo-benefício.

Normalmente, os laminados de CFRP são usados principalmente para o aumento de resistência à flexão.

No caso de reforço de vigas é por vezes necessário o recurso a cintas exteriores com ancoragem na parte superior ou inferior da laje, de forma a estabelecer a ligação entre a tração exterior e a treliça teórica no interior dos elementos.

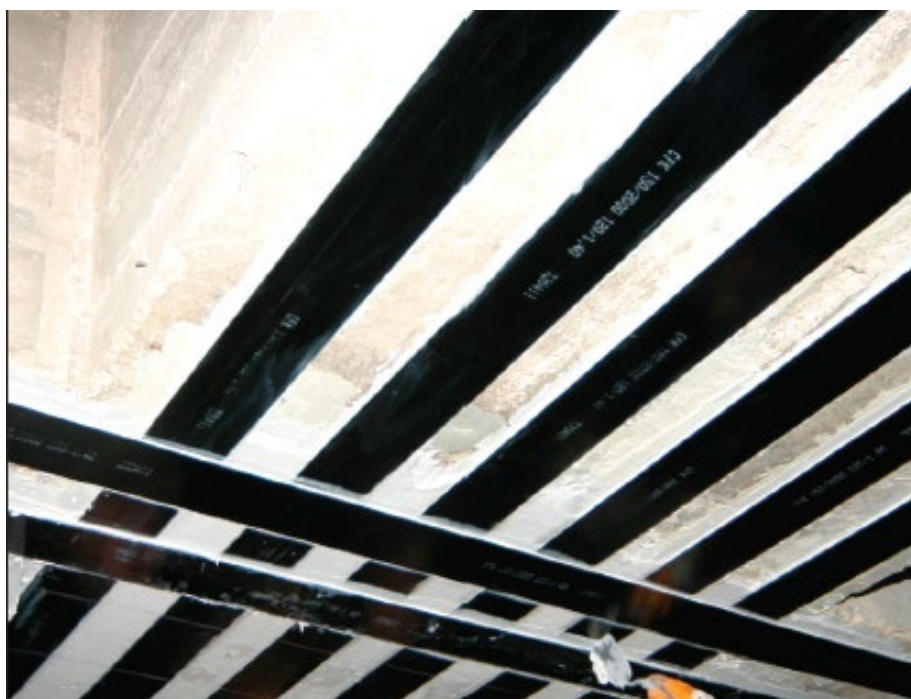


Figura 9- Exemplo de aplicação de laminados cruzados e sobrepostos em lajes, pela técnica EBR (Catálogo S&P C-Laminate)

Os laminados apresentam um vasto campo de aplicabilidade:

- no reforço de estruturas que apresentem redução de diâmetro das armaduras, originada pela corrosão do aço da armadura interna.
- Pode ser usado no reforço de estruturas que apresentem envelhecimento dos materiais, ou até em situações de anomalias originadas por incêndios, sismos, impactos diretos, etc.
- Têm aplicação em tectos ou até mesmo em superfícies inclinadas e apresentam bom comportamento à fadiga, promovendo a redução de aberturas

de fissuras, a redução de flechas e tensões, bem como a redução da fadiga no aço, promovendo assim a durabilidade da estrutura.

A grande vantagem que este tipo de soluções tem vindo a mostrar é a sua capacidade de adaptabilidade.

Nem sempre é possível utilizar apenas a colagem adesiva para a fixação destes elementos à estrutura, ou por questões de comprimento ou por fraca qualidade na superfície de betão existente (substrato admissível de classe C12/15). Para estes casos há a solução de ancoragens específicas para estes laminados, podendo ser adaptadas à situação em causa.

Estes sistemas, com ancoragem, têm como objetivo potenciar a tensão de aderência dos laminados CFRP aplicados externamente.



Figura 10- Exemplo de elemento de CFRP laminado com sistema mecânico de ancoragem na extremidade (Catálogo S&P C-Laminate)

Outra variação desta solução, já comerciável, é a possibilidade de executar reforços com elementos laminados CFRP, mas, pré-esforçados.

Esta solução tem como objetivo minimizar a deformação existente. Permite fechar fissuras existentes no betão, aliviar tensões de tração nas armaduras e/ou tensões de compressão no betão.



Figura 11- Exemplo de elemento de CFRP laminado, com sistema de pré-esforço (Catálogo S&P C-Laminate)

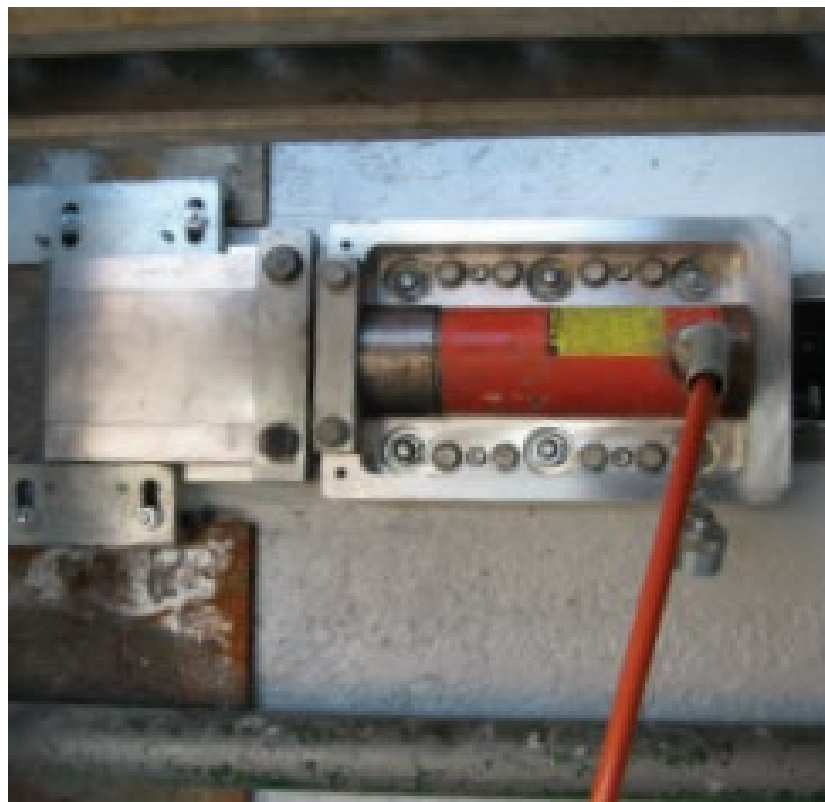


Figura 12- Exemplo de elemento de CFRP laminado com sistema de pré-esforço (Catálogo S&P C-Laminate)

As características mecânicas e físicas dos laminados devem ser garantidas pelo fabricante, tendo por base os respetivos ensaios e planos de controlo de qualidade.

O volume de fibras no compósito laminado está entre 65 a 75% do volume do laminado, sendo as características mecânicas em geral baseadas na área bruta da secção transversal da lâmina.

Conhecendo a percentagem de volume de fibras (V_f) e as propriedades mecânicas das fibras (f) e da matriz (m), é possível estimar as propriedades da lâmina (l) na direção longitudinal, usando a “Regra da Mistura” (desprezando a contribuição da matriz):

$$f_l \cong V_f \cdot f_f + (1 - V_f) \cdot f_m \cong V_f \cdot f_f \quad (1)$$

$$E_l \cong V_f \cdot E_f + (1 - V_f) \cdot E_m \cong V_f \cdot E_f \quad (2)$$

Nas respetivas Fichas Técnicas dos produtos FRP deve constar, de forma bem explícita e devidamente homologada, a espessura, a largura, o módulo de elasticidade, a tensão e a deformação na rutura do laminado (produto final). Obtida esta informação poderá ser possível calcular a força nestes sistemas através da seguinte equação:

$$F_f = f_f \cdot A_f = E_f \cdot \varepsilon_f \cdot n_f \cdot b_f \cdot t_f \quad (3)$$

2.7.3 Mantas

Trata-se de uma manta de fibra de carbono unidirecional de alto módulo, de baixa extensão e de elevada resistência. São estes os chamados Sistemas Curados “in Situ” que efetivamente são feixes de fibras contínuas em forma de fios, designados por “Mantas” (“Sheets”) ou de “Tecidos” (“Fabrics”) em estado seco ou pré-impregnado.

No processo de fabrico das mantas, os feixes de fibras são agrupados, alinhados e esticados, introduzidos numa prensa, em simultâneo com a tela impregnada com quantidades mínimas de resina e com um plástico de proteção. O compósito forma-se com a adição da resina às mantas durante a aplicação.

Nos tecidos, as fibras, depois de alinhadas, são entrelaçadas como que num tear, não sendo neste caso necessário a junção da tela impregnada. Tal como nas mantas, o compósito forma-se com a adição da resina aos tecidos durante a aplicação.



Figura 13- Exemplo de tecido de fibra de carbono. (catálogo Clipcarbono)

Normalmente, as mantas são fornecidas em rolos com várias larguras, (0,30m, 0,6m ou 1,0m) e são aplicadas na estrutura que se pretende reforçar usando resina epoxídica.

À semelhança dos laminados, este material tem como objetivo o reforço de estruturas de betão armado, alvenaria e madeira para reforço à flexão, corte e compressão axial.

Este tipo de elemento utiliza-se na cintagem de pilares e paredes, para o aumento da resistência e da ductilidade. Esta solução melhora o confinamento e constitui-se como reforço ao esforço transversal.

Os tecidos e mantas de carbono são também aplicáveis no reforço ao corte de vigas de secção retangular ou em “T”.

Pode também ser utilizado para substituição de armaduras corroídas ou inexistentes.

Estes elementos são flexíveis e podem ser utilizados mesmo em superfícies curvas, no reforço de pilares, silos, chaminés, paredes, tetos abobadados.



Figura 14- Exemplo de aplicação de manta de CFRP no reforço de um monumento (Juvandes, 2011)

O processo de aplicação permite a aplicação de camadas sobrepostas de mantas, por forma a se obter a área de fibra necessária para o reforço de uma determinada secção ou elemento. A secção transversal do sistema FRP é obtida pelo produto da área de fibras da manta (espessura (t_f) x largura (b_f)), garantida pelo fabricante, vezes o número de camadas utilizadas (n_f). O módulo de elasticidade (E_f), e a resistência (f_f) são as correspondentes às fibras utilizadas.

$$A_f = n_f \cdot b_f \cdot t_f \quad (4)$$

Tratando-se de Sistemas de Cura “in situ”, a informação proveniente do fabricante, no que diz respeito a espessura, largura, módulo de elasticidade, tensão e deformação na rutura não se referem ao produto final, mas unicamente à fibra. Isto porque o produto final só é obtido após o tempo de cura.

No caso das mantas e tecidos, o cálculo da força nestes sistemas é feito usando uma espessura equivalente, $t_{f,eq}$, sugerida nas fichas técnicas do produto e o valor secante do módulo de elasticidade para atender ao facto de que, inicialmente, nem todas as fibras estão devidamente orientadas:

$$F_f = f_f \cdot A_f = E_{fk} \cdot \varepsilon_f \cdot n_f \cdot b_f \cdot t_{f,eq} \quad (5)$$

$$t_{f,eq} = \frac{\text{peso}}{\gamma_f} \quad (6)$$



Figura 15- Exemplo de manta em CFRP (Manual de Aplicação S&P C-Sheet 640)



Figura 16- Exemplo de manta em plinto de aparelho de apoio de obra de arte (Ficha Técnica/catálogo S&P – C-Sheet 240)

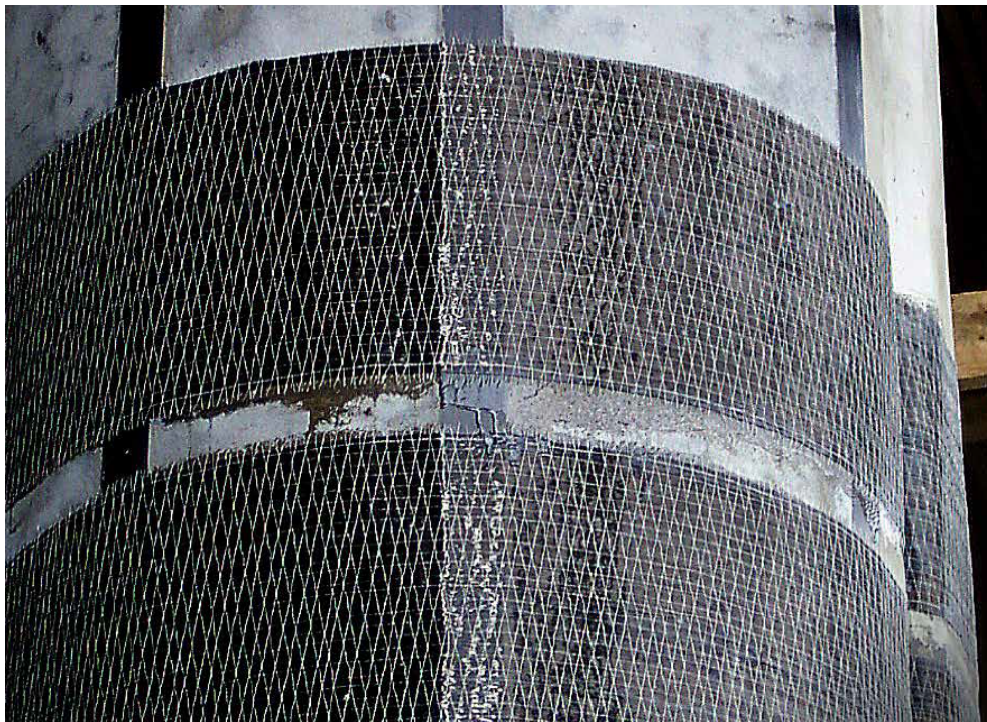


Figura 17- Exemplo de manta em CFRP aplicada em pilar, em complemento de laminados de CFRP (Ficha Técnica/catálogo S&P – C-Sheet 240)



Figura 18- Exemplo de aplicação de manta em CFRP, aplicada em viga (Ficha Técnica/catálogo S&P – C-Sheet 240)



Figura 19- Exemplo de manta em CFRP, aplicada em vigas (Manual de Aplicação S&P – C-Sheet 240)



Figura 20- Exemplo de manta em CFRP aplicada em vigas (Ficha Técnica S&P C-Sheet 640)

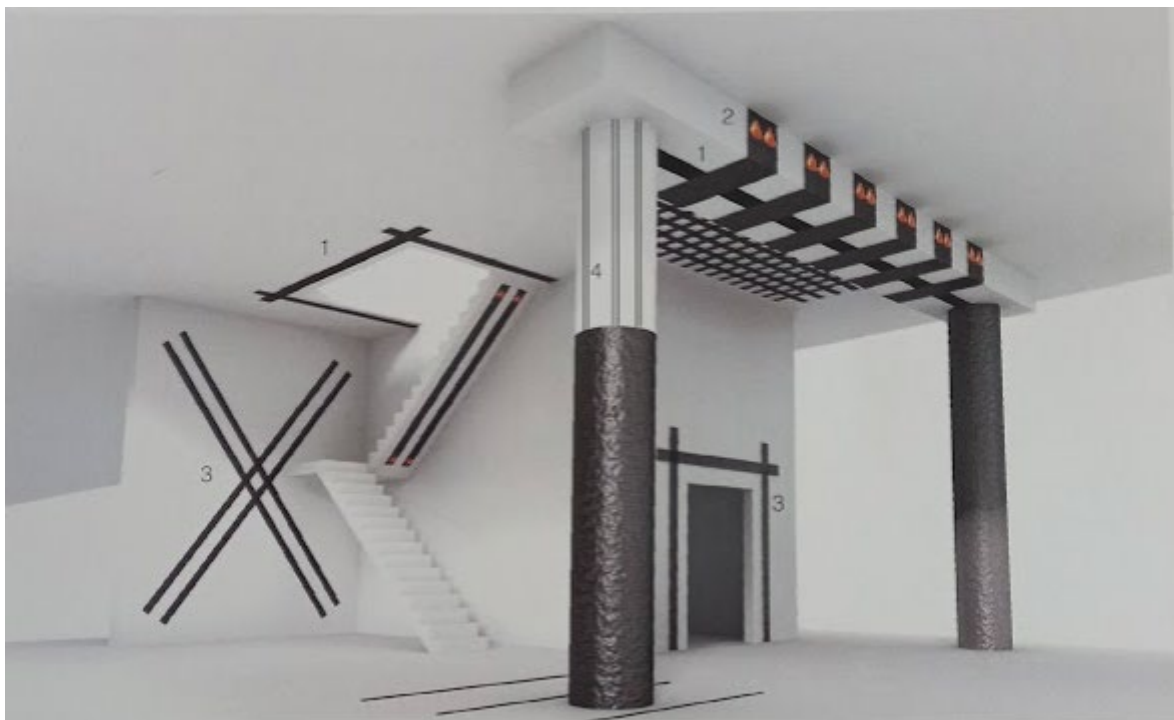


Figura 21- Soluções de reforço (Catálogo – Reforço estrutural com compósitos em fibra S&P FRP SYSTEMS)

Apresenta-se na Figura 21 um esquema exemplificativo de soluções tipo, de reforço com sistemas de compósito para várias soluções possíveis:

- 1- Laje - Reforço à flexão;
- 2- Viga - Reforço ao corte através de mantas/tecidos de carbono;
- 3- Parede resistente – aumento de capacidade de carga, rigidez ou resistência à tração;
- 4- Pilar – confinamento total; possibilidade adicional de inserir laminados

Mediante a solicitação, ou tipo de esforço em causa de cada elemento, os vários tipos de compósito selecionam-se, resumidamente, da seguinte forma na Tabela 8.

	LAJE	VIGA	PAREDE RESISTENTE	PILAR
Laminados aplicados externamente (EBR)	Flexão	Flexão	Tração	-
Laminados inseridos (NSM)	Flexão	Flexão	Tração	Encurvadura
Laminados pré-esforçados	Flexão/Deformação	Flexão/Deformação	Tração	-
Mantas	-	Corte	Corte	Confinamento

Tabela 8- Soluções do Sistema de reforço [baseado em Reforço estrutural com compósitos em fibra S&P SYSTEMS]

3 DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS CFRP

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Tal como já referido neste documento, o reforço de estruturas de betão armado utilizando compósitos reforçados com polímeros de fibras de carbono é uma técnica relativamente recente, sobre a qual não há ainda uma bibliografia normativa específica e devidamente comprovada. O que existe são publicações, propostas de normas, documentos e relatórios, publicados em função das investigações e estudos que se vão realizando um pouco por todo o mundo, como resultado do crescente interesse e aplicabilidade desta técnica.

Os requisitos adotados para o dimensionamento de reforços utilizando elementos de CFRP, quer em termos estruturais, quer em termos de segurança, tem como base os requisitos e as normas existentes para soluções de reforço clássicas, como o uso do betão armado ou o uso de chapas coladas.

Resumidamente, o dimensionamento dos sistemas de reforço através de compósitos de CFRP deve ter em conta:

- a compatibilidade entre os materiais – existência de equilíbrio entre as propriedades físicas, químicas e eletroquímicas, bem como das dimensões, entre o material de reforço e o material a reforçar, neste caso o betão; (EMMONS, P.H., VAYSBURD, *Vol. 10*, Elsevier, 1995). A compatibilidade é um requisito sempre importante num sistema de reforço, mas neste caso, em que as cargas e tesões são maioritariamente transmitidas através de aderência nas interfaces, este fator ganha maior importância no sucesso do sistema;
- a durabilidade do sistema, com a avaliação e análise de todos os fatores que a possam influenciar, propriedades dos materiais, condições ambientais, qualidade do substrato, condições de aplicação do sistema, qualidade da mão-de-obra;
- Requisito ao nível do material adesivo: boas características de trabalhabilidade, boa aderência ao substrato e ao compósito e capacidade de garantir temperaturas vítreas elevadas, boas características mecânicas por forma a garantir de forma eficiente a transmissão de cargas;
- Requisitos ao nível das Fibras: estas devem apresentar boa resistência a ações corrosivas, elevada resistência mecânica (especialmente tensões de tração); deformação de rotura apropriadas às necessidades; resistência à fadiga; estabilidade dimensional; boa resistência a ações químicas (reações alcalinas, ...);

- Requisitos ao nível do betão (superfície base): por forma a garantir uma boa transmissão de tensões entre o sistema de reforço e a superfície a reforçar é preciso garantir a resistência do elemento base, pelo que é prática considerar que o reforço com compósitos deve ser utilizado em betões com resistência a tensões de tração superior a 1,5 MPa. A integridade da superfície base em betão também deve estar garantida pelo que situações de delaminação, fissuras, fenómenos de exsudação devem ser previamente tratados e reparados. Para o tratamento e reparação de estruturas em betão a norma EN1504 (2004) reúne informação necessária de métodos e requisitos a ter em conta.

Tratando-se então de uma análise semelhante ao reforço com uso de técnicas convencionais, o dimensionamento de reforços com compósitos CFRP utiliza também o mesmo conceito de combinações de ações – Estado Limite Último, Estado Limite de Utilização ou Situações Acidentais, bem como os mesmos regulamentos já utilizados – os Eurocódigos.

Porém, o facto de que estas novas técnicas de reforço com compósitos introduzem novos materiais, a existência de possíveis novas situações de rotura e as diferentes formas de aplicabilidade destes sistemas, fazem com que seja urgente a existência de normas e regulamentos mais específicos, pois os existentes revelam-se insuficientes.

Este capítulo aborda, de uma forma genérica, o preconizado na Norma EN1504, no que à reparação e reabilitação em geral diz respeito. E pretende reunir um conjunto de informação relativa ao dimensionamento de reforços de estruturas de betão armado com compósitos de CFRP, retiradas de pesquisa feita sobre publicações, relatórios de investigações, e documentos orientativos, que têm vindo a ser publicados sobre a matéria. Pretende-se assim sintetizar o que deve ser tido em conta, avaliado e calculado numa situação de reforço de uma estrutura com uso a compósitos de CFRP.

3.2 PROTECÇÃO E REPARAÇÃO DE ESTRUTURAS E BETÃO- NORMA EN 1504

A Norma EN 1504 (2004) reúne a informação sobre os produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão. A norma está dividida em 10 partes, destacando-se a nona parte por conter os princípios gerais para o uso dos produtos e sistemas. O objetivo e as definições da norma estão expostos na primeira parte. Nas partes 2 a 7 são referidos os produtos e sistemas que permitem cumprir os princípios e métodos seleccionados de reparação e/ou reforço, com identificação e estabelecimento de valores para as propriedades relevantes em função do tipo de

aplicação. As partes 8 e 10 tratam da avaliação da conformidade e da aplicação e controlo da qualidade (Ribeiro et al, 2000).

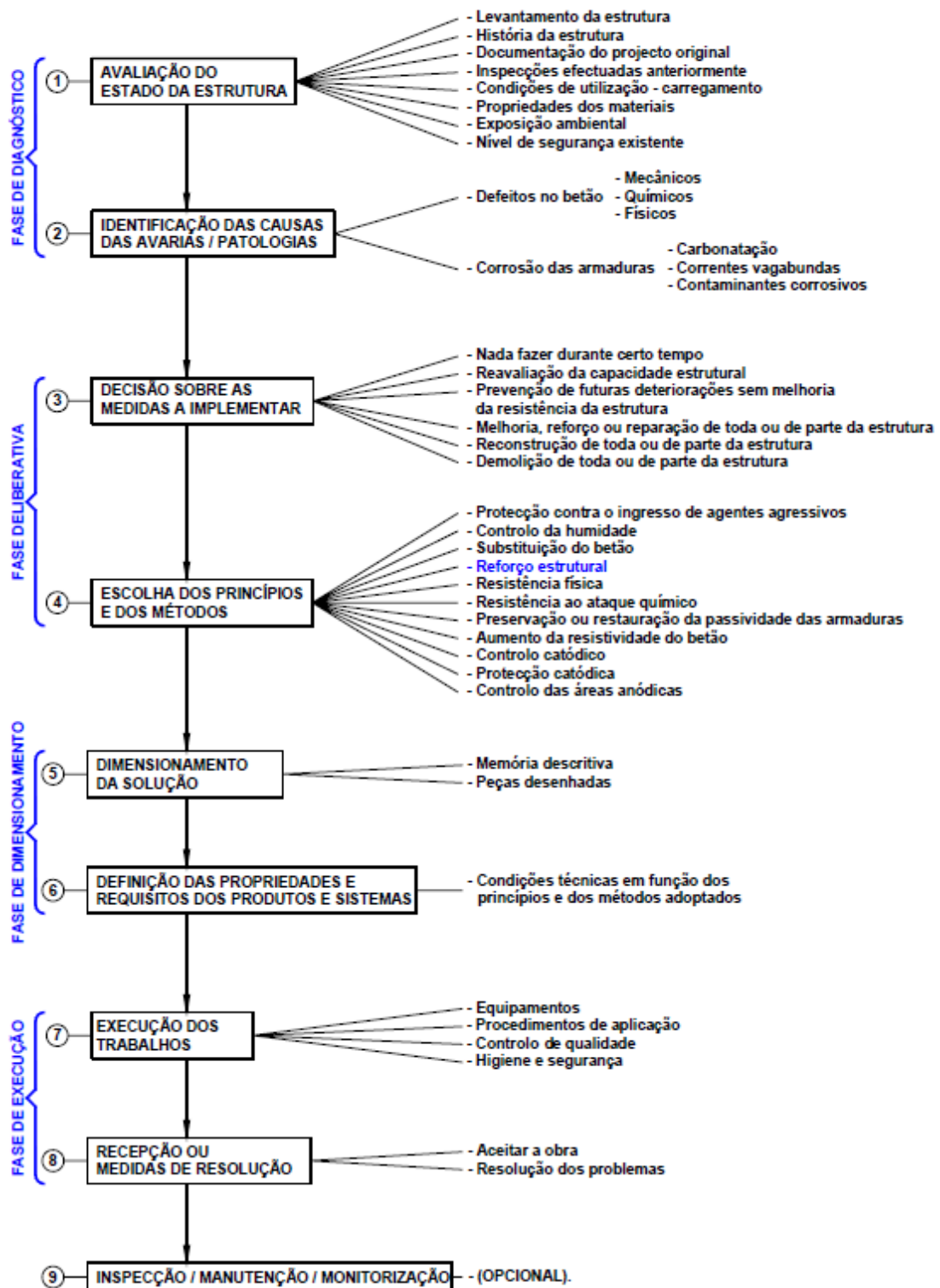


Figura 22- Etapas principais dum processo de reparação/reforço de uma estrutura de betão. (Silva, 2008)

O esquema anterior, apresentado por (Silva, 2008), esquematiza as várias fases dum processo de reparação, com base na Norma 1504: Fase de diagnóstico, fase deliberativa, fase de dimensionamento e fase de execução, cada uma delas composta pelas principais ações.

A **fase de diagnóstico** contempla duas ações importantes, a 1 e a 2, de avaliação e recolha de dados relativos às patologias existentes, que permitam fazer a melhor avaliação possível da situação por forma a identificar as medidas a implementar.

Terminada a fase de diagnóstico, avança-se para a fase de tomada de decisões sobre as medidas a adotar – **fase deliberativa**. Esta fase contempla as ações 3 e 4, que se traduzem na decisão sobre as medidas a implementar, a escolha dos princípios e dos métodos. A escolha das medidas a adotar, ação 3, depende de vários fatores, nomeadamente do uso pretendido e do tempo de vida útil da estrutura, das características de desempenho pretendidas (incluindo a resistência ao fogo), do desempenho da reparação previsto a longo prazo, da disponibilidade para efetuar reparações, do número e do custo dessas reparações e respetiva manutenção da estrutura, das propriedades e métodos possíveis de preparação do substrato existente, da estética da estrutura reparada, do processo de distribuição de cargas durante e após a reparação, das consequências do colapso da estrutura, dos requisitos de higiene e segurança na utilização da estrutura, das condições futuras de exposição ambiental da estrutura e da necessidade de proteção ambiental da mesma.

Tomada a decisão de reparar a estrutura, será necessário selecionar os princípios adequados à reparação escolhida, objetivo da ação 4. Para cada um dos princípios da ação 4 associam-se diversos métodos/ técnicas de os concretizar, especificados na norma EN 1504 e são também referidos os produtos e sistemas que permitem concretizar os princípios e os métodos selecionados, com identificação das propriedades relevantes para todos os tipos de aplicação, bem como o estabelecimento de valores para essas propriedades.

Escolhidos os métodos/técnicas adequados às condições da estrutura, entra-se na **fase de dimensionamento**. Esta fase envolve a ação 5 – dimensionamento da solução, em que se define a solução a adotar em peças escritas – Memória Descritiva e se pormenoriza em peças desenhadas e termina com a ação 6 – definição das propriedades e requisitos dos produtos e sistemas a utilizar.

A última fase corresponde à **fase de execução** da solução e engloba as ações e 7 e 8. Procedesse então à execução dos trabalhos propriamente ditos, em que o construtor deve seguir o preconizado em caderno de encargos, mediante o uso de equipamentos definidos, seguindo os procedimentos de aplicação estabelecidos em projeto, bem como o respetivo controlo de qualidade da execução e requisitos de higiene e segurança.

Após a conclusão desta ação 7, segue-se a ação 8, que é o momento de receção da obra, ou eventuais tomada de medidas de solução, caso a obra seja rejeitada, ou parcialmente aceite.

Em alguns projetos pode ainda ser pertinente a implementação da última fase – **Inspeção/manutenção/monitorização**, que se traduz no estabelecimento de critérios e definição de um plano de monitorização do comportamento em serviço da estrutura reparada.

3.3 REGULAMENTAÇÃO E NORMAS

Os critérios de dimensionamento e os procedimentos de construção de reforços com colagens de sistemas de FRP são vagos e dispersos. Isto acontece, principalmente, porque se trata de uma técnica relativamente recente, pela diversidade de formas dos produtos, os seus diversos campos de aplicação, e a divergência nas aplicações, quanto aos seus objetivos.

Mesmo a reparação de estruturas de betão é uma área em que há escassez de informação no que diz respeito às Normas em vigor e a informação que existe sofre constantes atualizações ao longo do tempo.

A nível mundial, nota-se grande interesse e participação no desenvolvimento desta matéria do reforço através do uso de compósitos, por parte de investigadores e organizações. Mas destaca-se o envolvimento destas três potências: o Japão, mais direcionado em alternativas de pré-esforço por pré-tensão e no reforço de estruturas aos sismos; A América do Norte, mais interessada pelas soluções de problemas de durabilidade de pontes; e a Europa, mais voltada para a necessidade de preservar e reabilitar o edificado existente.

Na América do Norte, tanto os estados Unidos, através do *American Concrete Institute (ACI)*, como o *Canadá*, através do *Intelligent Sensing for innovative Structures (ISIS)*, apresentaram documentos normativos para o dimensionamento de sistemas de reforço de compósitos de FRP colados exteriormente a estruturas de betão armado.

O ACI, através do seu grupo de investigadores na área dos compósitos de FRP – Comité 440 lançou em maio de 2002 a publicação intitulada “Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for Strengthening concrete structures” (2002).

Em 2001 o ISIS publicou em setembro o Manual de Dimensionamento n.º 4, intitulado “Strengthening Reinforced Concrete Structures with Externally-Bonded Fiber Reinforced Polymers) (ISIS,2001). A filosofia de dimensionamento apresentada nesta publicação baseia-se no código americano do ACI com pequenas diferenças. (Azevedo, 2008)

O comité do betão da *Japanese Society of Civil Engineers* (JSCE) formou em 1989 um grupo de investigação para a área do reforço de estruturas com sistemas de FRP com o apoio da *Association of Composite materials using Continuous fiber for Concrete Reinforcement* (CCC). Em 1992 este grupo publicou uma compilação sobre o estado do conhecimento, baseado no trabalho realizado até então, intitulado “*Application of Continuous Fiber Reinforcement Materials to Concrete Structures*” (JSCE,1992). (Azevedo, 2008)

Em setembro de 1997 apresentou-se a versão inglesa de um documento publicado em 1996, que se designou “*Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures using Continuous Fiber Reinforcing Material*” (*Concrete Engineering Series* 23). Este trabalho apresenta recomendações para o projeto e a aplicação em obra, ensaios normalizados, especificações e dados necessários para o uso de materiais compósitos FRP. (Azevedo, 2008)

Na sequência do surgimento de várias publicações, que emergiram após um violento sismo que abalou a cidade de Kobe em 1995, que afetou em grande escala as estruturas e que levou as autoridades a investirem na área dos sistemas compósitos de FRP como parte integrante da estratégia para o reforço sísmico das estruturas, a JSCE publicou em 2000 um documento intitulado “*Recommendations for Upgrading of Concrete Structures with Use of CRFP sheet*”. Este documento tinha como objetivo uniformizar as várias propostas de dimensionamento e torna-las abrangentes. Este documento da JSCE inclui ainda recomendações sobre o manuseamento, transporte, armazenamento e aplicação em obra, assim como, o tipo de ensaios a que os materiais que compõem o sistema compósito devem estar sujeitos. (Azevedo, 2008)

Em setembro de 1999, a *Japan Building Disaster Prevention Association* (JPDPA) publicou um documento intitulado “*Seismic Retrofitting Design and Construction Guidelines for Existing Reinforced Concrete (RC) Buildings with FRP Materials*”. Este documento da JPDPA fornece informação sobre as características dos materiais de FRP habitualmente usadas no Japão assim como especificações sobre o manuseamento e aplicação, inclui ainda, recomendações para o dimensionamento e disposições construtivas com especial ênfase para o reforço ao corte de pilares e vigas e para o detalhe da amarração. (Azevedo, 2008)

No que diz respeito à investigação desenvolvida sobre esta matéria na Europa: em Dezembro de 1996, o *Comité Euro-International du béton* (CEB), formou um grupo de trabalho com o objetivo principal de elaborar critérios de dimensionamento para o reforço de estruturas com sistemas compósitos de FRP, respeitando o formato do CEB-FIP *Model Code* (1993), e do Comité Europeu de Normalização (CEN) 1991 – Eurocódigo 2 (EC2). Após a fusão do CEB e da *Fédération Internationale de la Précontrainte* (FIP) originando a *Fédération Internationale du Béton* (*fib*) 1998, este grupo de trabalho passou a designar-se FIB task group 9.3 – *FRP Reinforcement for*

concrete structures in Commission 9 Reinforcing and Prestressing Materials and Systems. Deste grupo de trabalho fazem parte representantes das principais universidades europeias, institutos de investigação e indústrias com grande interesse na área do reforço e estruturas de betão armado com materiais compósitos de FRP, assim como representantes do Canadá, dos EUA e do Japão. Deste trabalho em conjunto, resultou em 2001 a publicação de um relatório técnico designado “*Bulletin 14 – Externally bonded FRP reinforcement for RC structures* (2001), que fornece critérios de dimensionamento para a utilização de reforços de FRP colados exteriormente a elementos de betão armado, recomendações para aplicação em obra e critérios de controlo de qualidade. Este documento é apenas uma proposta normativa, apresentando expressões e procedimentos que precisam de revisão. (Azevedo, 2008)

Em dezembro de 1996, o CEB estabeleceu um grupo de trabalho cujo objetivo principal era a elaboração de um guia orientativo para o uso de reforços de FRP em concordância com o formato do estabelecido no CEB-FIP “*Model Code*” e Eurocódigo 2. Com a fusão do CEB e FIP na *fib* em junho de 1998, este grupo de trabalho passou a designar-se como *fib* TG 9.3 FRP Reinforcement for concrete structures in Commission 9 Reinforcing and Prestressing Material and Systems. Finalmente, como resultado da reestruturação da comissão do grupo de trabalho da *fib* no final de 2014, este passou a designar-se como *fib* T5.1 FRP Reinforcement for concrete structures, presidido por Stijn Matthys da Universidade da Gante (Bélgica), na Comissão 5 Reforços.

O trabalho do TG 9.3 formado e do atual T5.1 foi organizado em dois grupos de trabalho (WP), um dos quais “Externally Applied Reinforcement” (EAR), que produziu o *fib Bulletin 14* “Externally bonded FRP reinforcement for RC structures” em julho de 2001. Após alguns anos de pouca atividade, o grupo de trabalho sobre externally applied reinforcement foi reativado e iniciou-se uma atualização do *Bulletin 14*. O resultado deste trabalho está sumarizado no documento, *fib Bulletin 90*, cujo objetivo é fornecer um guia para o uso de reforços de FRP aplicados externamente (tanto colados externamente como inseridos em ranhuras) em estruturas de betão. Foi feita uma tentativa de apresentar alguns dos tópicos num formato compatível com o Eurocódigo, de modo a que o material abordado possa formar uma base para a introdução dos compósitos na próxima versão do Eurocódigo 2 e para a atualização do texto sobre adaptação sísmica de estruturas com compósitos na próxima versão do Eurocódigo 8.

Em Portugal, há três centros de investigação: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Instituto Superior Técnico (IST) e Universidade do Minho (UM) que têm vindo a estudar os vários aspetos associados aos projetos de reforço com sistemas de FRP como mostram as publicações de Nsambu (1997), Juvandes (1999), Azevedo et al. (2005), Travassos (2005), Barros (2000) e Silva (2008). Como ainda não existe regulamentação nacional específica nesta matéria, os

investigadores portugueses adotam as propostas normativas internacionais que consideram mais adequadas à situação e problema em análise. (Azevedo, 2008)

Como definição de critérios de dimensionamento e procedimentos adicionais de verificação de segurança para projetos de reforço e/ou reabilitação de estruturas, destacam-se ainda as seguintes publicações:

- a) Documentos de homologação alemães do *Deutches Institut für Bautechnik (DIBt)* para sistemas laminados pré-fabricados de CFRP: Nr.Z-36.12-29 (1997) e NrZ-36.12-54 (1998);
- b) Documentos da *Swiss Society of Engineers and Architects (SIA)*: (D0128, 1995; D0144, 1997);
- c) Relatórios técnicos da *Concrete Society da Grã-Bertanha: Technical Report 55 (2000) e Technical Report 57 (2003)*;
- d) Documento do *Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR): Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures (2004)*.

3.4 COMPORTAMENTO DE VIGAS REFORÇADAS À FLEXÃO

O comportamento genérico da deformação das vigas de betão armado reforçadas à flexão com FRP, quando sujeitas a uma força, é semelhante ao comportamento de vigas em betão armado comuns e pode ser sucintamente descrito da seguinte forma:

- Num primeiro instante obtém-se um regime elástico de resposta da estrutura. Este regime prolonga-se até ao momento em que a resistência à tração do betão nas fibras extremas, é atingida – momento em que se dá o fenómeno da fendilhação, resultando na primeira quebra de rigidez do elemento;

- O fenómeno a seguir é caracterizado pelo comportamento elástico das armaduras ordinárias longitudinais. O betão existente na área tracionada dos elementos deixa de ser responsável pela transmissão das tensões, pelo que estas são equilibradas unicamente pelas armaduras e pelo material compósito do reforço;

- No instante seguinte, as armaduras ordinárias entram no patamar de cedência, originando a segunda quebra na rigidez global do elemento. Esta situação resulta numa sequência de deslocamentos de maior amplitude para os mesmos intervalos de carga. A partir deste momento as deformações no elemento deixam de ser recuperáveis e dada a amplitude das mesmas, podem surgir os primeiros problemas ao nível da interface entre o reforço e a superfície de betão;

- Por último, o betão atinge a máxima resistência à compressão e a rotura do sistema de reforço pode acontecer antes do esmagamento do betão, dependendo diretamente

as propriedades das interfaces, bem como das características e propriedades dos elementos constituintes.

Independentemente do aumento da rigidez do elemento de reforço compósito, o primeiro e o segundo fenómeno de ocorrências são semelhantes, independentemente se o tipo de reforço é convencional ou por compósitos.

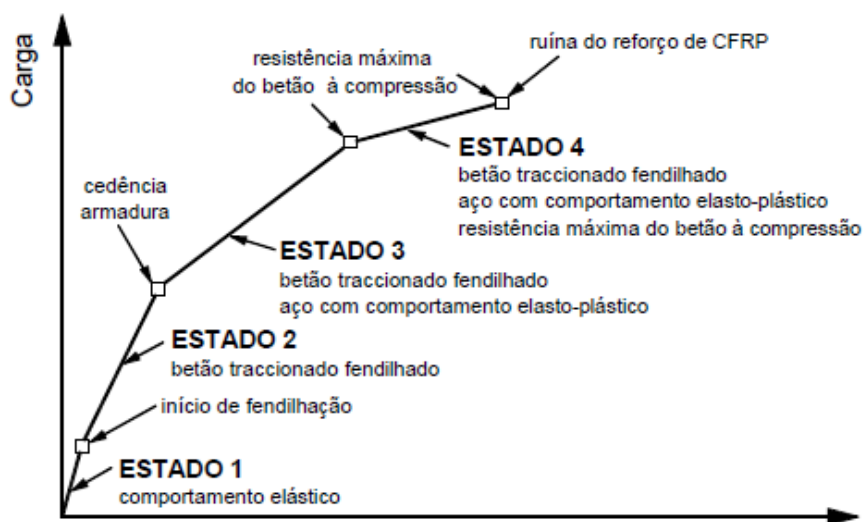


Figura 23- Relação multilinear carga-deslocamento central em vigas reforçadas (Ross et al, 1999)

3.4.1 Estado Inicial

O efeito da carga inicial antes do reforço deve ser considerado no cálculo do elemento a reforçar. A não ser que todas as cargas (peso próprio e/ ou forças pré-esforço incluídas) num elemento sejam removidas antes que o reforço FRP seja aplicado, a face a reforçar já se encontra com deformações. Estas extensões devem ser consideradas como extensões iniciais e devem ser excluídas da extensão no FRP (Arduini et al, 1997) uma vez que a deformação no FRP, ε_f é diferente da do substrato de betão onde vai ser aplicado.

De modo a que se respeite a compatibilidade de deformações, deve ser primeiramente avaliado o estado de deformação na superfície onde vai ser colado o reforço de FRP, ε_{b0} . O nível de deformação no FRP ε_f é então resultado da subtração entre o valor da extensão no substrato (calculado por compatibilidade de deformações) e a extensão inicial (Azevedo, 2008), como se pode ver nas Figura 24 e Figura 25 e na equação (7).

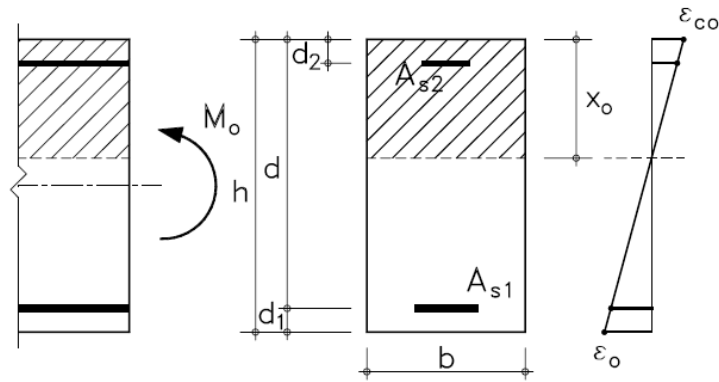


Figura 24- Situação inicial (Bulletin 14, fib)

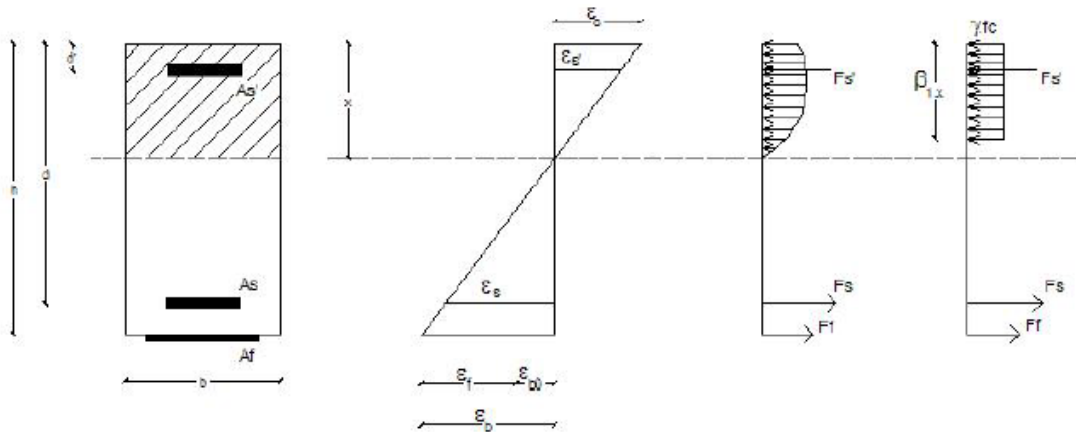


Figura 25- Distribuição de tensões e deformações numa seção de betão armado em ELU (Azevedo, 2008)

$$\varepsilon_f = \varepsilon_b - \varepsilon_{b0} \leq \varepsilon_{fu} \quad (7)$$

O valor da extensão inicial do substrato de betão, ε_{b0} , pode ser determinado através de uma análise linear elástica do elemento considerando todas as cargas a que o elemento estará sujeito durante a aplicação do sistema de reforço FRP. Como, geralmente, M_0 é tipicamente maior do que o momento de fissuração M_{cr} , o cálculo de ε_{b0} é baseado numa secção fissurada, e pode ser calculada da seguinte forma:

$$\varepsilon_{b0} = \frac{M_0 \cdot (h - x_0)}{I_{02} \cdot E_c} \quad (8)$$

Sendo que a posição do Eixo neutro, x_0 , pode ser calculado através do momento estático da seção homogeneizada:

$$\frac{1}{2}bx_0^2 + (\alpha_s - 1).A'_s.(x_0 - a') = \alpha_s.A_s.(d - x_0) \quad (9)$$

Com

$$\alpha_s = E_s/E_c \quad (10)$$

E o momento de Inércia da seção homogeneizada, I_{02} dado por:

$$I_{02} = \frac{bx_0^3}{3} + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_0 - d_2)^2 + \alpha_s A_{s1}(d - x_0)^2 \quad (11)$$

Se M_0 for inferior a M_{cr} , a sua influência no cálculo do elemento reforçado pode ser ignorada, e, portanto $\varepsilon_{b0} = 0$.

3.4.2 Modos de Ruína

Na definição de critérios de dimensionamento, a forma como pode ocorrer a rotura e o tipo de rotura é importante. Tendo em conta a natureza dos sistemas de reforço com compósitos de CFRP, em que as tensões mobilizadas pelo material compósito são transmitidas ao betão por mecanismos de aderência (que podem conduzir a roturas frágeis), o conhecimento das várias formas em que pode ocorrer a rotura é de extrema importância. Assim, os modos de rotura em elementos reforçados à flexão podem ser classificados da seguinte forma (*Bulletin 14 – fib*):

1. Roturas “Clássicas”, em que as interfaces se mantêm intactas até que o betão atinja o esmagamento ou que o próprio reforço atinja a tensão limite de tração;
2. Roturas provocadas por anomalias nas interfaces entre o reforço e o elemento de betão, genericamente designadas por roturas “prematargas” (tendo em conta o desaproveitamento das potencialidades individuais dos materiais).

As roturas clássicas, são o tipo de rotura mais desejável de acontecer, pois traduzem-se no eficaz funcionamento da ligação do material compósito até que um dos materiais constituintes do sistema atinja a sua tensão limite. Dependendo das características dos elementos reforçados, das condições de carregamento, dos materiais ou até das

técnicas de reforço, as roturas clássicas podem evoluir para as seguintes configurações:

- Esmagamento do betão (para situações em que a taxa de armadura ordinária e de reforço são consideravelmente elevadas, sem que haja assim qualquer tipo de cedência das primeiras);
- Cedência das armaduras ordinárias seguida do esmagamento do betão (para taxas de armadura reduzidas);
- Cedência das armaduras ordinárias e posterior colapso do material de reforço (em que as interfaces se mantêm eficazes até ao momento do colapso);

As roturas prematuras, no caso dos sistemas EBR – *Externally Bonded Reinforcement*, resultam da ocorrência de deficiências ao nível das diferentes interfaces de aderência entre o betão e o material compósito, que conduzem à total perda de ação do mesmo e consecutivamente na rotura global do sistema. Devem por isso, ser tidas em consideração em todos os momentos do dimensionamento de uma estrutura reforçada com este tipo de sistemas. Segundo o *Bulletin 14 da fib*, baseado no trabalho desenvolvido por Blaschko (1998), os diferentes tipos de roturas prematuras podem ser divididos da seguinte forma:

- Destacamento por delaminação do betão ao nível do plano das armaduras longitudinais de flexão devido a elevadas tensões de corte;
- Destacamento na interface entre o betão e o adesivo ou entre o compósito e o adesivo, tendo este tipo de rotura origem na deficiente preparação das superfícies de contacto aquando da aplicação do reforço, nas insuficientes propriedades adesivas do material aderente ou na deficiente resistência à tração do betão;
- Rotura pelo material adesivo devido à insuficiente coesão do mesmo;
- Rotura do próprio compósito devido às forças de corte interlaminares, que por si só pressupõe o destacamento de betão, sendo por isso considerado um modo de rotura secundário;

As origens do colapso deste tipo de sistemas não se resumem em exclusivo a problemas nas interfaces do reforço. Tal como já referido neste documento, as condições verificadas ao nível do substrato de betão são também elas determinantes na origem de roturas.

As Figura 26 e Figura 27 ilustram os diferentes modos de rotura associados a um sistema FRP, acima referenciados.

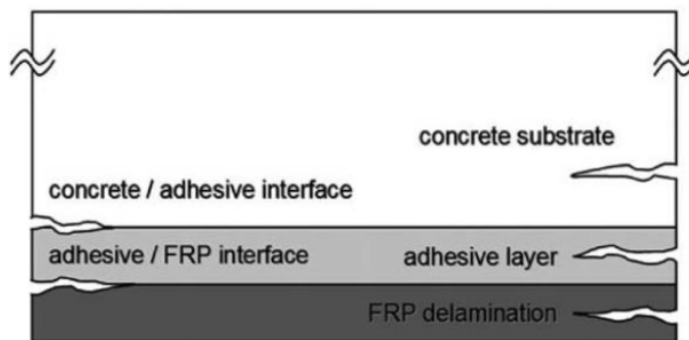


Figura 26- Diferentes modos de rutura de FRP (Au e Büyüköztürk, 2006). (Pohoryles, 2016)

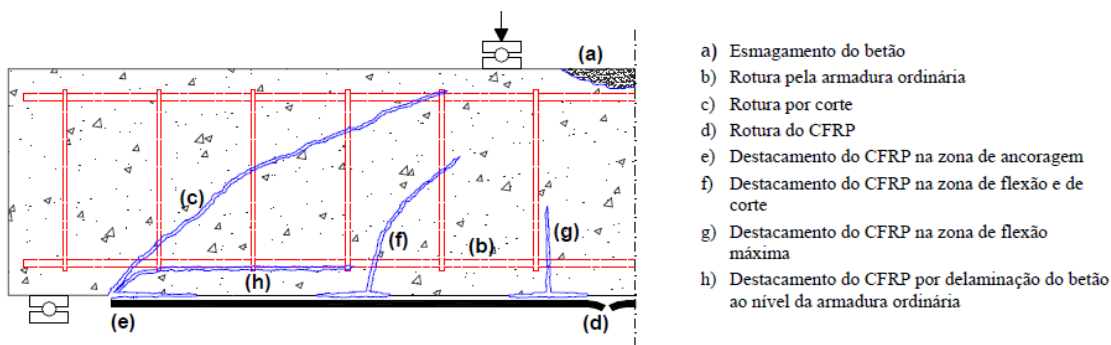


Figura 27- Modos de ruína de vigas reforçadas à flexão com CFRP (Buyukozturk et al., 2004)

Ainda sobre as roturas prematuras, mas no caso dos sistemas NSM – *Near Surface Mounted*, estas podem apresentar modos de rotura consideravelmente diferentes dos apontados nos sistemas EBR. No caso de sistemas NSM, os modos de roturas prematuras podem ser agrupados em:

- Rotura pela interface entre o compósito e o adesivo;
- Rotura pelo adesivo;
- Rotura na interface entre o adesivo e a superfície de betão;
- Rotura do betão e do agente adesivo ao longo dos planos inclinados (aproximadamente 30°);
- Rotura do betão sem que ocorra fendilhação do agente adesivo, associados a rasgos de dimensões maiores que o normal;
- Roturas de canto, em que o reforço é colocado demasiado próximo ($<20\text{mm}$) de uma das arestas da viga, resultando no destacamento do betão situado entre o compósito e a extremidade do elemento;

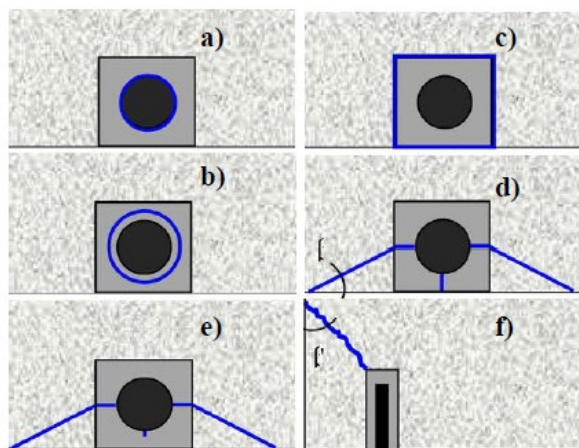


Figura 28- Roturas típicas de sistemas NSM. (Carvalho, 2010)

3.4.3 Interface betão-compósito

Um fator importante no sucesso do sistema de reforço com compósitos CFRP é o comportamento do adesivo/resina e a interface entre o betão e o compósito. O bom funcionamento desta ligação é importante para que o ganho de resistência do sistema estrutural não seja posto em causa. É neste ponto que assenta a base do funcionamento das técnicas de reforço com compósitos de CFRP, pelo que é importante saber como funciona.

O conhecimento do comportamento da interface é então necessário, ficando caracterizado através de uma relação constitutiva correspondente à atuação de tensões normais e uma outra que traduza o comportamento sob tensões de corte assumindo esta última uma maior importância. Esta última relação estabelece-se entre a tensão de corte (aderência) e o escorregamento da junta (deslocamento relativo entre o compósito e a superfície de betão). (Silva et al,2000)

Em sequência de testes e experiências realizadas com o intuito de avaliar a aderência entre o CFRP e o betão, chegou-se à conclusão de quais os fatores que influenciam o comportamento desta interface betão-compósito:

- Características do substrato de betão – a classe de betão, o estado de deterioração, o nível de corrosão das armaduras internas e o padrão de fendilhação do betão podem condicionar o desempenho do reforço. A resistência da ligação diminui consideravelmente com a redução da resistência do betão (Horiguchi et al, 1997);
- Preparação da superfície de colagem – o controlo da rugosidade, da temperatura, da humidade e do padrão de fendilhação superficial pode prevenir ruínas prematuras;
- Sistema de Reforço – as regras de aplicação de mantas e tecidos são diferentes das dos laminados, devendo ser rigorosamente cumpridas. O

aumento da espessura do compósito potência o destacamento do FRP (Buyukozturk et al, 2004). O aumento da largura de colagem provoca uma redução da tensão máxima de corte na ligação (Brosens, 2001). A carga de rotura da ligação cresce com o aumento dos comprimentos de colagem. Contudo, esse ganho está limitado a um determinado comprimento de colagem (comprimento efetivo da colagem) a partir do qual qualquer aumento do comprimento de colagem não conduz ao aumento da carga de rotura. (Silva, 2008);

- Característica do adesivo ou resina de saturação – a seleção imprópria do adesivo pode promover ruínas por destacamento (Saadatmanesh et al, 1990). Um adesivo deve ajustar-se às circunstâncias que envolve cada caso prático de reforço, através da seleção de um material com resistência à tração e ao corte superiores ao da camada de base. (Silva, 2008);
- Padrão de fendilhação – as fendas iniciais associadas à propagação de novas fendas (flexão e corte) podem originar o destacamento do FRP ou a delaminação por corte no betão adjacente à junta (Silva, 2008);
- Efeito da extremidade – a interrupção do reforço cria uma descontinuidade estrutural que envolve alguns mecanismos desfavoráveis de transferência de esforços na junta (concentração de tensões de tração e corte), abrangendo a região designada por zona de ancoragem. O prolongamento do reforço até ao apoio reduz o potencial destacamento do FRP. (Silva, 2008)

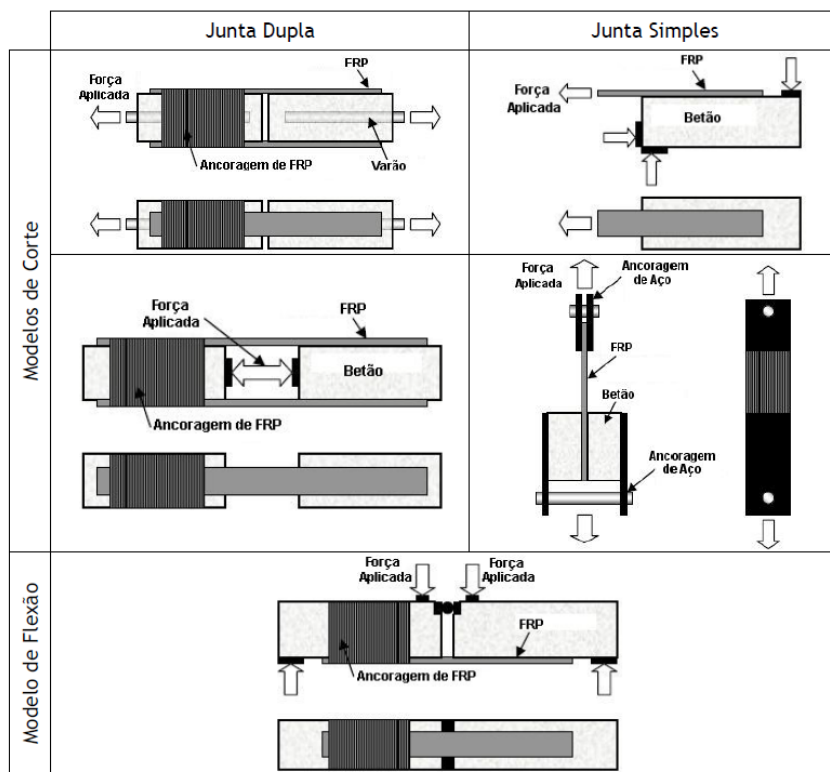


Figura 29- Modelos experimentais de caracterização da interface betão-compósito (ACI 440.XR, 2006)

O comportamento da interface betão-compósito depende do tipo de ensaio experimental adotado (flexão ou corte).

No caso de modelos de flexão, as tensões de aderência no adesivo são, em parte, devidas à variação dos momentos fletores e, por outro lado, à introdução de forças nas zonas de ancoragem (descontinuidades), resultando na concentração de tensões de tração e de corte nas extremidades livres dos reforços (Silva, 2008), como é possível observar na figura 26 a).

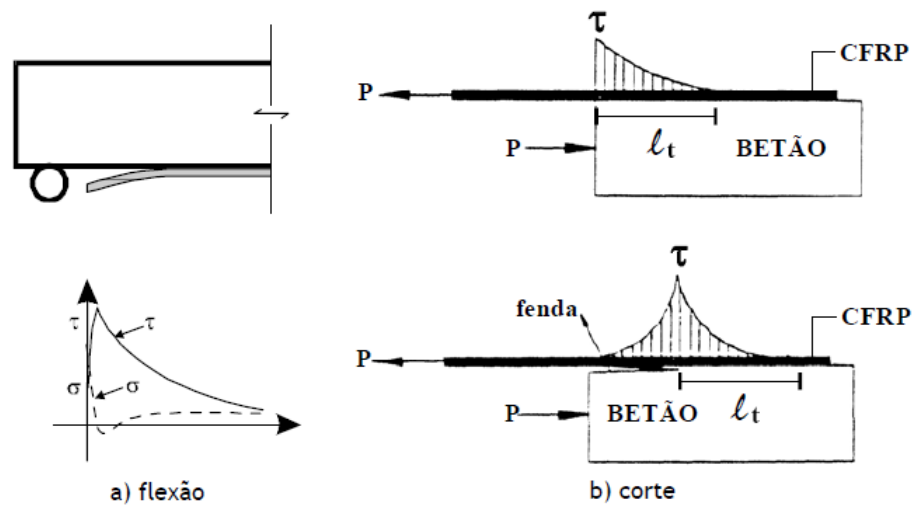


Figura 30- Distribuição das tensões de corte nos modelos experimentais de flexão (a) ou de corte (b) (Silva, 2008)

Nos modelos de corte, a tensão de tração no compósito e a tensão de corte na interface não se distribuem uniformemente ao longo da ligação. No início, verifica-se a existência, na extremidade do CFRP, de um valor de pico da tensão de corte. Quando esta tensão atinge um valor máximo, o betão fendilha. A partir desse momento, verifica-se que o pico da tensão se desloca mais para o interior da ligação, até que ocorra o destacamento brusco do compósito, (Silva, 2008), ver Figura 26b).

3.4.4 Modelos de comportamento

Conhecidas as possíveis distribuições de tensões de corte ao longo da interface betão-compósito, diversos autores avançaram com leis constitutivas que permitiram a modelação aproximada do comportamento da ligação. Esses modelos podem ser classificados em modelos de resistência de materiais (teoria linear elástica) e modelos de fratura (teoria da mecânica da fratura), de acordo com a abordagem usada na sua

dedução. Para além destes dois grupos existem, ainda, modelos simplificados semi-empíricos e empíricos, que facilmente se implementam no processo de dimensionamento, evitando, deste modo, a complexidade das análises de tensões e fratura (Buyukozturk, et al, 2004).

a) Modelos de resistência de materiais

A previsão do destacamento do FRP pressupõe, em primeiro lugar, a determinação da distribuição das tensões normais e de corte ao longo da interface, com base em soluções analíticas formuladas a partir de propriedades elásticas para os vários materiais, das propriedades geométricas da ligação e das características do carregamento. Seguidamente, as tensões instaladas são comparadas com a tensão última dos materiais (resistência) de modo a obter a carga previsível para o destacamento do FRP. Buyukoturk et al. (2004), fazem referência a diversos modelos desta natureza.

Na Figura 31, demonstra-se a aplicação desta metodologia através da comparação entre as tensões obtidas analiticamente e as tensões que efetivamente se desenvolvem ao longo da interface betão-compósito numa viga reforçada.

Matthys (2000) propôs um modelo de aplicação simples para analisar zonas afastadas da extremidade do CFRP, baseado na distribuição de tensões numa viga homogénea não fendilhada. O método consiste em limitar as tensões de corte que se desenvolvem na interface (devido à variação da força ao longo do CFRP) à resistência máxima da ligação (Bulletin 14, 2001)

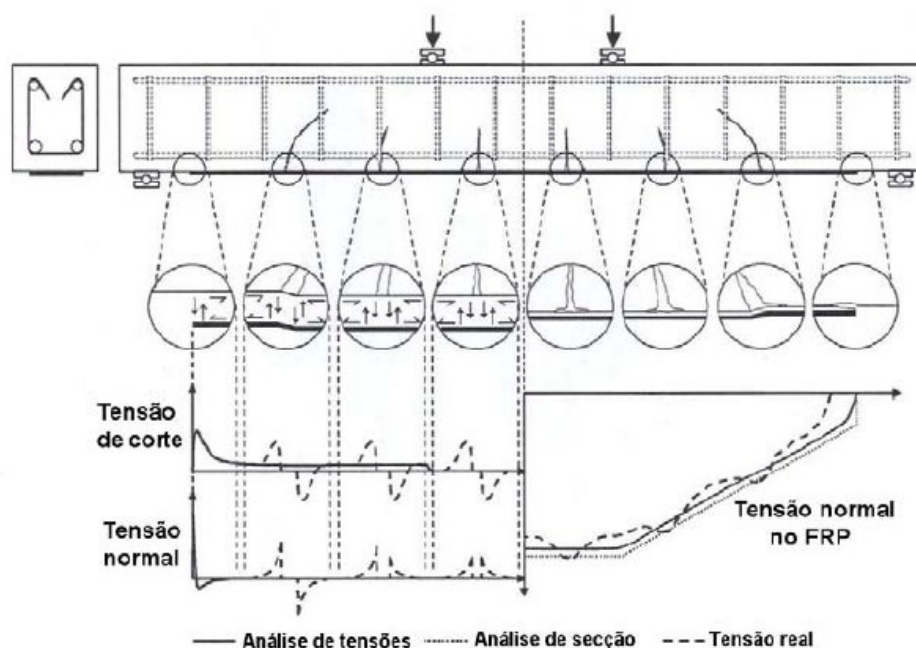


Figura 31- Distribuição real e aproximada de tensões na interface (Buyukozturk et al, 2004)

Para critério de destacamento do CFRP (cedência da ligação), diversos autores propõem um valor limite para as tensões de corte, assim como para as normais. Outros estabelecem critérios de cedência para o betão sujeito a estados de tensão biaxiais, enquanto outros recorrem a critérios de rotura do tipo Mohr-Coulomb. Para além deste aspeto, os vários métodos diferem, essencialmente, no grau de aproximação implícito nas expressões analíticas propostas, como por exemplo na consideração de uma tensão constante ou variável ao longo da espessura do adesivo. (Buyukozturk et al, 2004)

b) Modelos de fratura

A consideração por hipótese de o destacamento do FRP ser essencialmente promovido pela propagação de uma fenda, fruto da grandeza das tensões locais instaladas, conduziu diversos investigadores a adotar, no desenvolvimento de modelos de previsão do comportamento da interface, os axiomas da mecânica da fratura.

Na Figura 32, esquematizam-se alguns dos modelos propostos. Estes modelos não contemplam os mecanismos locais, que diversas vezes condicionam o modo de ruína por destacamento e, muitos deles, não reproduzem a não linearidade do comportamento da ligação (Juvandes, 1999). De todos os modelos, o mais consensual e com maior número de aplicações é o modelo bilinear adotado, entre outros, por Ranish (1982) e Holzenkämpfer (1994).

A definição desta lei pressupõe o conhecimento de três parâmetros (τ_{max} , S_0 e S_1). No entanto, a definição do valor da tensão máxima de aderência (τ_{max}) não reúne, ainda, consenso da comunidade científica, existindo, portanto, diversas propostas para a sua quantificação. Juvandes (1999) reuniu alguns dos critérios adotados para o valor da tensão máxima de referência. De um modo geral, pode afirmar-se que o principal parâmetro a calibrar é a energia de fratura da interface que pode ser comprometida como a energia que é necessário dissipar para obter a degradação total da ligação. O valor desta energia corresponde à área definida pela relação constitutiva adotada (Silva et al, 2000). Uma relação linear entre a energia de fratura (G_f) e a resistência média do betão à tração (f_{ctm}) foi estabelecida por Holzenkämpfer. (Brosens et al, 1998)

Algumas das leis constitutivas contidas na Figura 28 têm sido utilizadas no desenvolvimento de modelos numéricos de previsão do comportamento da interface betão-compósito. Muitos destes modelos constituem ferramentas de análise de estruturas reforçadas por EBR, referindo-se como por exemplo os trabalhos de Silva (1999), Coccia et al., (2004), Niu e Wu (2004), Paliga et al. (2005) e Barky et al. (2005).

O modelo de Holzenkmpfer foi adotado, também, por diversos autores para a dedução de expressões que permitem quantificar a força máxima de tração no compósito, responsável pelo seu destacamento, e o comprimento efetivo de aderência da ligação betão-compósito. Algumas dessas expressões foram resumidas por Dimande (2003), destacando-se dessas propostas a de Rostásy et al., (*Bulletin 14, 2001*).

Através destas expressões será possível prevenir o destacamento do CFRP, limitando a força de tração instalada no compósito ao valor máximo que será possível transferir para o betão através do comprimento de aderência disponível na estrutura reforçada. Esta abordagem é, normalmente, aplicada na prevenção do destacamento do CFRP na zona de amarração. Contudo, Neubauer et al. (2001) desenvolveram uma metodologia que possibilita a análise de possíveis destacamentos em zonas da interface afastadas da extremidade. Segundo eles, a localização da zona da interface onde se poderá iniciar o destacamento do CFRP é determinante. A identificação das zonas está relacionada com a deteção dos modos de ruína por destacamento, tendo os autores definido três locais: zona de amarração do CFRP, secções em que o momento máximo coincide com o esforço transversal e secções de transição entre zonas com armaduras ordinárias plastificadas e zonas em que as armaduras se encontram em regime elástico.

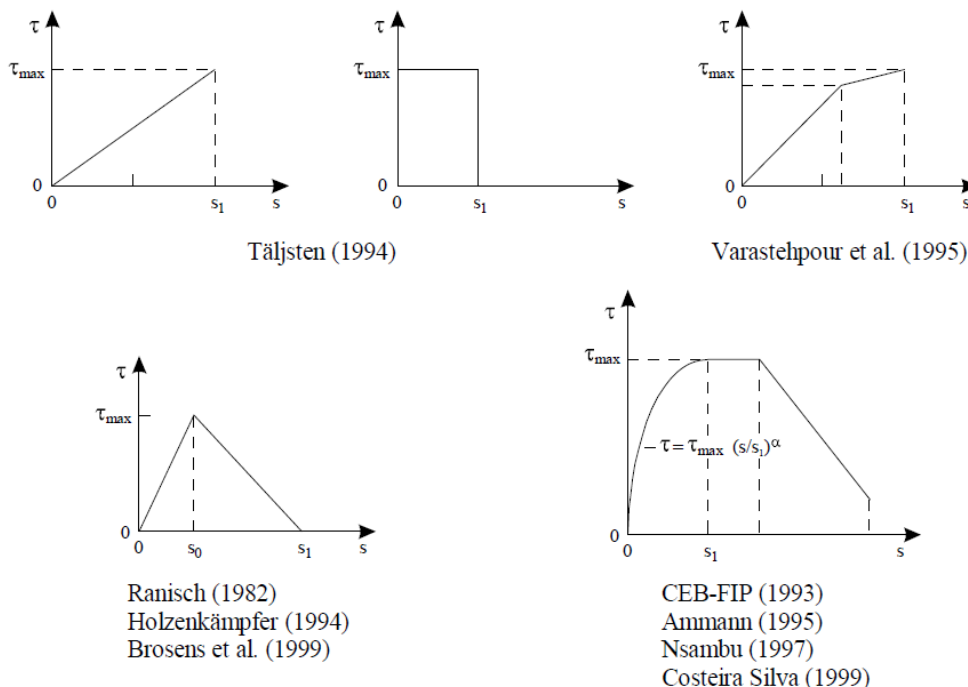


Figura 32 - Leis de comportamento tensão de corte – escorregamento na interface (Juvandes, 1999)

Independentemente da zona onde se pode iniciar o destacamento, o seu estudo baseia-se na análise de troços entre fendas. Para tal, é necessário determinar o espaçamento médio entre fendas de modo a obter as forças no CFRP em cada uma das fendas. Estes autores estabelecem que o destacamento do CFRP se pode iniciar quando o espaçamento entre fendas (S_{cr}) ultrapassar um determinado valor ($S_{cr,max}$). Porém, a força transferida do CFRP para o betão pode, ainda, continuar a crescer apesar da fenda na junta continuar a progredir, diminuindo, desse modo, o espaçamento entre as fendas (diminui, também, o comprimento de aderência). Por fim, quando a distância entre as fendas (S_{cr}) é inferior ao valor limite $S_{cr,max}$, não é possível estabelecer-se o equilíbrio, ocorrendo o destacamento brusco do compósito. Os autores propõem, finalmente, um procedimento para avaliar o possível destacamento em cada uma das três zonas identificadas como críticas.

Niedermeier (2000) propõe uma metodologia diferente para a prevenção de possíveis destacamentos. O destacamento ocorrerá se a tensão prevista para o FRP, entre duas fendas de flexão, por ação do carregamento, for superior à máxima tensão que poderá ser transferida, por aderência, entre o CFRP e o betão. Nesta abordagem o espaçamento entre fendas assume uma relevância significativa, pois a variação da tensão no CFRP depende do espaçamento médio entre fendas. Na opinião de Bogas (2003) as expressões propostas por Niedermeier para o cálculo da distância entre fendas conduzem a valores superiores (demasiado conservadoras) face a outras metodologias disponíveis na literatura técnica. Tal deve-se ao reduzido valor proposto para a tensão de aderência da interface betão-compósito ($\tau_{max} = 0.44 \times f_{ctm}$). Estimado o espaçamento de fendas será possível determinar a máxima variação da tensão nesse comprimento de CFRP de acordo com expressões estabelecidas através de aplicação de conceitos da mecânica da fratura (*Bulletin 14*, 2001).

c) Modelos semi-empíricos e empíricos

Os modelos empíricos não são mais que simples relações estabelecidas a partir dos mecanismos associados ao comportamento da interface adotadas na prevenção de ruínas por destacamento. O objetivo destes modelos é possibilitar a previsão de destacamentos sem ter que recorrer a análises mais elaboradas (modelos de resistência e materiais e de fratura). Muitos destes modelos foram propostos para vigas reforçadas com sistemas de CFRP e envolvem parâmetros determinantes no comportamento da interface (Burkozturk et al., 2004).

Alguns documentos como Neubauer et al (1997), DIBt (1998) e *Bulletin 14* (2001) propõem, para prevenir o destacamento do CFRP por concentração de tensões em fendas de flexão, a limitação da extensão no CFRP a um valor limite, $\epsilon_{f,max}$. Este valor situa-se normalmente entre 6.5% e 8.5%.

O Comité 440 (ACI 440, 2002) propõe também, uma limitação para a extensão no compósito (k_m – coeficiente e limitação da extensão em flexão) de modo a evitar o destacamento do CFRP ou a delaminação do betão ao nível das armaduras

ordinárias. Esta limitação baseia-se em dados recolhidos em ensaios experimentais e na experiência adquirida na aplicação prática deste tipo de técnica de reforço, procurando traduzir o efeito da rigidez do reforço no comportamento da interface.

Pra prevenir o destacamento do CFRP na zona de flexão (motivado por fendas de flexão) Neubauer e Rostásy (1997) propõem também que a extensão no CFRP não exceda o menor dos seguintes valores:

- 5 a 6 vezes a extensão de cedência do aço da armadura ordinária, ε_{sy} ;
- 8‰;
- Metade da extensão última do CFRP à tração, ε_{fu} .

3.5 VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA

O reforço de estruturas de betão armado, utilizando colagem exterior de FRP é uma técnica eficaz que assenta no comportamento conjunto entre um elemento de betão armado ou pré-esforçado e o sistema compósito colado. A segurança global da estrutura reforçada tem que ser garantida, pelo que é importante que o projeto e dimensionamento do reforço seja o mais detalhado e devidamente verificado em termos de segurança também. Todas as situações de dimensionamento e combinações de ações necessárias deverão ser consideradas.

O dimensionamento de elementos estruturais de betão reforçados por colagem externa de sistemas de FRP deve ser baseada na filosofia dos estados limites, de acordo com a regulamentação em vigor (Euricódigo 1 e Eurocódigo 2). Esta metodologia define níveis de segurança aceitáveis em relação à ocorrência, quer de Estados Limites de Utilização (deformação e fendilhação) quer de Estados Limites Últimos (rotura e fadiga). Na verificação da resistência última do elemento, todos os possíveis modos de rotura devem ser analisados. A contribuição do sistema compósito no reforço à flexão de uma secção deve manter a ductilidade, assegurando que a capacidade resistente ao esforço transversal não controlará a rotura. (Figueiras e Juvandes, 2001)

As publicações do *Bulletin 14* da *fib* (2001) e a do ACI 440.2R-02 (ACI, 2002) sugerem princípios de cálculo para avaliação da viabilidade em termos de segurança de reforços com FRP de acordo com o formato atual de cálculo de estruturas de betão armado e pré-esforçado. Estes princípios servem para a aplicação da técnica de reforço estrutural por colagem exterior de sistemas unidirecionais de FRP (EBR). Experiências laboratoriais e publicações (Juvandes et al, 2012) têm vindo a ser feitas com o objetivo de aferir a sua adequabilidade à técnica de reforço NSR – Near Surface Mounted, que é mais recente.

O cálculo é baseado em modelos analíticos ou semi-empíricos e como hipóteses de base considera-se que:

- i. é válido o princípio de Euler-Bernoulli;
- ii. admite-se a perfeita compatibilidade de deformações entre materiais, impondo um diagrama de extensões lineares ao longo de toda a secção reforçada;
- iii. em qualquer instante é satisfeito o princípio de equilíbrio de forças na secção;
- iv. a resistência à tração do betão é desprezível;
- v. O FRP apresenta um comportamento linear elástico até à rotura.

Partindo destes princípios e considerando o estado inicial de tensão e de deformação do elemento antes da aplicação do reforço, assim como as leis constitutivas dos materiais, será possível então prever o comportamento de uma estrutura de betão reforçada à flexão com FRP em relação aos estados limite relevantes – Estado Limite Último (ELU) e Estado Limite de Serviço (ELS)

3.5.1 Estado Limite de Serviço (ELS)

No que diz respeito ao reforço com FRP, as propostas de dimensionamento para Estados limites de Serviço são ainda escassas, sendo que muitas das recomendações têm como base propostas presentes em documentos antigos, relativos a estruturas de betão armado. Seguindo uma abordagem análoga à presente no Eurocódigo 2, o *Bulletin 14* da *fIB* propõe a verificação de quatro pontos fulcrais de modo a garantir adequado funcionamento dos sistemas;

- i. Limitação das tensões;
- ii. Limitação das deformações;
- iii. Limitação da abertura de fendas;
- iv. Verificação da fendilhação nas interfaces

O Comité 440 da ACI, por sua vez centra o dimensionamento aos Estados Limites de Utilização nas recomendações propostas no ACI318, propondo limitações ao nível das tensões dos materiais.

3.5.1.1 Limitação das tensões

De modo a prevenir situações de cedência das armaduras, problemas relacionados com a fluência bem como estados de fendilhação excessiva, torna-se importante a limitação das tensões dos materiais constituintes dos sistemas durante a fase de serviço. Ao nível da limitação das tensões de compressão no betão podem ser tomadas as recomendações presentes no Eurocódigo 2.

$$\sigma_c \leq 0.6f_{ck} \text{ para combinação rara de ações} \quad (12)$$

$$\sigma_c \leq 0.45f_{ck} \text{ para combinação quase-permanente de ações} \quad (13)$$

Ao nível da armadura longitudinal de flexão, as tensões devem ser limitadas a 80% da tensão de característica de cedência do aço para combinação rara de ações.

$$\sigma_s = E_s \cdot \varepsilon_c \cdot \frac{d - x}{x} \leq 0.8f_{yk} \quad (14)$$

De modo análogo, e para a combinação quase-permanente de ações, o *Bulletin 14* propõe a limitação da tensão do material compósito dado pela expressão seguinte. A limitação é feita relativamente ao valor da tensão característica do laminado afetada por um coeficiente de limitação η , variando este com o tipo de FRP utilizado.

$$\sigma_f = E_f \left(\varepsilon_c \frac{h - x}{x} - \varepsilon_0 \right) \leq \eta f_{fk} \quad (15)$$

3.5.1.2 Limitação das deformações

Devido às propriedades inerentes aos materiais compósitos, em muitas das situações de reforço são apenas necessárias reduzidas quantidades de FRP para a obtenção de um nível de reforço satisfatório. Contudo, em casos em que se verifique a necessidade de controlo de deformação dos elementos, a quantidade de reforço necessárias em Estados Limites Últimos pode não satisfazer as condições de dimensionamento em Estados Limites de Utilização. De acordo com publicações da comunidade de investigação, o cálculo da deformação através do método bi-linear proposto pelo CEB, tem apresentado resultados satisfatórios, para o caso de vigas reforçadas com elementos FRP, não obstante as distintas condições da aderência dos diferentes materiais. Assim, o controlo da deformação poderá ser efetuado através das seguintes expressões.

$$a = a_1(1 - \xi_b) + a_2\xi_b \quad (16)$$

$$\xi_b = 0 \quad \text{para } M_k < M_{cr} \quad (17)$$

$$\xi_b = 1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{M_{cr}}{M_k} \right)^{n/2} \text{ para } M_k > M_{cr} \quad (18)$$

Onde a_1 e a_2 representam a deformação na seção não fendilhada e na seção fendilhada, respetivamente. ξ_b trata-se de um coeficiente que contabiliza o efeito de *tension-stiffening* na seção. Os fatores β_1 e β_2 são coeficientes que têm em conta as propriedades de aderência das armaduras bem como o tipo de carga atuante respetivamente.

3.5.1.3 Limitação da abertura de fendas

De modo a garantir a durabilidade e a eficiência dos sistemas, deve garantir-se a limitação da abertura de fendas. Para tal, o *Bulletin 14* propõe a utilização das recomendações propostas no Eurocódigo 2 com a devida contabilização da presença de material de reforço. Assim, o valor característico da abertura de fendas é dado pela expressão:

$$w_k = \beta s_{rm} \varepsilon_{rm,r} = \beta s_{rm} \xi \varepsilon_2 \quad (19)$$

Em que β representa um coeficiente de correlação entre o valor médio e o valor característico da abertura de fenda, s_{rm} o valor médio de espaçamento entre fendas, $\varepsilon_{rm,r}$ o valor médio da extensão ao nível das armaduras longitudinais de flexão, ξ o coeficiente de *tension-stiffening* e ε_2 o valor da extensão das armaduras para a fendilhação do elemento, dado por:

$$\varepsilon_2 = \frac{N_{rk} + \varepsilon_f A_f \varepsilon_0}{E_s A_s + E_f A_f} \quad (20)$$

$$\text{com } \varepsilon_2 \approx \varepsilon_{s1} \approx \varepsilon_f + \varepsilon_0 \quad (21)$$

$$\text{e } N_{rk} = N_{s1} + N_f \quad (22)$$

O valor médio de espaçamento entre fendas tendo em conta a presença de material de reforço pode ser calculado através da recomendação proposta por Rostásy et al (1996).

$$S_{rm} = \frac{2f_{ctm} A_{c,eff}}{\tau_{sm} u_s} \frac{E_s A_s}{E_s A_s + \xi_b E_f A_f} = \frac{2f_{ctm} A_{a,eff}}{\tau_{fm} u_f} \frac{\xi_b E_f A_f}{E_s A_s + \xi_b E_f A_f} \quad (23)$$

Onde $A_{c,eff}$ representa a altura efetiva de tração na seção, dada pelo Eurocódigo 2 como mínimo entre $2,5(h-d)$ e $(h-x)b/3$, $\tau_{sm} = 1,8f_{ctm}$ e $\tau_{fm} = 1,25f_{ctm}$ como o valor médio da tensão de aderência das armaduras e do laminado respetivamente, com u_s e u_f como o perímetro de aderência dos mesmos e ξ_b dado pela expressão:

$$\xi_b = \frac{\tau_{fm} E_s A_s u_f}{\tau_{sm} E_f A_f u_s} = \frac{\tau_{fm} E_s d_s}{\tau_{sm} E_f t_f} \quad (24)$$

3.5.1.4 Limitação da fendilhação nas interfaces

A fendilhação das interfaces em sistemas de reforço compósitos pode comprometer, a longo prazo, a eficiência dos sistemas, nomeadamente quando sob ação de ciclos de gelo-degelo ou sob carregamento de natureza cíclica. De modo a garantir a limitação desta mesma fendilhação, deve garantir-se para a combinação quase-permanente, e segundo o *bulletin 14* da *fIB*, que a máxima tensão de corte na extremidade do FRP (τ_{f1}) não exceda a resistência de tração característica do betão (f_{ctk}).

$$\tau_{f1} = \left[V_{x=0} + \left(\frac{G_a}{E_f t_f t_a} \right)^{1/2} M_{x=0} \right] \frac{t_f (h-x)}{I_c} \quad (25)$$

$V_{x=0}$ e $M_{x=0}$ representam respetivamente o esforço transversal e o momento fletor atuantes na seção correspondente à extremidade do compósito.

3.5.2 Estado Limite Último (ELU)

Segundo o *Bulletin 14* da *fib*, a verificação de sistemas de reforço compósito aos Estados Limites Últimos (ELU) deve ser feita em três fases:

- i. Através da verificação do comportamento em que se verifica a ação conjunta do betão com o FRP;
- ii. Através da verificação da ocorrência da perda de ação do compósito (limitação de tensões);
- iii. E da verificação das condições de ductilidade requeridas.

No que diz respeito aos fatores de segurança do cálculo, o *Bulletin 14* da *fib* sugere a utilização do coeficiente γ_f dependente do tipo de fibra e do tipo de sistema de reforço FRP, cujos valores resultam de informação recolhida experimentalmente (Tabela 9).

Os coeficientes de segurança destinam-se à limitação dos valores de dimensionamento da tensão do material compósito f_{fd} obtidos através da expressão seguinte (26), em que f_{fk} representa o quantilho de 5% da resistência à tração, ε_{fue} a extensão última efetiva e ε_{fum} a extensão média do FRP, obtida a partir do ensaio uniaxial de tração em provetes de FRP.

Tipo de FRP	Tipo de Aplicação A ⁽¹⁾	Tipo de Aplicação B ⁽²⁾
CFRP	1,20	1,35
GFRP	1,30	1,50
AFRP	1,25	1,45

- (1) Aplicação de sistemas EBR pré-fabricados em condições normais de controlo de qualidade. Aplicável a sistemas de impregnação *in-situ* em que se verifique um elevado grau de controlo da qualidade e condições de aplicação.
- (2) Aplicação de sistemas de impregnação *in-situ* em condições normais de controlo de qualidade. Aplicação de qualquer tipo de sistema em condições de aplicação desfavoráveis.

Tabela 9- Fatores de segurança(γ_{fF}) de materiais compósitos FRP (Bulletin 14 da *fib*)

$$f_{fd} = \frac{f_{fk} \cdot \varepsilon_{fue}}{\gamma_f \cdot \varepsilon_{fum}} \quad (26)$$

Na análise realizada em estado limite último, o gráfico tensão-deformação é o de resposta linear apresentado na Figura 33 abaixo (Azevedo, 2008).

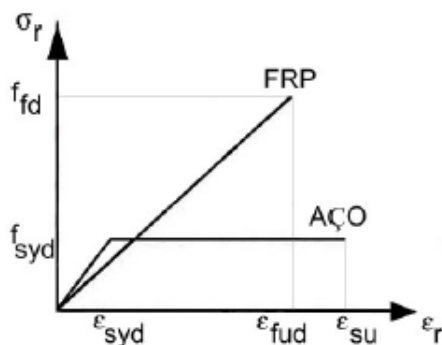


Figura 33- Diagrama de tensões-deformações do Aço e FRP. (Azevedo, 2008)

O documento do Comité 440 do ACI (2002), por sua vez, apresenta uma filosofia semelhante. Em vez de propor um valor limite único para a extensão no FRP, sugere a adoção de um parâmetro K_m que tem em conta as propriedades do material compósito (nomeadamente a rigidez do mesmo), bem como as propriedades do sistema aplicado (número de camadas de reforço, no caso da aplicação de mantas ou tecidos).

$$k_m = \begin{cases} \frac{1}{60 \cdot \varepsilon_{fu}} \cdot \left(1 - \frac{n \cdot E_f \cdot t_f}{360000}\right) \leq 0.90; n \cdot E_f \cdot t_f \leq 180000 \\ \frac{1}{60 \cdot \varepsilon_{fu}} \cdot \left(1 - \frac{90000}{n \cdot E_f \cdot t_f}\right) \leq 0.90; n \cdot E_f \cdot t_f > 180000 \end{cases} \quad (27)$$

Este parâmetro k_m é um fator nunca superior a 0,90, que deve ser multiplicado pela extensão última indicada na ficha técnica pelo fabricante do sistema FRP obtendo-se um valor limite para a extensão no FRP de modo a prevenir ruínas por perda de aderência.

O número de camadas, n , usado na expressão (27), refere-se ao número de camadas de FRP na secção correspondente ao momento fletor em análise. Este fator tem em atenção que laminados mais rígidos têm maior probabilidade de delaminação.

Portanto, se a rigidez unitária do FRP ($n \cdot E_f \cdot t_f$) aumenta, a limitação sobre a extensão torna-se mais severa. Para laminados com uma rigidez unitária superior a 180000

N/mm, k_m condiciona a força no laminado de modo a limitar o nível de deformação. Isto cria efetivamente um limite superior na força total que se pode desenvolver num laminado de FRP, independente do número de camadas. A largura do laminado de FRP não entra no cálculo da rigidez, $n \cdot E_f \cdot t_f$, uma vez que um acréscimo na largura do FRP resulta num aumento proporcional da área de colagem.

O parâmetro k_m é baseado apenas na tendência generalizada e na experiência de engenheiros no dimensionamento de sistemas de FRP colados. Investigações mais aprofundadas na área dos mecanismos de aderência de reforços de FRP à flexão contribuirão para a definição de métodos mais exatos de previsão de ruínas por perda de aderência, resultando num refinamento da equação apresentada.

3.5.2.1 Ductilidade

A utilização de materiais compósitos pode afetar a ductilidade característica de elementos de betão armado. É, por isso, importante perceber a influência da perda de ductilidade no comportamento dos elementos reforçados. De modo a evitar a obtenção de roturas frágeis em elementos reforçados a esforços de flexão, o *Bulletin 14* da *fib* adota limitações de curvatura presentes no Eurocódigo 2, adotando-as à presença de material compósito, sendo que este deve, no colapso, verificar as condições seguintes:

a)

$$\varepsilon_{fu,c} \geq 0,0050 - \varepsilon_0, \text{ para betões de classe igual ou inferior a C35/45} \quad (28)$$

b)

$$\varepsilon_{fu,c} \geq 0,0075 - \varepsilon_0, \text{ para betões de classe superior a C34/45} \quad (29)$$

Sendo $\varepsilon_{fu,c}$ a extensão do FRP na seção crítica no instante de colapso e admitindo a simplificação $h/d \approx 1,1$.

Estes valores devem ser obtidos através do correto dimensionamento das armaduras ordinárias de flexão, garantindo sempre que estas apresentam suficiente cedência antes do momento colapso, de modo a verificar a ductilidade necessária aos sistemas, garantidas pela verificação das condições:

a)

$$\varepsilon_{su,c} \geq 0,0043 - \varepsilon_0, \text{ para betões de classe igual ou inferior a C35/45} \quad (30)$$

b)

$$\varepsilon_{su,c} \geq 0,0065 - \varepsilon_0, \text{ para betões de classe superior a C34/45} \quad (31)$$

Onde $\varepsilon_{su,c}$ representa a extensão das armaduras de flexão no momento de rotura do elemento.

Por sua vez, a abordagem do ACI (ACI 318 Appendix B) centra-se na aplicação de um fator de redução ϕ , dependente da extensão do aço nos instantes de cedência e de rotura, dado pela expressão:

$$\phi = \begin{cases} 0,9; \varepsilon_s \geq 0,005 \\ 0,7 + \frac{0,2(\varepsilon_s - \varepsilon_{sy})}{0,005 - \varepsilon_{sy}}; \varepsilon_{sy} < \varepsilon_s < 0,005 \\ 0,7; \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy} \end{cases} \quad (32)$$

3.5.2.2 Ação conjunta betão-FRP

A proposta de análise de Estados Limites últimos do *bulletin 14, fib*, para o caso de ação conjunta betão-FRP, correspondente a situações de rotura em que as interfaces mantêm a sua eficácia até ao momento da rotura é separada em dois casos distintos. Em ambos, a análise clássica de seções de betão armado é válida em qualquer momento da análise.

3.5.2.3 Esmagamento do betão após cedência das armaduras

Esta é a situação mais desejável de acontecer, rotura da seção transversal crítica ocorre pela cedência das armaduras de tração seguido do esmagamento do betão, enquanto o FRP está intacto.

O cálculo do Momento fletor da seção transversal reforçada é calculado com base nos princípios de dimensionamento de RC (Figura 34).

Primeiro, a profundidade do eixo neutro, x , é calculada a partir da compatibilidade de deformações e equilíbrio de forças, e então o momento de projeto é obtido pelo equilíbrio de momentos. A análise deve ter em consideração que o elemento estrutural a reforçar pode não estar totalmente livre de cargas, aquando do reforço e, portanto, uma deformação inicial ε_0 na fibra de tração extrema deve ser considerada.

A capacidade de momento fletor de projeto pode ser calculada com base no seguinte:

Cálculo da posição do eixo neutro x :

$$0,85\phi f_{cd}bx + A_{s2}E_s\varepsilon_{s2} = A_{s1}f_{yd} + A_f E_{fu} \varepsilon_f \quad (33)$$

Onde $\varphi=0,8$ e:

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu} \frac{x-d_2}{x}, \quad E_s \varepsilon_{s2} \leq f_{yd} \quad (34)$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \frac{h-x}{x} - \varepsilon_{f0} \quad (35)$$

O momento resistente é dado por,

$$M_{Rd} = A_{s1} f_{yd} (d - \delta_G x) + A_f E_f \varepsilon_f (h - \delta_G x) + A_{s2} E_s \varepsilon_{s2} (\delta_G x - d_2) \quad (36)$$

Com, $\delta_G = 0,4$

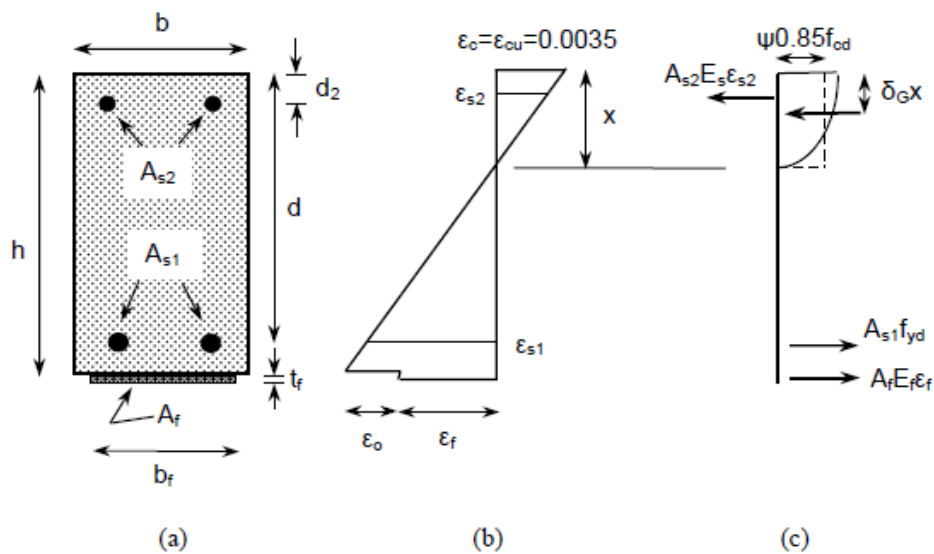


Figura 34- Análise da seção transversa para Estados Limites Últimos com reforço: (a) geometria, (b) distribuição de forças, (c) distribuição de tenções). (Bulletin 14, fib)

Para que as equações acima sejam válidas, os seguintes pressupostos têm que se verificar: cedência das armaduras e uma extensão no FRP inferior à extensão de rotura, ε_{fud} :

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu} \frac{d - x}{x} \geq \frac{f_{yd}}{E_s} \quad (37)$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \frac{h - x}{x} - \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{fud} \quad (38)$$

A área A_f de FRP pretendida é obtida iterativamente pela resolução numérica das equações (33) e (36).

3.5.2.4 Rotura do material FRP após cedência das armaduras

Apesar de se tratar de um modo de rotura pouco provável, tendo em conta os problemas de destacamento prematuro que geralmente se verificam neste tipo de sistemas, o *Bulletin 14* apresenta propostas para o cálculo deste tipo de mecanismos, mantendo-se válidos os princípios apresentados para o modo anterior. As equações (33) e (36) continuam a ser válidas neste caso, com a substituição de ε_{cu} por ε_c e substituição de ε_f por ε_{fud} . E φ e δ_G são obtidos pelas expressões:

$$\varphi = \begin{cases} 1000\varepsilon_c \left(0,5 - \frac{1000}{12} \varepsilon_c \right) & \text{para } \varepsilon_c \leq 0,002 \\ 1 - \frac{2}{3000\varepsilon_c} & \text{para } 0,002 \leq \varepsilon_c \leq 0,0035 \end{cases} \quad (39)$$

$$\delta_G = \begin{cases} \frac{8 - 1000\varepsilon_c}{4(6 - 1000\varepsilon_c)} & \text{para } \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{1000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c - 4) + 2}{2000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c - 2)} & \text{para } 0,002 \leq \varepsilon_c \leq 0,0035 \end{cases} \quad (40)$$

Em que φ representa um fator de limitação da tensão de compressão no betão e δ_G representa o fator de afetação da altura da linha neutra para o cálculo da posição da força resultante de compressão no betão.

3.5.2.5 Perda de ação do material compósito

A perda da ação do material compósito trata-se da rotura mais comum em sistemas de reforço FRP. Torna-se, deste modo fundamental conhecer os mecanismos que a ela estão associados, bem como as recomendações de cálculo que a permitem evitar. O Bulletin 14 apresenta quatro mecanismos de rotura distintos:

1. Destacamento em fendas de corte
2. Destacamento em fendas de flexão/zonas de ancoragem
3. Falha por cote nas extremidades do reforço
4. Destacamento com origem em irregularidades na superfície de aplicação.

3.5.2.6 Destacamento em fendas de corte

A abertura de fendas em elementos de betão são geralmente, oblíquas, e caracteristicamente estão associados deslocamentos de aberturas com componentes quer verticais, v , como horizontais, w . Tal como já indicado neste documento, as fendas horizontais podem causar fenómenos de destacamento de betão (*peeling-off*). Mas as fissuras verticais podem causar também fenómenos de destacamento, na medida em que induzem tensão direta nas interfaces, entre o betão e o FRP, provocando o destacamento do compósito e a conseqüente rutura do sistema.

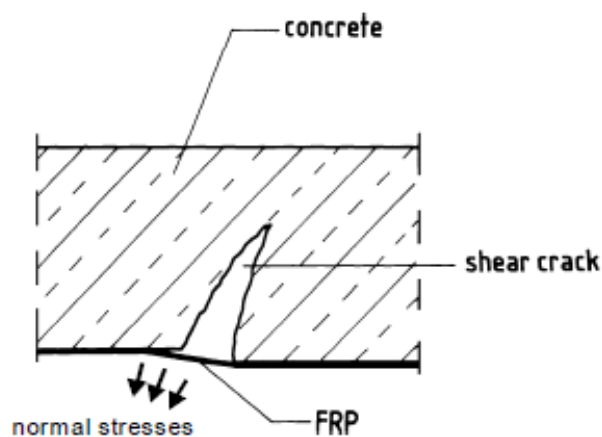


Figura 35- Destacamento causado por fendas de corte. (Bulletin 14 fib)

Segundo Triantafyllou, e Plevris (1992), a rotura acontecer ou não, depende de fatores como o deslocamento de abertura vertical, a rigidez de corte e de flexão dos materiais e da tensão do betão em causa.

Com base em resultados experimentais, o Bulletin 14, sugere a seguinte expressão proposta por Matthys (2000), para o cálculo das tensões de corte características:

$$\tau_{Rk} = 0,38 + 151\rho_{eq} \quad (41)$$

Sendo que ρ_{eq} é obtido por:

$$\rho_{eq} = \frac{A_s + A_f \frac{E_f}{E_s}}{bd} \quad (42)$$

3.5.2.7 Destacamento em zonas de flexão e zonas de ancoragem

O tratamento de descolamento na ancoragem da extremidade e nas fissuras de flexão pode ser feito de acordo com várias abordagens, que são descritas resumidamente no *Bulletin 14 da fib*, sendo que os detalhes de cada uma delas se encontram em apêndices próprios, pelo que a sua leitura é sempre recomendável. Seguidamente expõem-se o referido no *Bulletin 14* sobre este tema:

- Verificação de acordo com a linha do envelope de tensões de tração no FRP. Esta abordagem envolve duas etapas independentes: primeiro, a ancoragem da extremidade deve ser verificada com base na tensão de corte - lei constitutiva do escorregamento na interface FRP-betão. Em seguida, uma tensão limite deve ser aplicada no FRP para garantir que a falha de ligação longe da ancoragem será evitada. Este procedimento foi posto em prática em várias experiências e projetos devido à sua simplicidade. No entanto, representa uma simplificação grosseira do comportamento real, como a tensão FRP correspondente à falha de ligação não ser um valor fixo, mas dependente de uma série de parâmetros, incluindo a relação momento-cisalhamento, a deformação no aço interno e distribuição de fissuras.

- Verificação de acordo com a linha do envelope de tensões de tração no FRP. Nesta abordagem, o destacamento é tratado de forma conjunta, tanto na ancoragem final como em qualquer ponto ao longo da interface FRP-betão, com base na tensão de corte da interface - lei de derrapagem, e a linha da envolvente de tensões de tração no FRP (Niedermeier, 2000). A principal vantagem desta abordagem é que o destacamento no final e nas fissuras de flexão é tratado com o mesmo modelo, enquanto que a principal desvantagem é sua complexidade, o que torna difícil aplicá-lo como um modelo prático de engenharia.

- Verificação da ancoragem final e da transferência de força na interface FRP / betão;

De acordo com a terceira abordagem (Matthys, 2000), duas etapas independentes devem ser seguidas (como na primeira). Na primeira, a ancoragem da extremidade deve ser verificada com base na tensão de cisalhamento - lei constitutiva do escorregamento na interface betão-FRP. E no segundo deveria ser verificado que a tensão de cisalhamento ao longo da interface, calculada com base no equilíbrio simplificado condições, é mantida abaixo de um valor crítico (a resistência ao corte do betão). Uma desvantagem desta abordagem é o tratamento do mesmo - em princípio - fenómeno (destacamento do FRP no final e para além) com modelos diferentes e outro é que se baseia numa distribuição de tensões para uma viga homogêneo e não fissurada. No entanto, uma grande vantagem é a simplicidade de aplicação em problemas práticos.

3.5.2.8 Falha por corte nas extremidades de reforço

Jansze (1997) empregou o conceito de vão de corte fictício, ilustrado na Figura 36, para o cálculo da resistência ao corte de vigas galvanizadas ao longo das linhas do Código Modelo (CEB 1993).

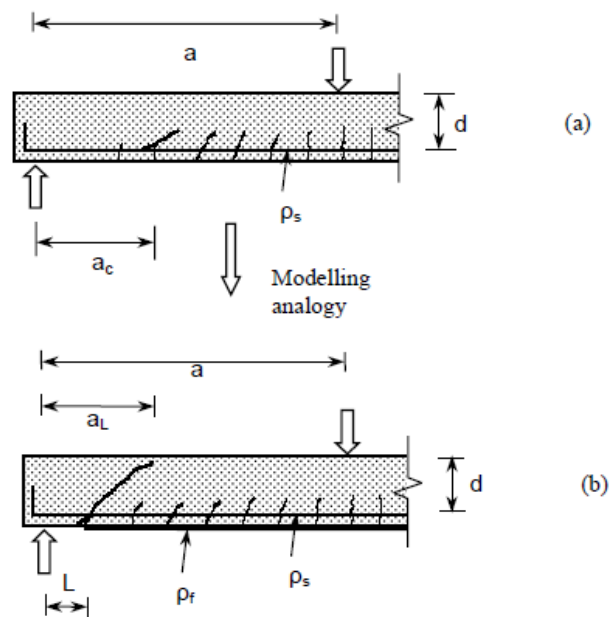


Figura 36- a) conceito de vão fictício de corte; (b) analogia modelar para a análise de falha por corte na extremidade do reforço. (Bulletin 14, fib)

As equações resultantes são:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} = \tau_{Rd}^{bd} \quad (43)$$

$$\tau_{Rd} = 0,15 \sqrt[3]{3 \frac{d}{a_L} \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) \sqrt[3]{100 \rho_s f_{cK}}} \quad (44)$$

$$a_{L0} = \sqrt[4]{\frac{(1 - \sqrt{\rho_s})^2}{\rho_s} d L_0^3} < a \quad (45)$$

$$L_0 = a_i + f \quad (46)$$

$$L_0 + d < a, \quad a_{L0} < a \quad (47)$$

Em que L_0 representa a distância da extremidade do FRP ao eixo do apoio, a representa o vão de corte, a_{L0} o vão de corte fictício e $\rho_s = A_{s1}/bd$.

3.5.2.9 Destacamento com origem em irregularidades na superfície

Este não é um modo de ruína comum. No entanto, o *Bulletin 14* sugere a possibilidade de colapso dos sistemas com origem numa deficiente distribuição de forças devido a irregularidades na superfície do betão. Não há, no entanto, recomendações ao nível do cálculo. Porém, alerta-se para a importância de uma correta aplicação dos sistemas de reforço, com especial atenção para a preparação da superfície de betão. Para além do *Bulletin 14* ou ACI440, as recomendações dos fabricantes são essenciais para no método de aplicação e informação sobre o material de reforço, sendo também de extrema importância que a aplicação seja executada por profissionais qualificados.

4 CASO DE ESTUDO

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Na sequência do trabalho desenvolvido nos capítulos antecedentes, pretende-se neste capítulo apresentar um reforço hipotético de uma estrutura de betão armado, utilizando reforços de polímeros de fibra de carbono e verificar a viabilidade desse reforço.

Para tal, utilizou-se o software de dimensionamento desenvolvido para o efeito pela **S&P – FRP Lamella version 5.6**. Este programa executa o dimensionamento do reforço à flexão e ao corte de uma estrutura de betão armado, usando reforços de compósitos reforçados com fibras de carbono, produzidos pela própria S&P, tendo como base os requisitos do código alemão como guia de cálculo, bem como o regulamento Eurocódigo 2.

Com o software *FRP Lamella* é possível dimensionar o reforço de elementos de estruturas de betão, sujeitos à flexão uniaxial e forças axiais, usando materiais FRP. Este programa pode ser usado para o projeto preliminar de medidas de reforço, bem como para cálculos completos no âmbito da análise estrutural.

O software fornece ao usuário a área de seção transversal de FRP necessária para o estado reforçado e ao mesmo tempo, realiza as verificações de ELU e ELS necessárias, em termos da resistência de aderência e da capacidade de cisalhamento do elemento de betão.

Atendendo a que este programa é usado em cerca de 15 países, é possível escolher os regulamentos relevantes, diretrizes e parâmetros nacionais:

- Eurocódigo 2 (EC2)
- DIN 1045-1 (German DIN-Norm)
- BS 8110 (British Standard)
- NEM 6720 (Nederlands Normalisatie-Instituut)
- BAEL 91 (Normes Françaises)
- ACI 318 (American Concrete Institute)
- KCI 8 (Korean Concrete Institute)

Neste caso selecionou-se o Eurocódigo 2.

De referir também que o software *FRP Lamella* baseia-se nos parâmetros dos materiais dos sistemas de FRP da S&P, devendo ser usado exclusivamente para o dimensionamento dos sistemas de FRP da S&P.

4.2 PROJETO DE REFORÇO DA ESTRUTURA

Este caso de estudo incide no reforço hipotético de um piso de um edifício existente (Piso 0), cuja planta see observa na Figura 37. Inicialmente este piso foi dimensionado para funcionar como escritórios, mas pretende-se que passe a ser usado como armazém, pelo que este terá que ser analisado e redimensionado para o efeito.

Genericamente, este edifício é constituído por seis pisos para além da cobertura, sendo que um deles acima do Piso 0 e os restantes abaixo deste, parcialmente subterrâneos, conforme corte transversal abaixo (Figura 38).

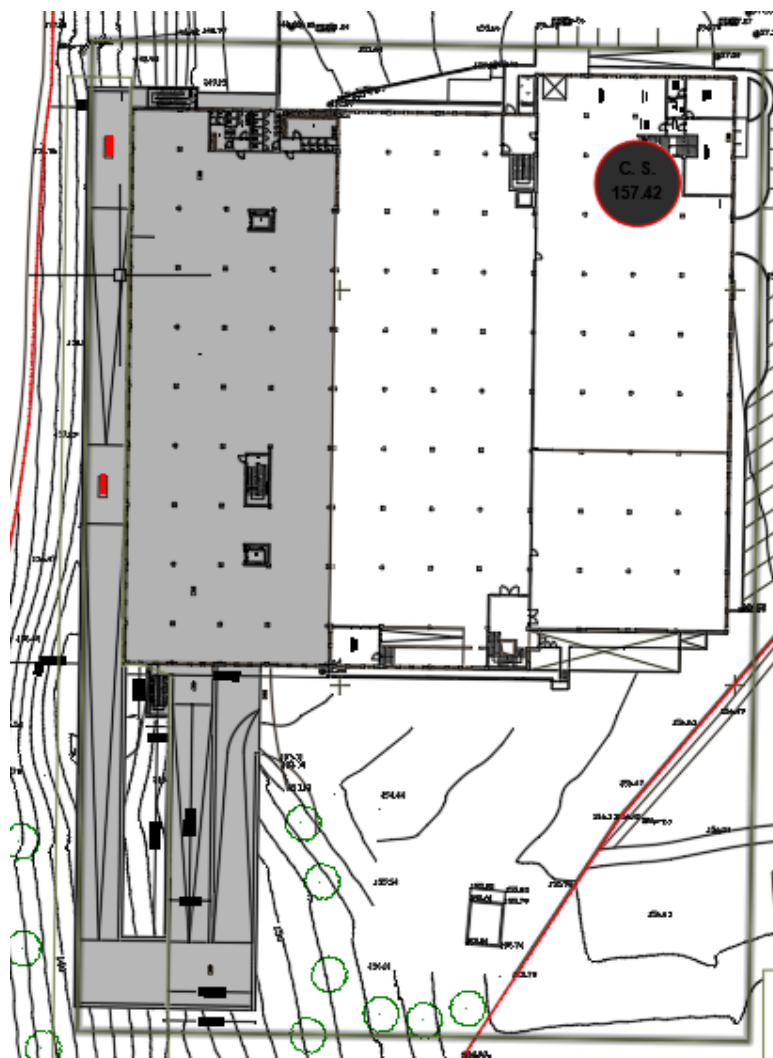


Figura 37- Planta do edifício em estudo

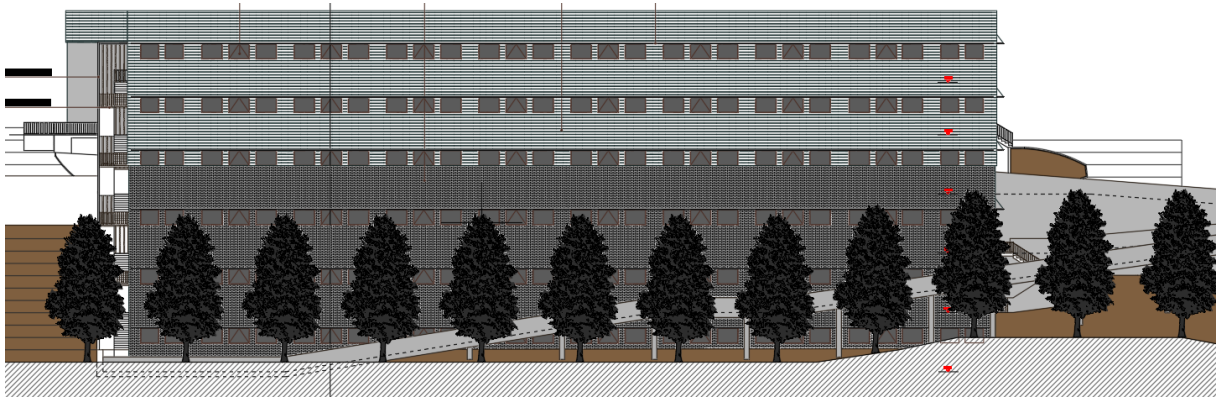


Figura 38- Corte Transversal do Edifício em estudo

Este exercício prático centra-se no Piso 0 do edifício em causa. Este piso 0, inicialmente utilizado como escritórios, foi primariamente dimensionamento para o efeito, considerando uma sobrecarga de 3KN/m^2 .

O Piso 0 é constituído por 14 Pórticos, com 59 Pilares, estruturalmente distribuídos da forma como se observa na Figura 39 à Figura 44. É intersetado por um vão de escadas entre o Pilar 40 e 41 do Pórtico 3, e duas caixas de elevadores.

Como é possível verificar na planta abaixo (Figura 39), o edifício é praticamente simétrico, pelo que para este caso prático em questão, o dimensionamento dos reforços e respetivos cálculos irão incidir na parte esquerda do edifício (Pórticos 1, 3, 5, 7, 9, 11 e 12).

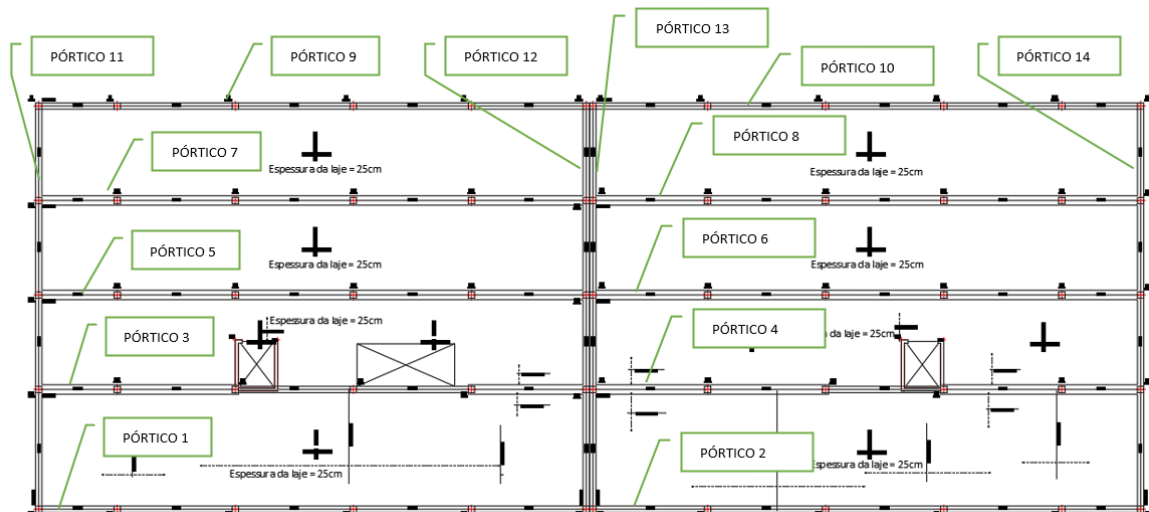


Figura 39- Planta estrutural do Piso 0

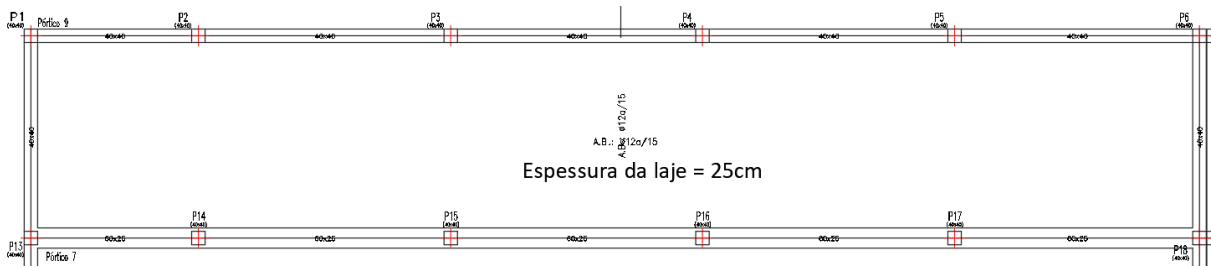


Figura 40- Pormenor do Pórticos 9 (Pilar P1 a P6) e Pórtico 7 (Pilar 13 a 18)

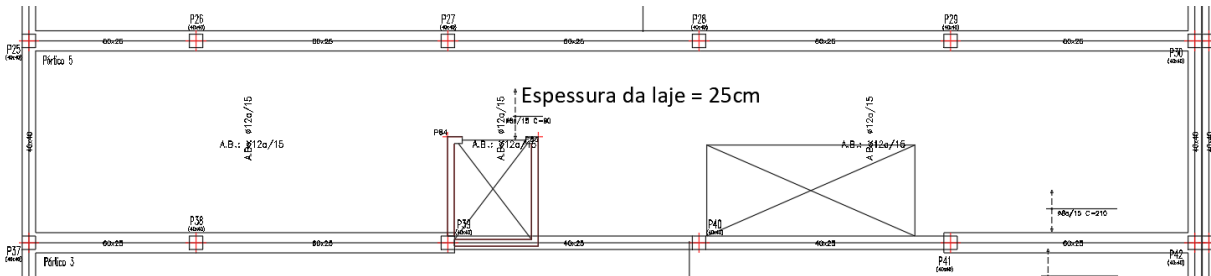


Figura 41- Pormenor do Pórtico 5 (Pilar P25 a P30) e Pórtico 3 (Pilar P37 a P42)

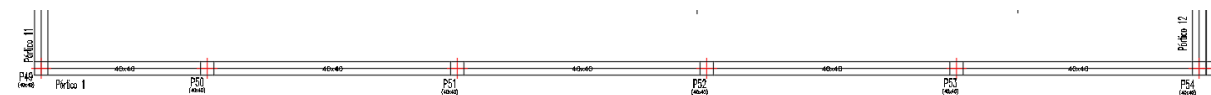


Figura 42- Pormenor do Pórtico 1 (Pilar P50 a P54)

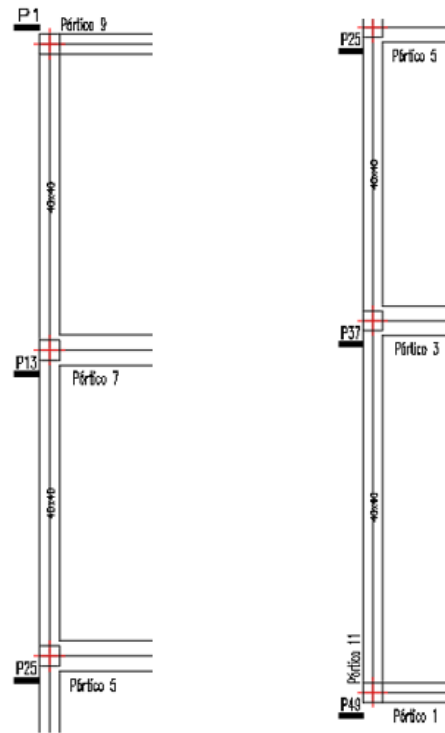


Figura 43- Pormenor do Pórtico 11 (segmentado) – Pilar P49 a P1.

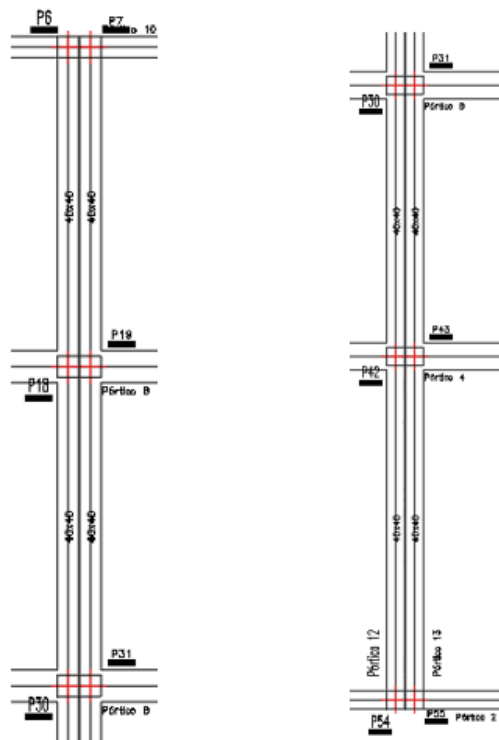


Figura 44- Pormenor do Pórtico 12 (Segmentado) – Pilar 54 a P6

Atendido à necessidade que os proprietários tiveram, de transformar o Piso 0 num armazém, foi necessário reformular os cálculos de estabilidade, considerando assim uma sobrecarga de 4KN/m^2 . O objetivo deste caso de estudo é então avaliar a necessidade de reforço ao nível das vigas do Piso 0, tendo como base os Diagramas de Esforços fornecidos, da situação inicial (3KN/m^2) e da situação final (4KN/m^2).

Relativamente à situação inicial – Sobregarga de 3KN/m^2 , os diagramas de esforços apresentam-se de seguida.

A Figura 45, diz respeito aos valores dos momentos fletores do Pórtico 1, sendo que o valor mais baixo corresponde ao apoio P49 ($20,36\text{KN.m}$) e ao vão 49-50 ($29,4\text{KN.m}$) e os valores mais elevados correspondem ao apoio P53 ($112,39\text{KN.m}$) e ao vão 53-54 ($78,15\text{KN.m}$).

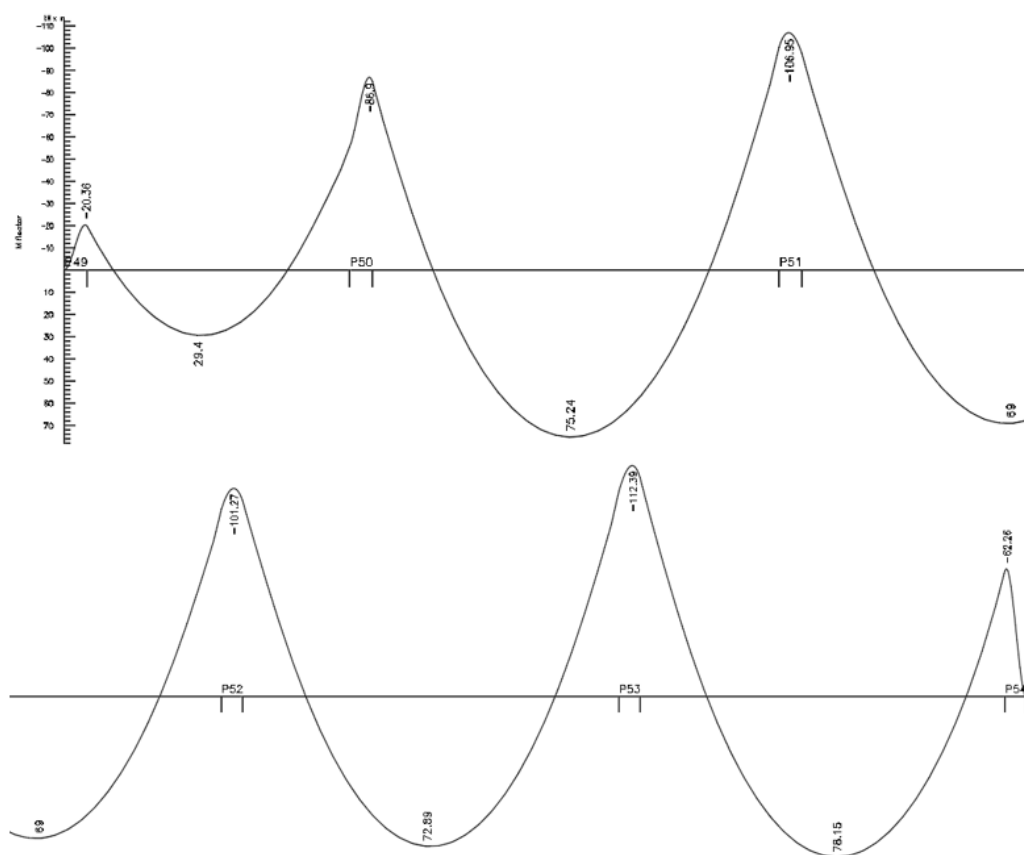


Figura 45- Diagrama de Esforços Inicial – Momento Fletor (sobrecargas de 3KN/m^2) – Vão 49-50, vão 50-51, vão 51-52, vão 52-53 e vão 53-54 – Pórtico 1

A Figura 46, diz respeito aos valores dos momentos fletores do Pórtico 3, onde o valor mais baixo corresponde ao apoio P37, extremo esquerdo, ($32,98\text{KN.m}$) e ao vão 37-38 ($58,8\text{KN.m}$) e os valores mais elevados correspondem ao apoio P41 ($182,66\text{KN.m}$) e ao vão 41-42 ($131,75\text{KN.m}$), sendo que no apoio extremo direito apresenta $81,87\text{KN.m}$.

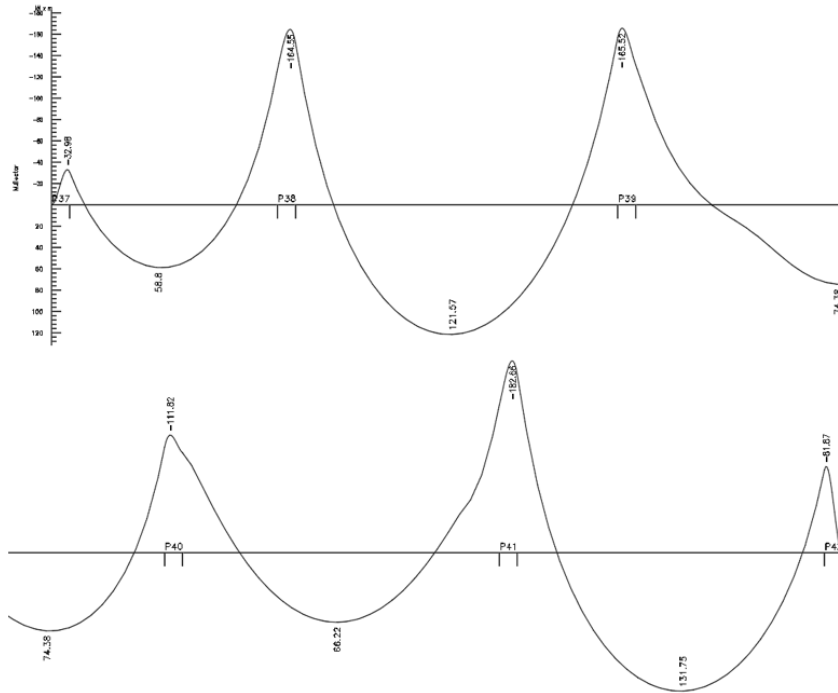


Figura 46- Diagrama de Esforços Inicial – Momento Fletor (sobrecargas de 3KN/m²) – Vão 37-38, vão 38-39, vão 39-40, vão 40-41 e vão 41-42 – Pórtico 3

A Figura 47, diz respeito ao Pórtico 5, em que os valores dos momentos fletores variam entre os 37,88 KN.m no apoio extremo esquerdo P25 e 166,49 KN.m no apoio P29 e entre os 44,09 no vão 25-26 e os 100.3 KN.m no vão 29-30.

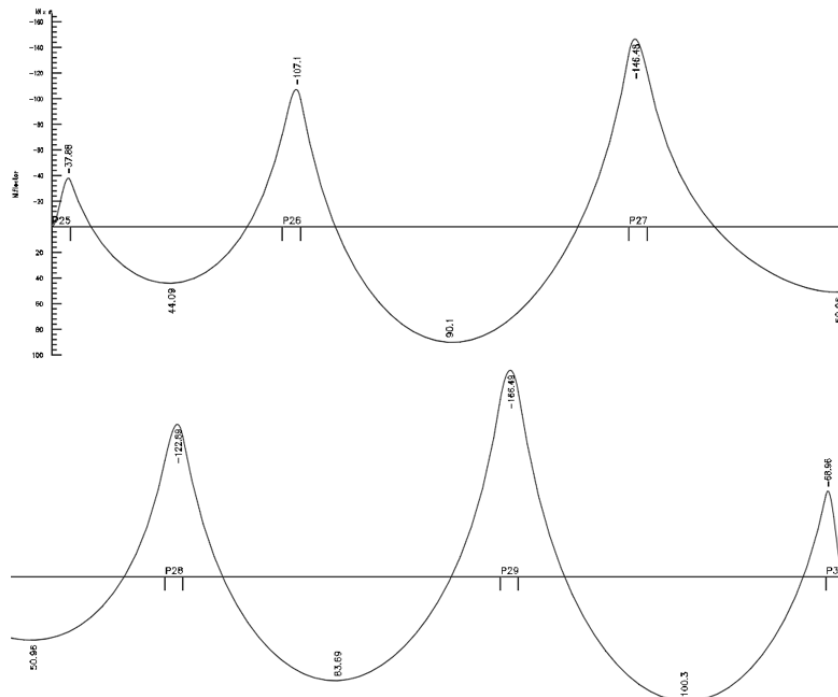


Figura 47- Diagrama de Esforços Inicial – Momento Fletor (sobrecargas de 3KN/m²) – Vão 25-26, vão 26-27, vão 27-28, vão 28-29 e vão 29-30 – Pórtico 5

Na Figura 48, é possível verificar os valores obtidos no diagrama de Momentos Fletores do Pórtico 7, onde se verifica o menor valor no apoio extremo esquerdo P13 (25,83 KN.m) e o valor máximo no apoio P17 (200,21 KN.m).

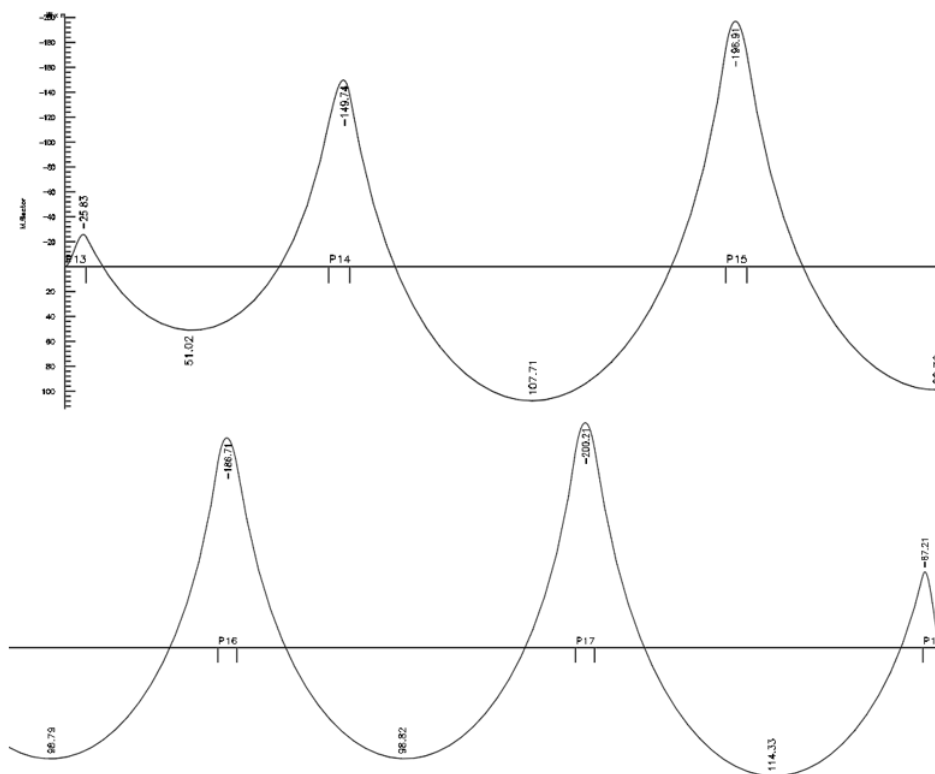


Figura 48- Diagrama de Esforços Inicial – Momento Fletor (sobrecargas de 3KN/m2) – Vão 13-14, vão 14-15, vão 15-16, vão 16-17 e vão 17-18 – Pórtico 7

A Figura 49 diz respeito aos valores dos momentos fletores do Pórtico 9. Relativamente aos apoios, os valores variam entre os 19,35 KN.m no apoio extremo esquerdo P1 e os 92,45 KN.m no apoio intermédio P5. O vão 1-2 apresenta 25,87 KN.m e o vao 5-6 70.22 KN.m

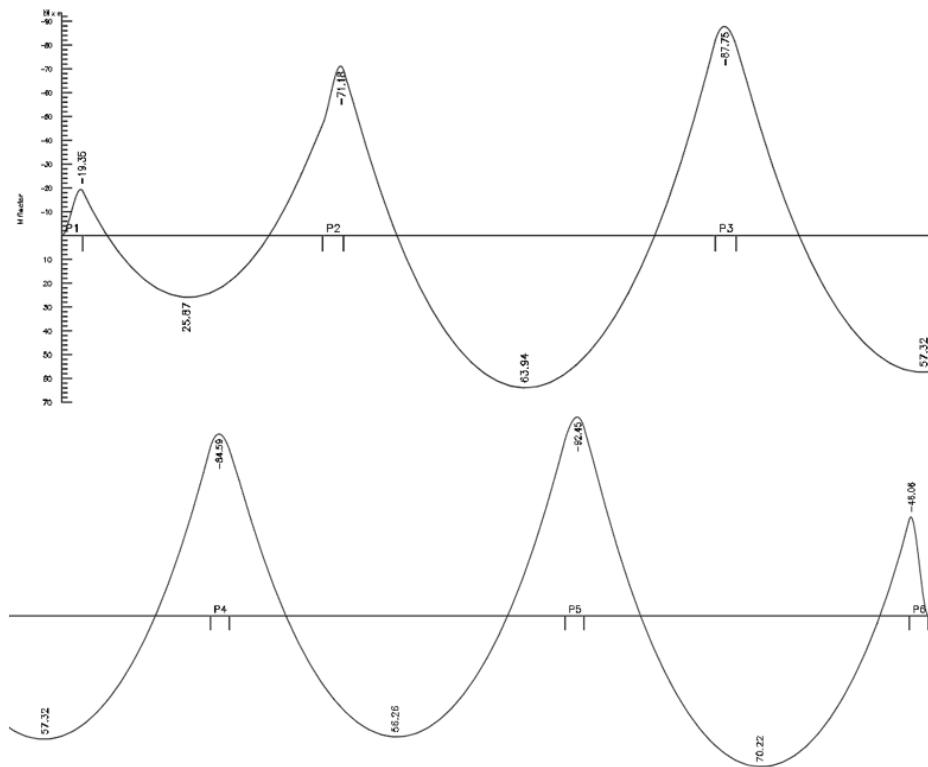


Figura 49- Diagrama de Esforços Inicial – Momento Fletor (sobrecargas de 3KN/m²) – Vão 1-2, vão 2-3, vão 3-4, vão 4-5 e vão 5-6 – Pórtico 9

Os valores dos momentos fletores do Pórtico 11 e Pórtico 12 apresentam-se na Figura 50 e Figura 51, respetivamente.

O Pórtico 11 apresenta no apoio médio P25 o valor mais baixo, (15,37 KN.m) e no apoio P37, o valor mais elevado (92,25 KN.m). O primeiro vão, vão 49-37, é o que apresenta maior valor (76,98 KN.m) e o vão 37-25 é o que apresenta valor mais baixo (29,9 KN.m).

À semelhança do Pórtico 11, o Pórtico 12 apresenta comportamento idêntico: o apoio médio P30, apresenta o valor mais baixo, (39,26 KN.m) e o apoio P42, o valor mais elevado (113,94 KN.m). O primeiro vão, vão 54-42, é o que apresenta maior valor (89,35 KN.m) e o vão 42-30 é o que apresenta valor mais baixo (39,26 KN.m).

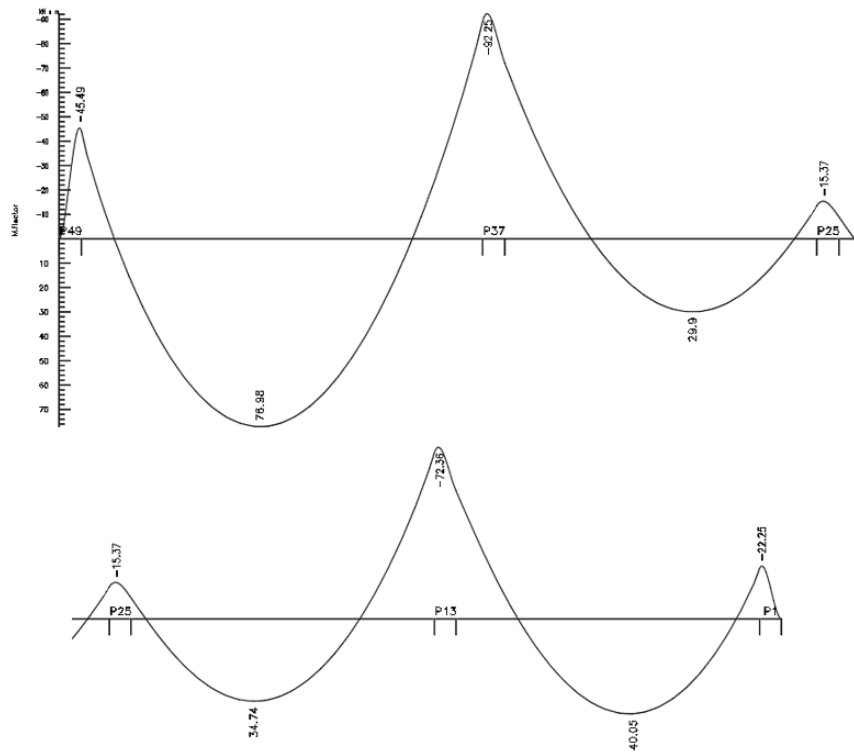


Figura 50- Diagrama de Esforços Inicial – Momento Fletor (sobrecargas de 3KN/m2) – Vão 49-37, vão 37-25, vão 25-13 e vão 13-1 – Pórtico 11

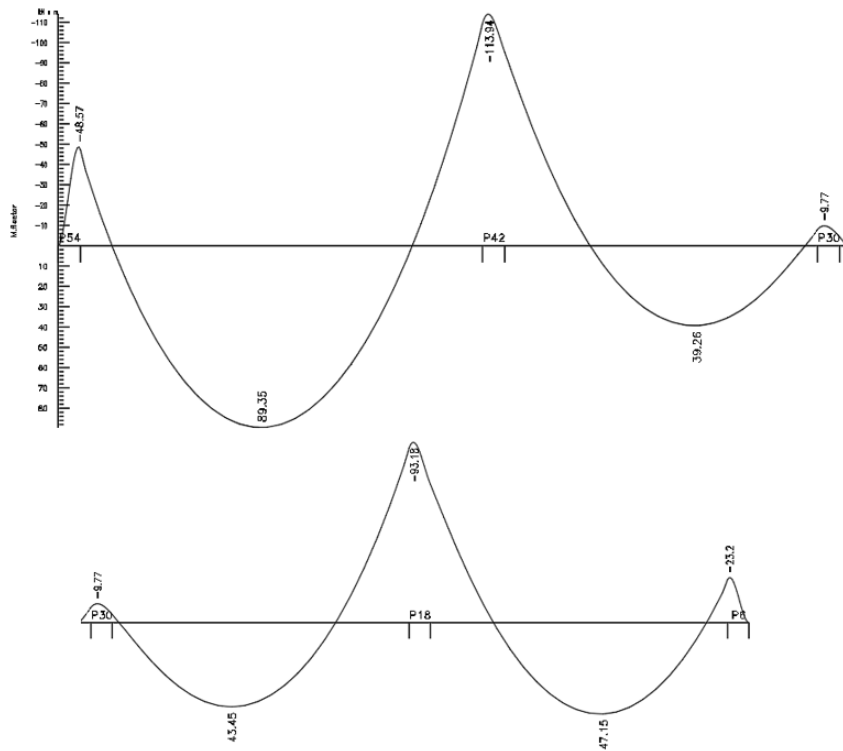


Figura 51- Diagrama de Esforços Inicial – Momento Fletor (sobrecargas de 3KN/m2) – Vão 54-42, vão 42-30, vão 30-18 e vão 18-6 – Pórtico 12

No que diz respeito aos Diagramas de Esforços Transversos da estrutura do Piso 0, para a situação inicial (sobrecarga de 3 KN/m), os mesmos estão representados na Figura 52-Pórtico 1, Figura 53-Pórtico 3, Figura 54 - Pórtico 5, Figura 55 - Pórtico 7, Figura 56 - Pórtico 9, Figura 57 - Pórtico 11 e Figura 58 - 12.

Dos diagramas de esforços abaixo apresentados, podemos retirar que os valores mais elevados se localizam nos seguintes elementos de cada Pórtico:

- Pórtico 1 - no apoio P49 (87,73 KN);
- Pórtico 3 - no apoio P41 (250,43 KN);
- Pórtico 5 – no apoio P29 (201,30 KN);
- Pórtico 7 - no apoio P15 (249,7 KN);
- Pórtico 9 - no apoio P3 (71,10 KN);
- Pórtico 11 - no apoio P37 (81,83 KN);
- Pórtico 12 - no apoio P42 (98 KN).

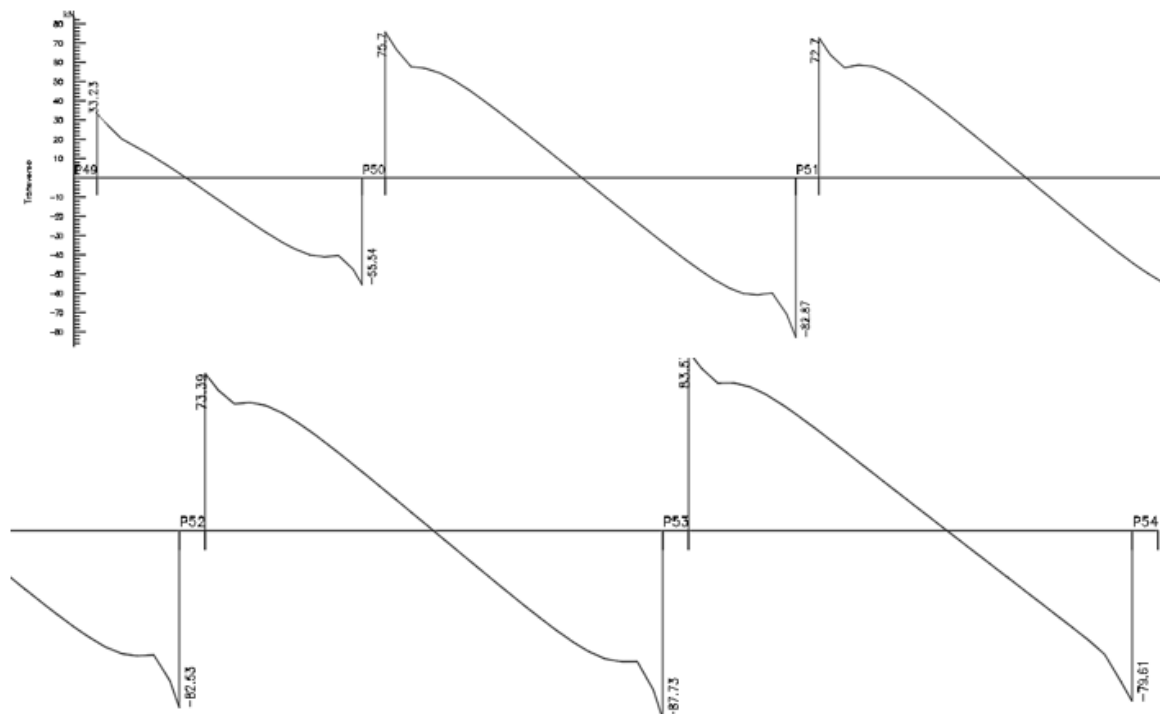


Figura 52- Diagrama de Esforços Inicial – Momento Transverso (sobrecargas de 3KN/m²) – Vão 49-50, vão 50-51, vão 51-52, vão 52-53 e vão 53-54 – Pórtico 1

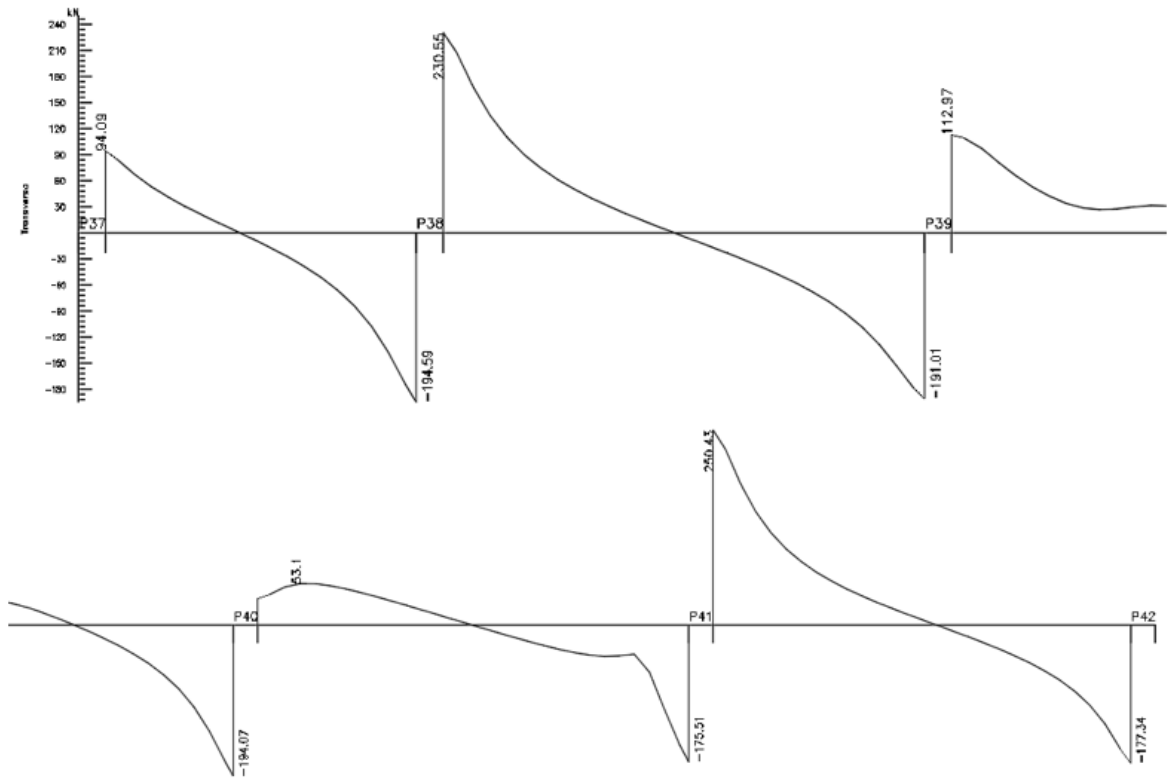


Figura 53- Diagrama de Esforços Inicial – Momento Transverso (sobrecargas de 3KN/m2) – Vão 37-38, vão 38-39, vão 39-40, vão 40-41 e vão 41-2 – Pórtico 3

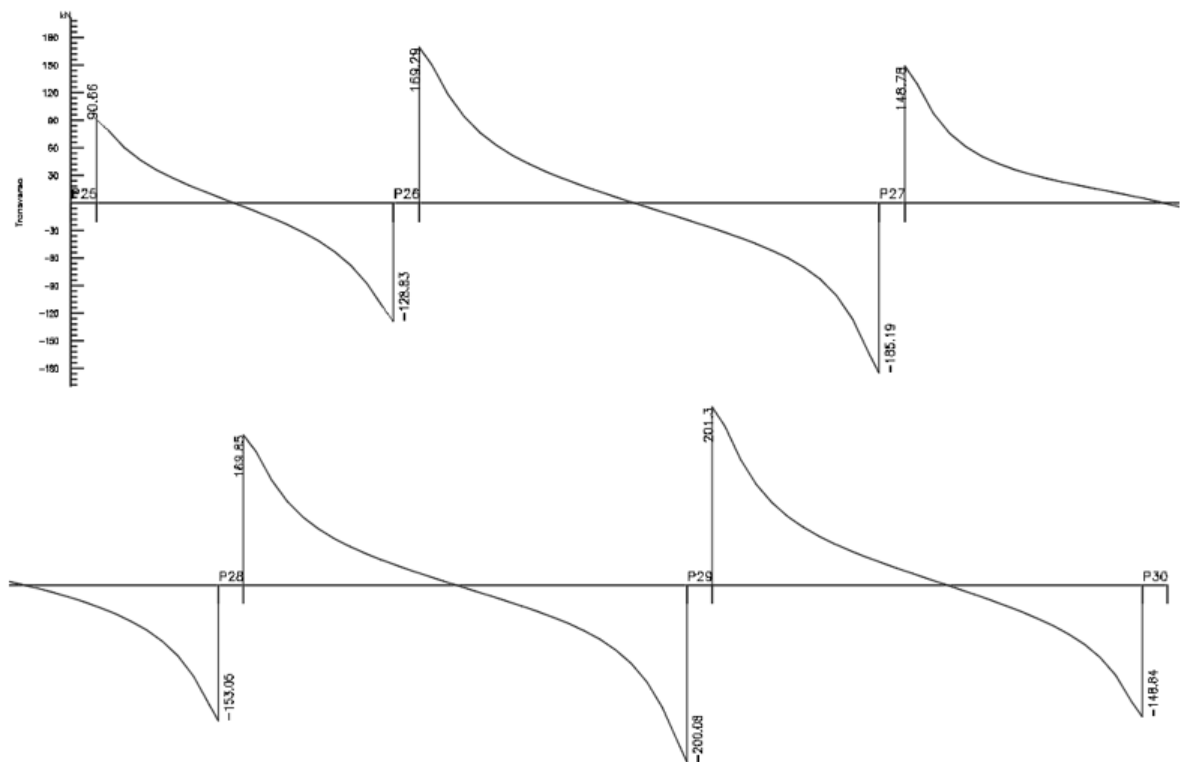


Figura 54- Diagrama de Esforços Inicial – Momento Transverso (sobrecargas de 3KN/m2) – Vão 25-26, vão 26-27, vão 27-28, vão 28-29 e vão 29-30 – Pórtico 5

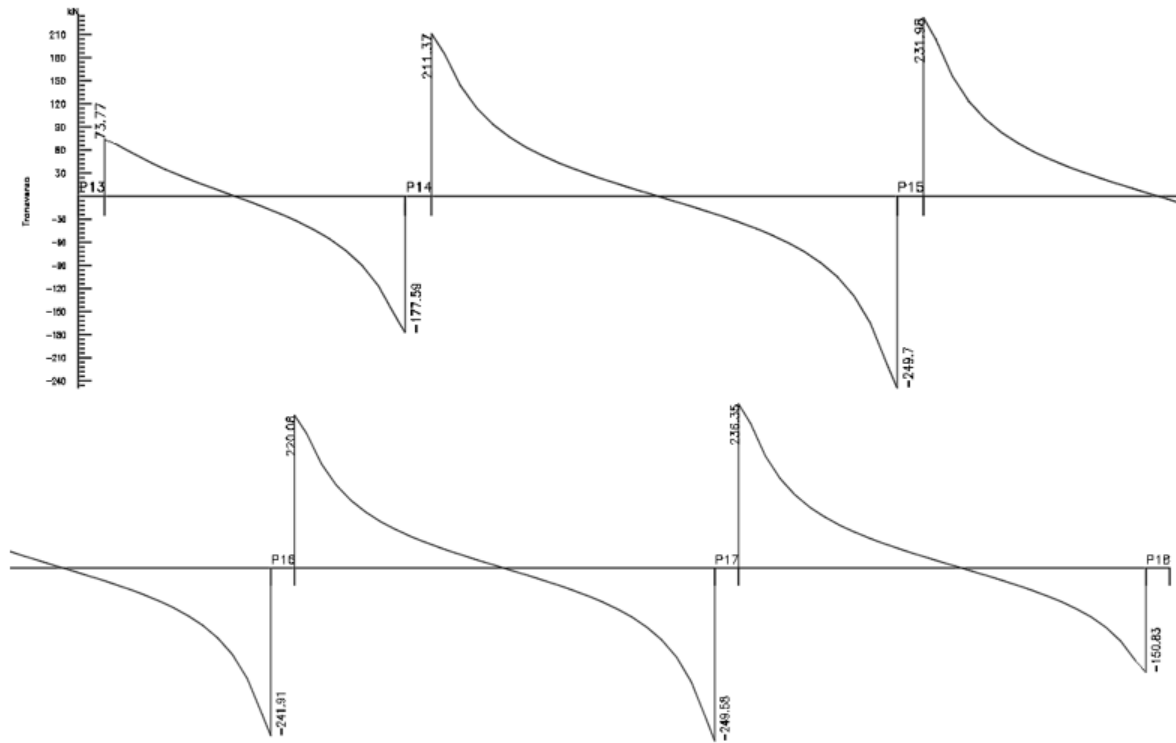


Figura 55- Diagrama de Esforços Inicial – Momento Transverso (sobrecargas de 3KN/m2) – Vão 13-14, vão 14-15, vão 15-16, vão 16-17 e vão 17-18 – Pórtico 7

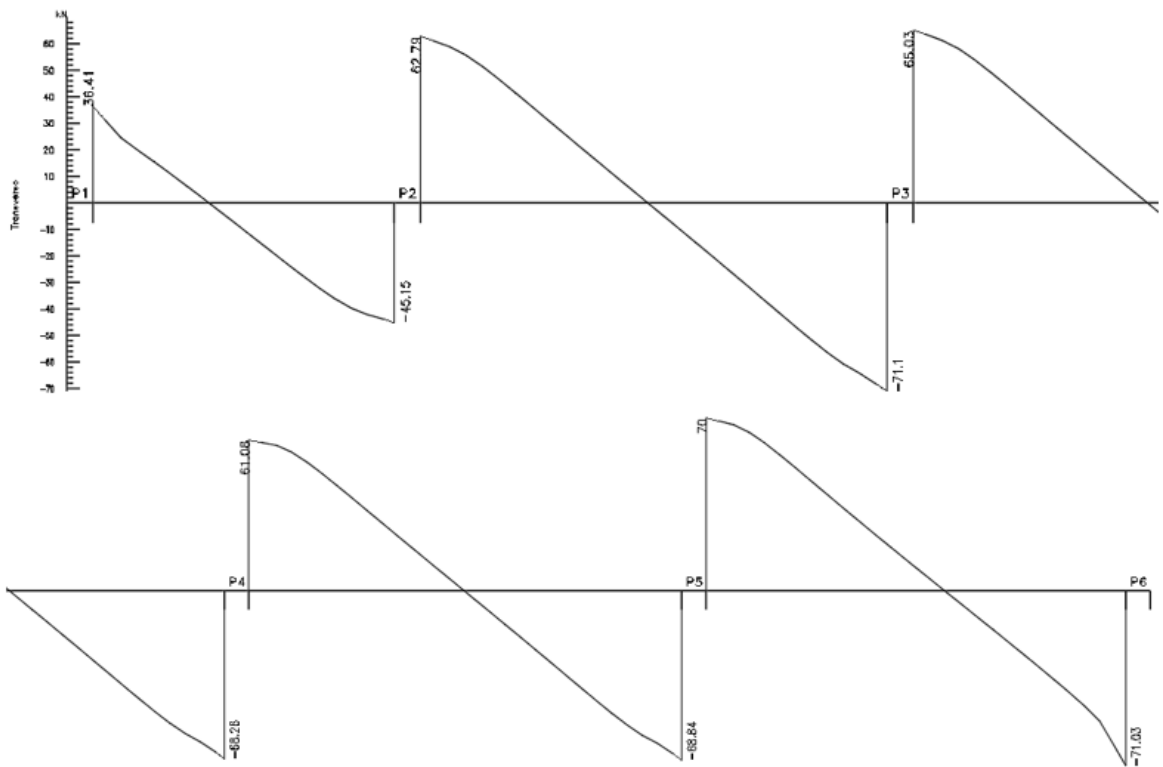


Figura 56- Diagrama de Esforços Inicial – Momento Transverso (sobrecargas de 3KN/m2) – Vão 1-2, vão 2-3, vão 3-4, vão 4-5 e vão 5-6 – Pórtico 9

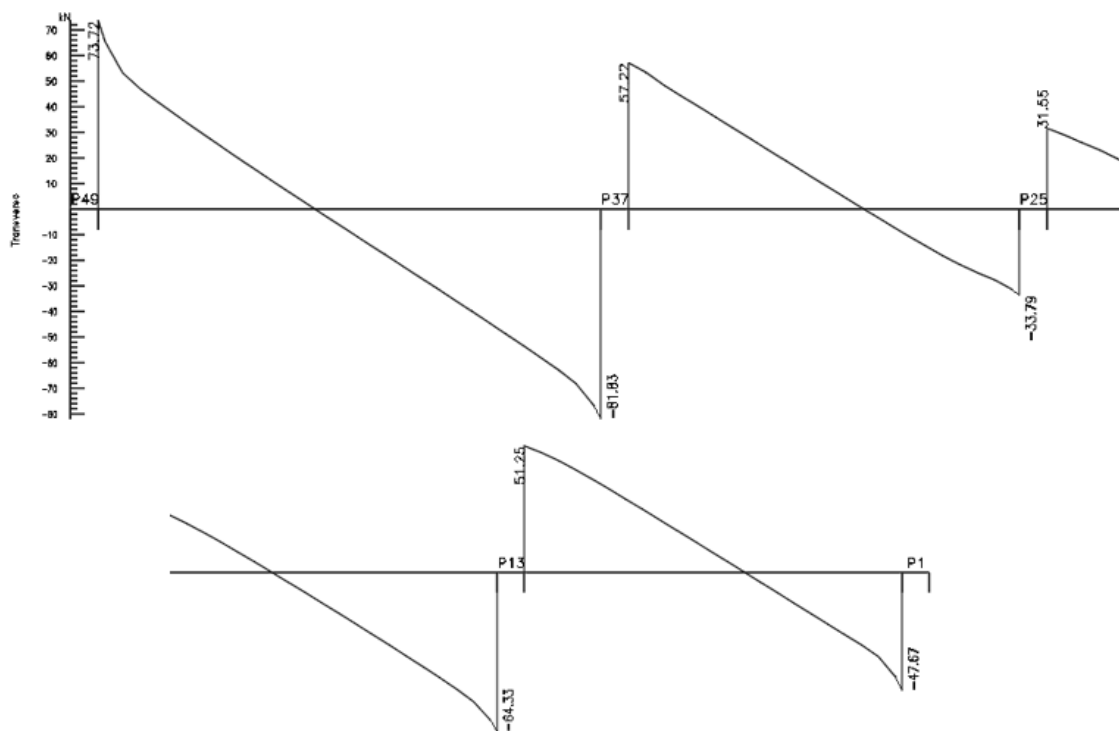


Figura 57- Diagrama de Esforços Inicial – Momento Transverso (sobrecargas de 3KN/m2) – Vão 49-37, vão 37-25, vão 25-13, vão 13-1 – Pórtico 11

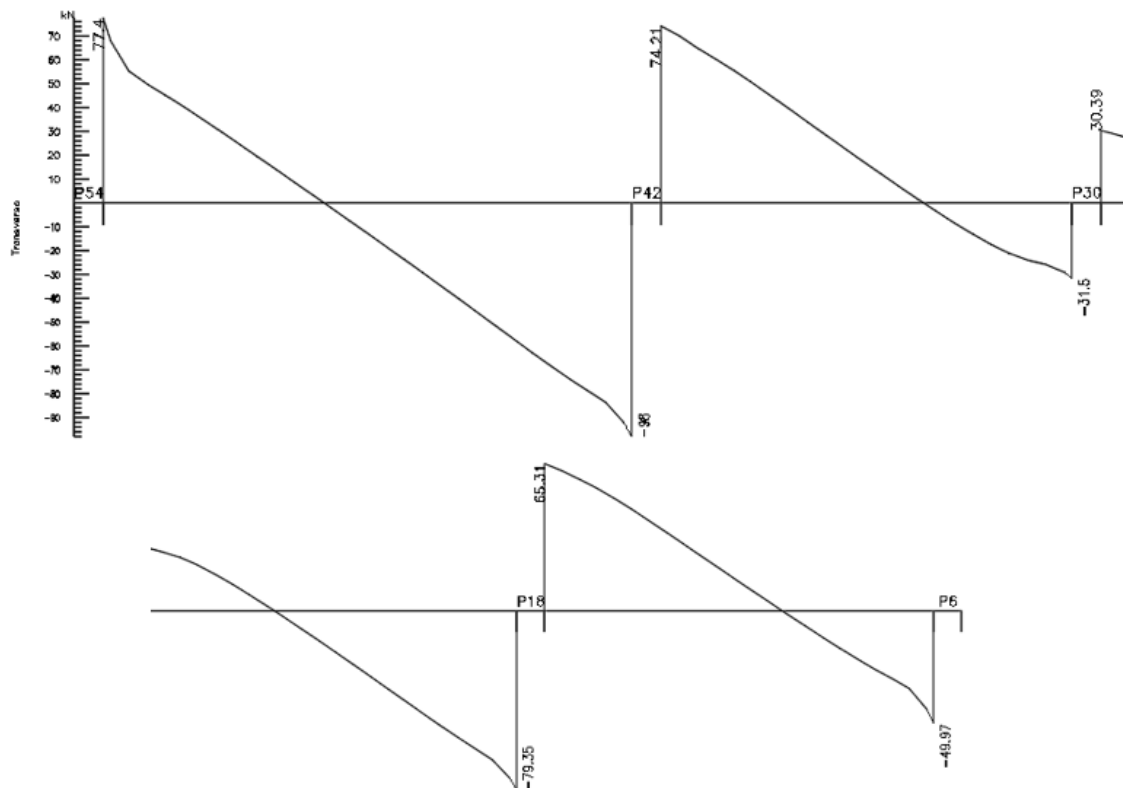


Figura 58- Diagrama de Esforços Inicial – Momento Transverso (sobrecargas de 3KN/m2) – Vão 54-42, vão 42-30, vão 30-18, vão 18-6 – Pórtico 12

Relativamente à nova situação para o Piso 0, de considerar uma sobrecarga de 4KN/m, foram calculados novos diagramas de esforços para momentos fletores e transversos.

Relativamente aos valores dos momentos fletores em cada Pórtico, é possível verificar nas nos Diagramas abaixo a variação máxima e mínima ao longo de cada elemento:

Pórtico 1: os esforços maiores localizam-se no apoio P53 (245,59 KN.m) e no vão 53-54 (138,45 KN.m), enquanto que o apoio P49 e vão 49-50 apresentam menores valores para esforço fletor de 118,24 KN.m e 103,76 KN.m, respetivamente - Figura 59

Pórtico 3: O apoio P41 e o vão 41-42 apresentam valores máximos de 299,63 KN.m e 213,78 KN.m. E de valores mínimos 10,83 KN.m no apoio P37 e 92,49 KN.m no vão 37-38 - Figura 60.

Pórtico 5: é possível verificar no apoio P29 279,75 KN.m e 169,01 KN.m no vão 29-30 e menores valores no apoio P25 (48,44 KN.m) e no vão 25-26 (66,58 KN.m) - Figura 61.

Pórtico 7: verificam-se valores máximos de 319,73 KN.m no apoio P17 e 179,35 KN.m no vão 17-18 e menores valores no apoio P13, de 17,62 KN.m e no vão 13-14, de 79,25 KN.m - Figura 62.

Pórtico 9 - verificam-se valores máximos de 177,27 KN.m no apoio P5 e 126,6 KN.m no vão 5-6 e menores valores no apoio P1, de 27,43 KN.m e no vão 1-2, de 49,06 KN.m - Figura 63.

Pórtico 11: é possível constatar que o Pórtico 49 é o que apresenta maiores esforços, de 384,08 KN.m e o vão 49-37 com 368,31 KN.m. Enquanto que o apoio P1 apresenta esforços de 48,27 KN e o vão 37-25 36,76 KN.m - Figura 64.

Pórtico 12 – O vão 54-42 é o que apresenta maiores valores, de 455,89 KN.m e o apoio P54 com 452,76 KN.m, e os menores esforços verificam-se no vão 42-30 (52,63 KN.m) e no apoio P6 (55,85 KN.m) - Figura 65.

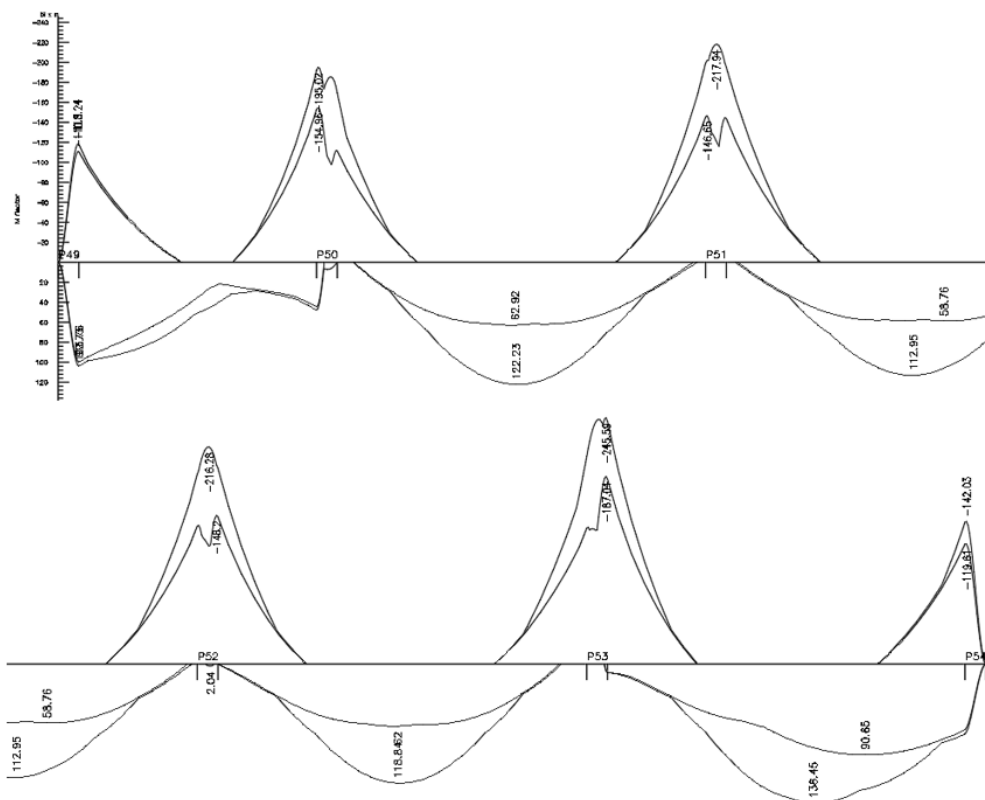


Figura 59- Diagrama de Esforços Final – Momento Fletor (sobrecarga 4KN/m²) - Vão 49-50, vão 50-51, vão 51-52, vão 52-53 e vão 53-54 - Pórtico 1

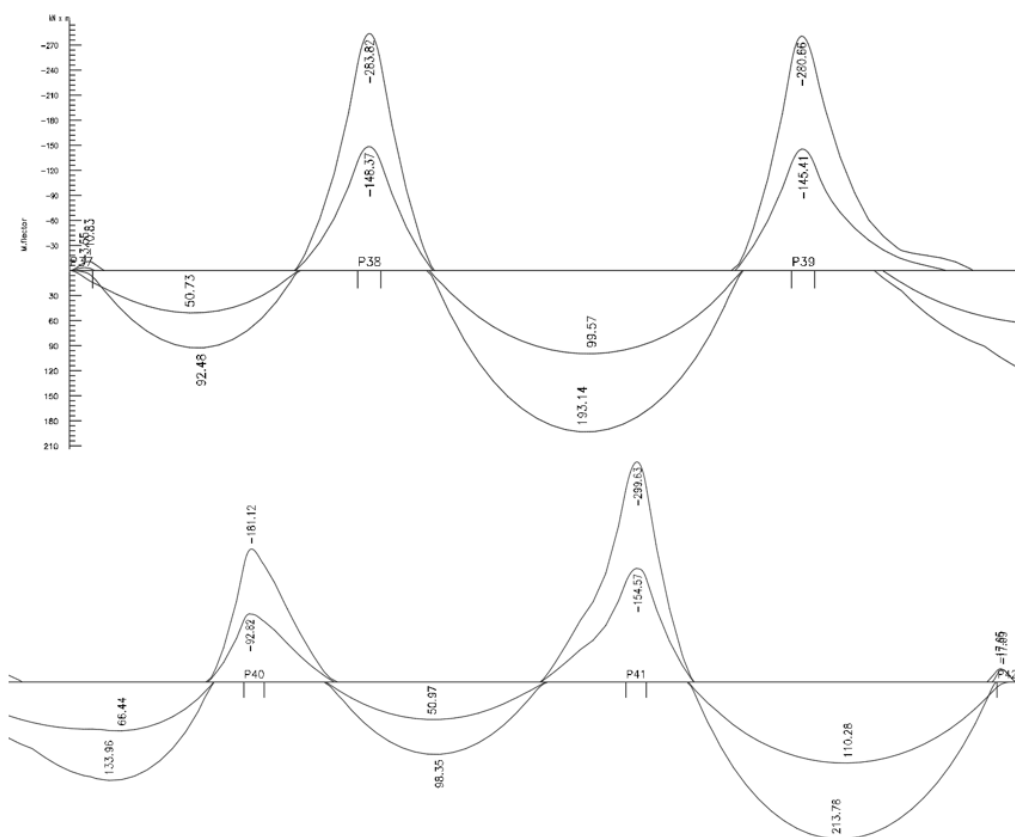


Figura 60- Diagrama de Esforços Final – Momento Fletor (sobrecarga 4KN/m²) - Vão 37-38, vão 38-39, vão 39-40, vão 41-41, vão 41-42 – Pórtico 3

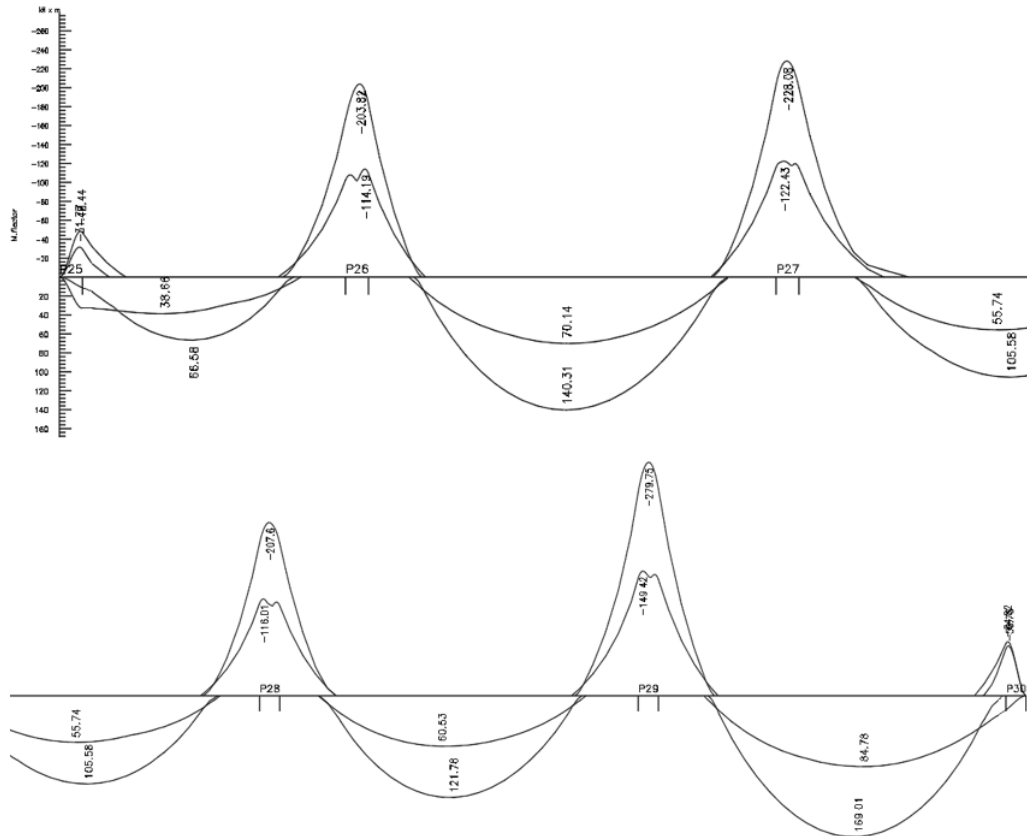


Figura 61- Diagrama de Esforços Final – Momento Fletor (sobrecarga 4KN/m2) - Vão 25-26, vão 26-27, vão 27-28, vão 28-29, vão 29-30 – Pórtico 5

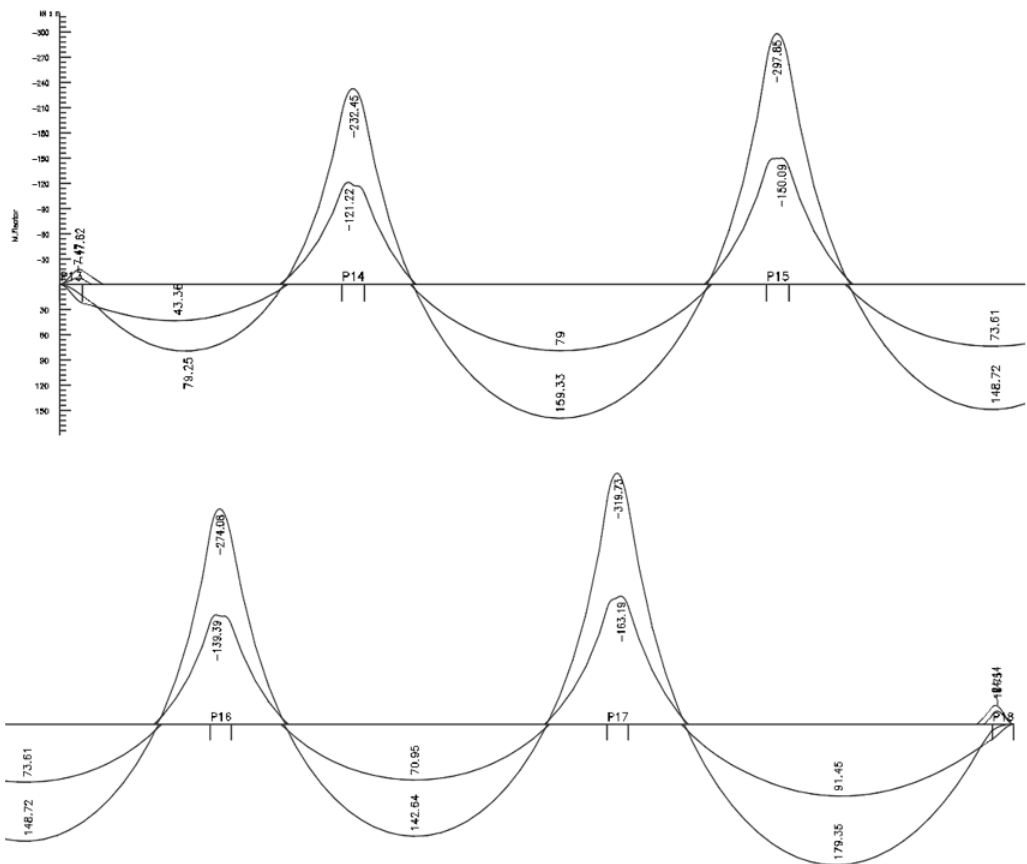


Figura 62- Diagrama de Esforços Final – Momento Fletor (sobrecarga 4KN/m2) - Vão 13-14, vão 14-15, vão 15-16, vão 16-17 e vão 17-18 – Pórtico 7

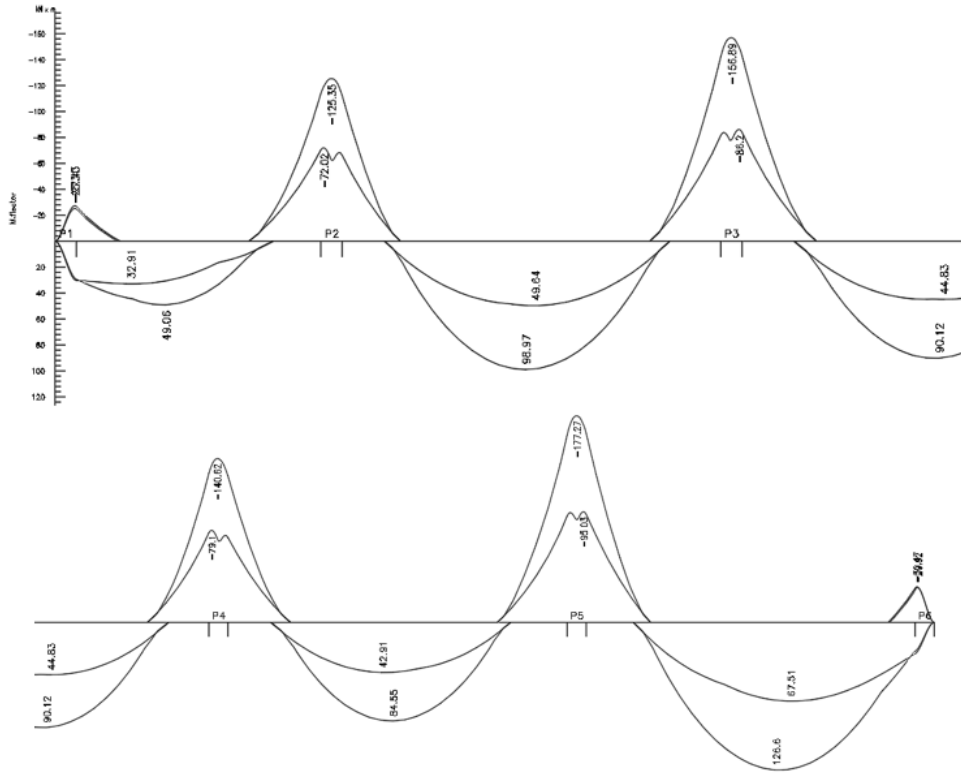


Figura 63- Diagrama de Esforços Final – Momento Fletor (sobrecarga 4KN/m2) - Vão 1-2, vão 2-3, vão 3-4, vão 4-5, vão 5-6 – Pórtico 9

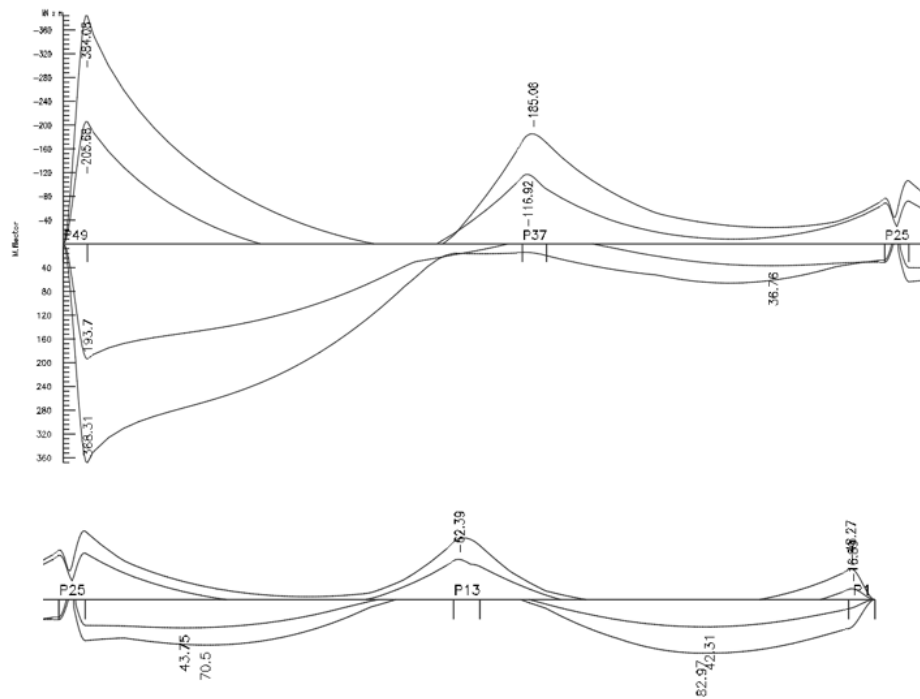


Figura 64- Diagrama de Esforços Final – Momento Fletor (sobrecarga 4KN/m2) – Vão 49-37, vão 37-25, vão 25-13 e vão 13-1 – Pórtico 11

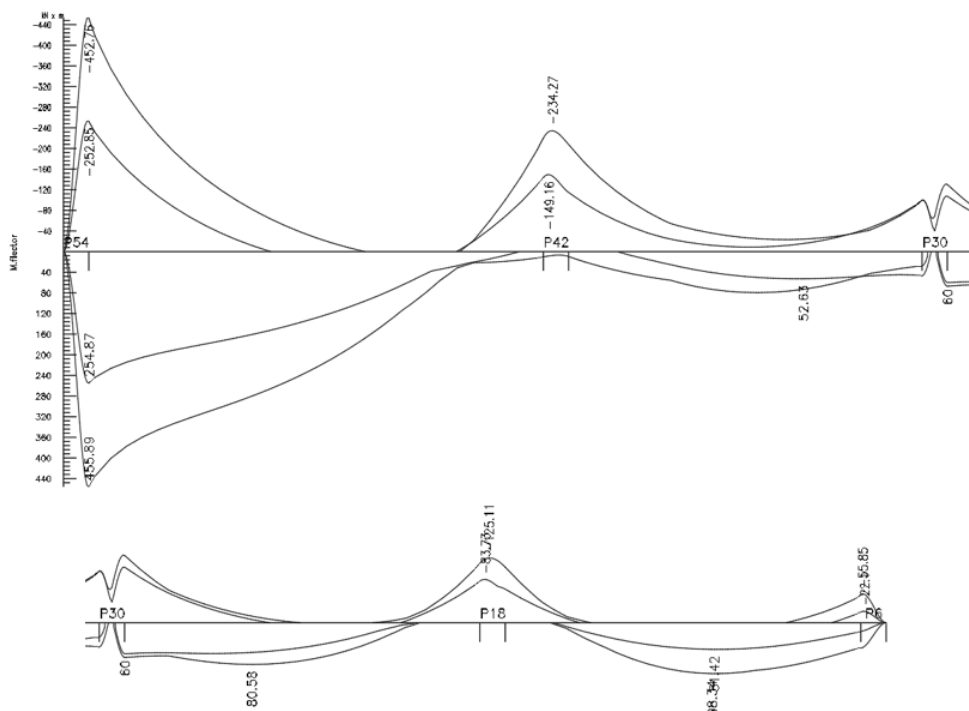


Figura 65- Diagrama de Esforços Final – Momento Fletor (sobrecarga 4KN/m²) – Vão 54-42, vão 42-30, vão 30-18 e vão 18-6 – Pórtico 12

Com o novo dimensionamento do edifício, os Diagramas de Esforços Transversos resultantes para cada elemento do Piso 0 são os correspondentes às seguintes figuras abaixo.

Nos Diagramas abaixo podemos constatar que os valores mais elevados se localizam nos seguintes elementos:

- Pórtico 1 - no apoio P53 (316,11 KN) - Figura 66;
- Pórtico 3 - no apoio P41 (399,58 KN) - Figura 67;
- Pórtico 5 - no apoio P29 (337,19 KN) - Figura 68;
- Pórtico 7 - no apoio P17 (397,13 KN) - Figura 69;
- Pórtico 9 - no apoio P5 (175,11 KN) - Figura 70;
- Pórtico 11 - no apoio P49 (241.37 KN) - Figura 71;
- Pórtico 12 - no apoio P54 (286,3 KN) - Figura 72.

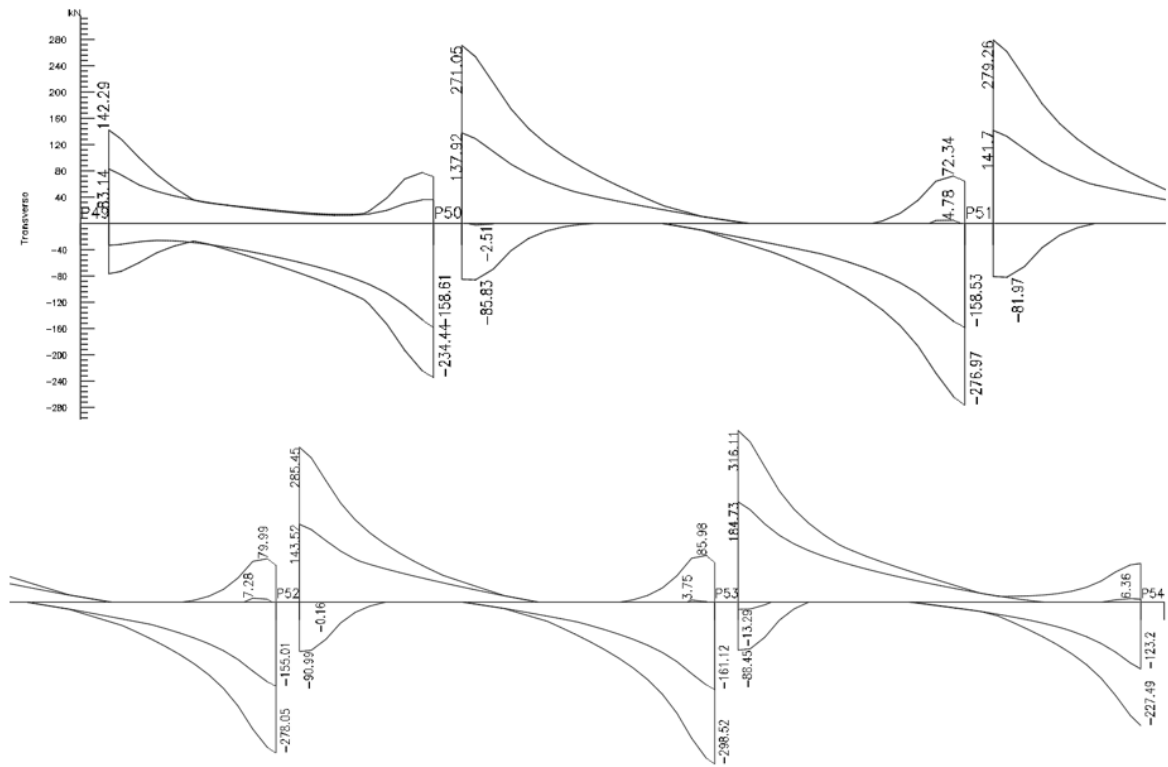


Figura 66- Diagrama de Momentos Final - Esforços Transversos - (sobrecarga 4KN/m2) – Vão 49-50, vão 50-51, vão 51-52, vão 52-53, vão 53-54 – Pórtico 1

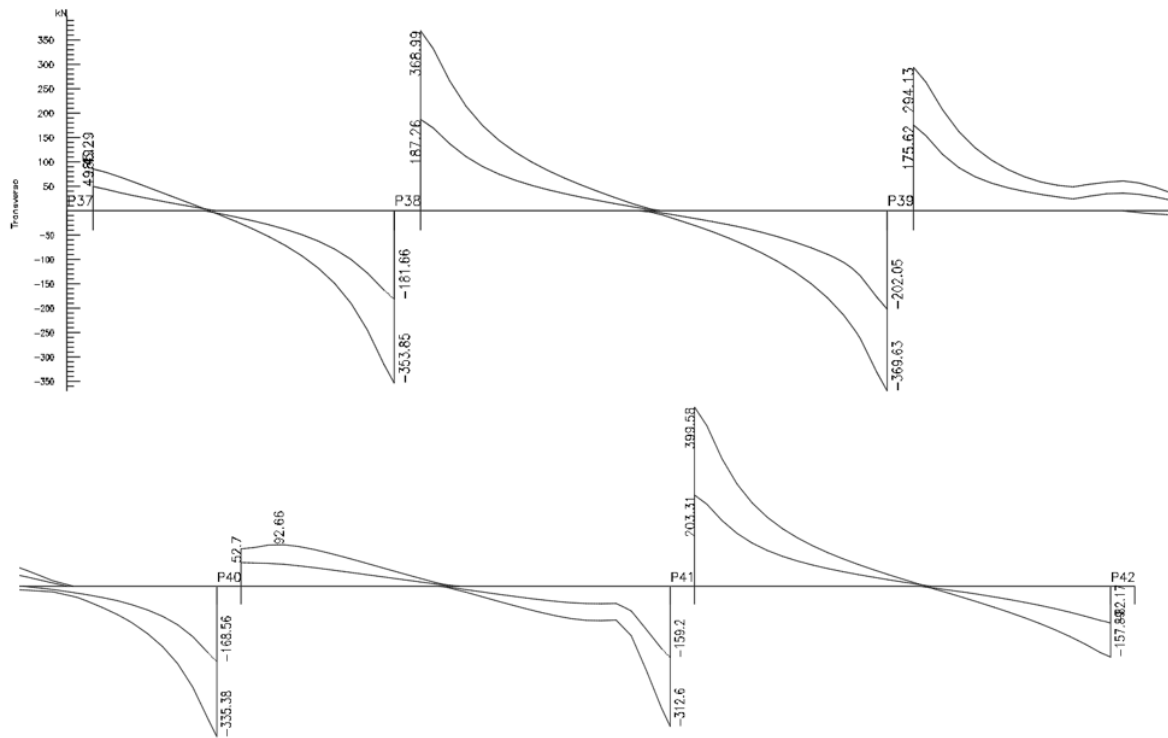


Figura 67- Diagrama de Momentos Final - Esforços Transversos - (sobrecarga 4KN/m2) – Vão 37-38, vão 38-39, vão 39-40, vão 40-41 e vão 41-42 – Pórtico 3

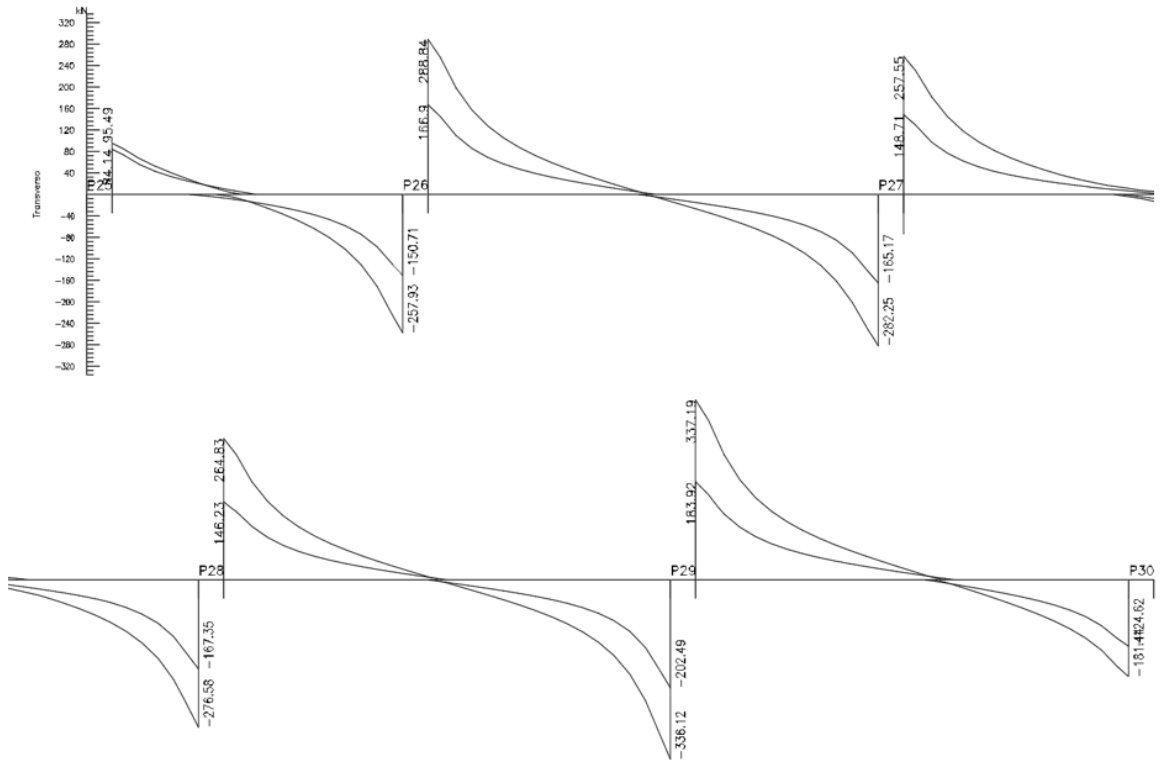


Figura 68- Diagrama de Momentos Final - Esforços Transversos - (sobrecarga 4KN/m2) – Vão 25-26, vão 26-27, vão 27-28, vão 28-29, vão 29-30 – Pórtico 5

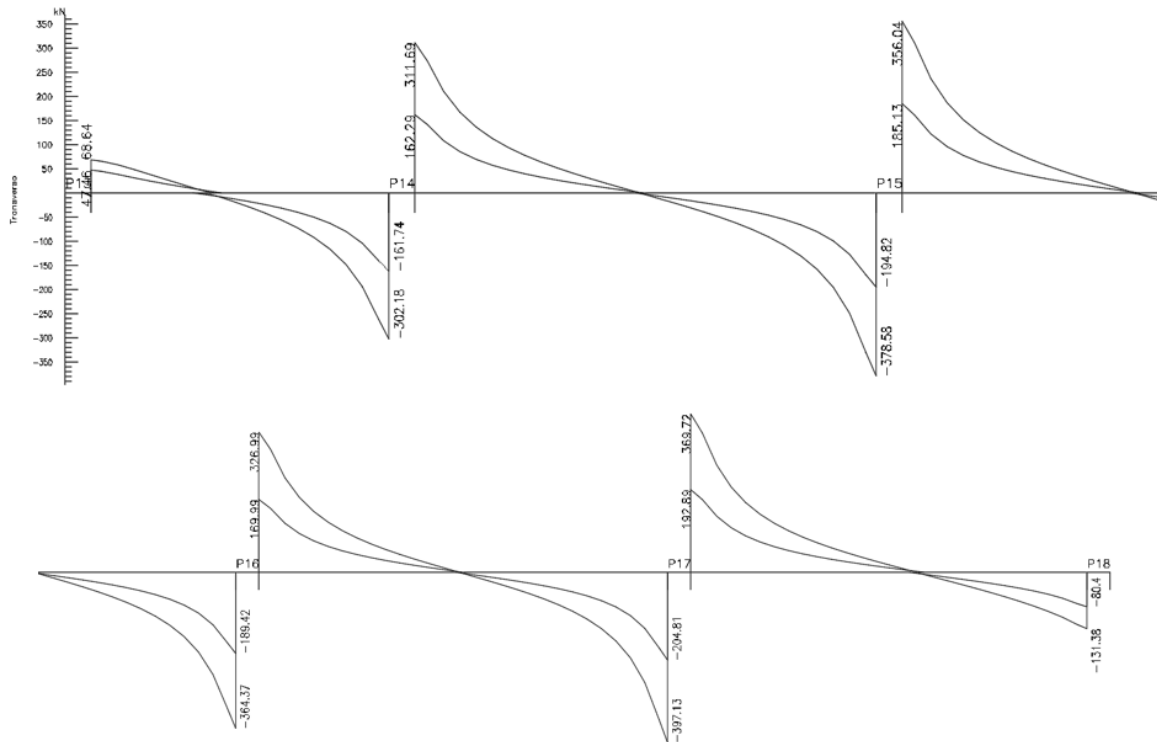


Figura 69- Diagrama de Momentos Final - Esforços Transversos - (sobrecarga 4KN/m2) – Vão 13-14, vão 14-15, vão 15-16, vão 16-17, vão 17-18 – Pórtico 7

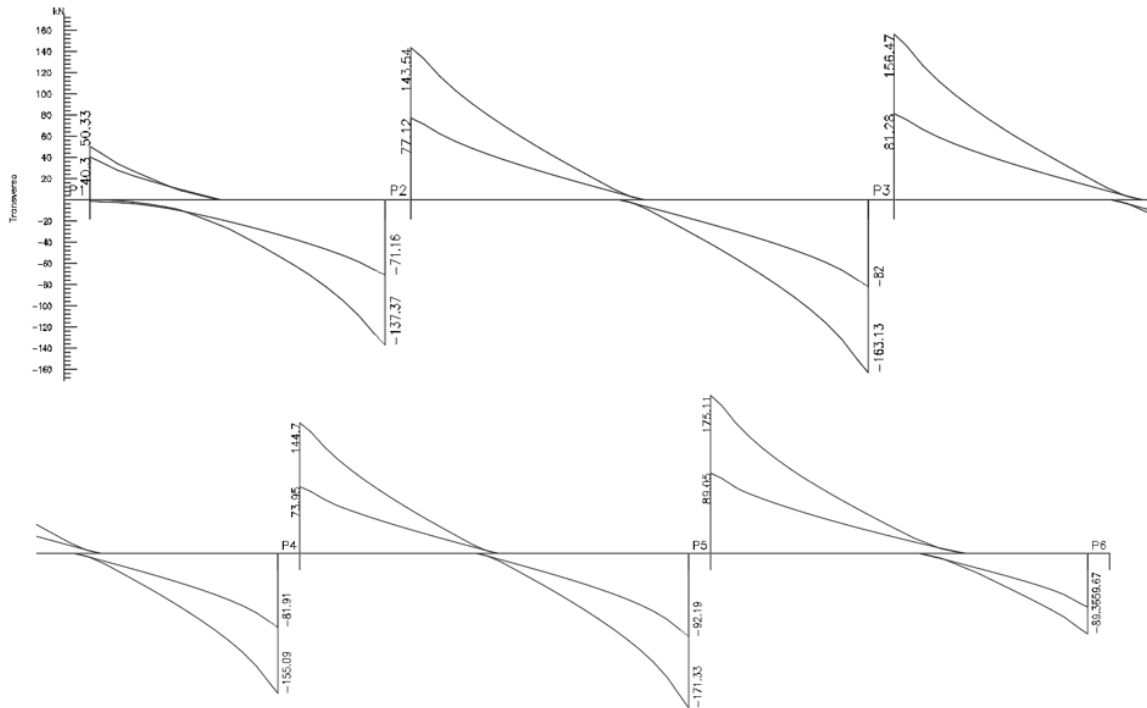


Figura 70- Diagrama de Momentos Final - Esforços Transversos - (sobrecarga 4KN/m2) – Vão 1-2, vão 2-3, vão 3-4, vão 4-5, vão 5-6 – Pórtico 9

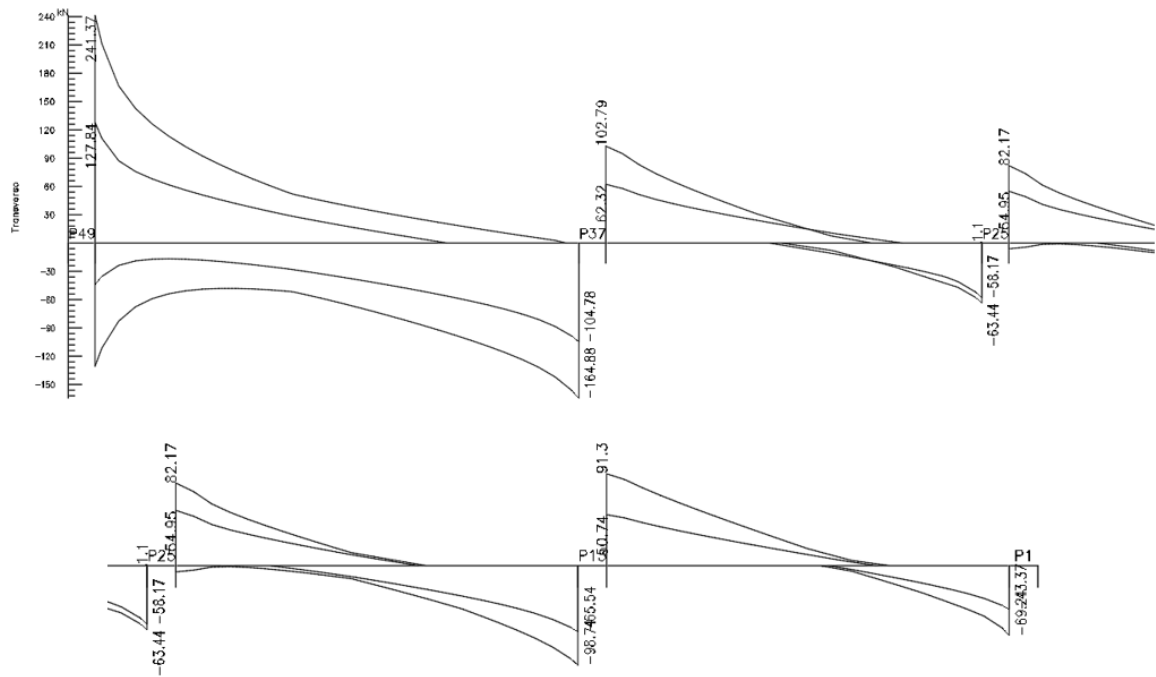


Figura 71- Diagrama de Momentos Final - Esforços Transversos - (sobrecarga 4KN/m2) – Vão 49-37, vão 37-25, vão 25-13 e vão 13-1 – Pórtico 11

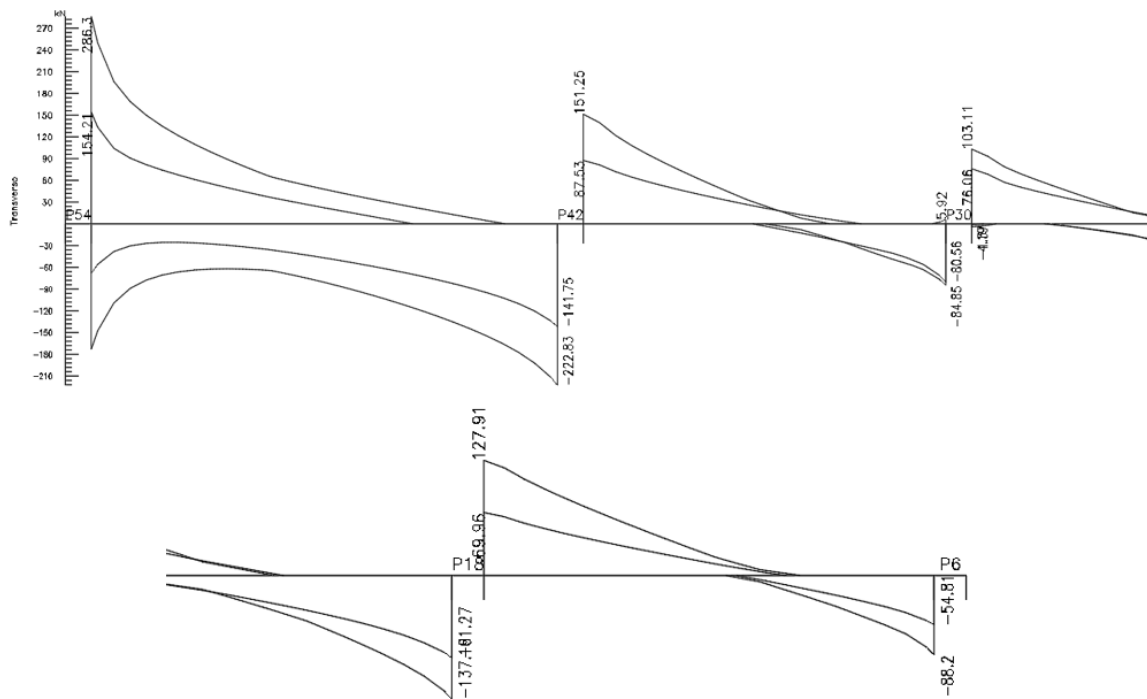


Figura 72- Diagrama de Momentos Final - Esforços Transversos - (sobrecarga 4KN/m²) – Vão 54-42, vão 42-30, vão 30-18 e vão 18-6 – Pórtico 12

Da análise conjunta dos Diagramas de Momentos Fletores e Esforços Transversos para a situação inicial e para a situação final, podemos concluir que:

Pórtico 1: relativamente ao momento fletor, os valores de maiores esforços mantêm-se nos mesmos elementos, com um incremento de 133,20 KN.m no apoio P53 e de 60,3 KN.m na zona do vão 53-54. Quanto ao esforço transversal, com o aumento da sobrecarga, o maior valor mantém-se no apoio P53, com incremento de 311,85 KN;

Pórtico 3: aqui, os valores de maiores esforços também se mantêm nos mesmos elementos, com um incremento de 116,97 KN.m no apoio P41 e de 81,43 KN.m na zona do vão 41-42. Quanto ao esforço transversal, com o aumento da sobrecarga, o maior valor mantém-se no apoio P41, com incremento de 149,15 KN;

Pórtico 5: relativamente ao momento fletor, os valores de maiores esforços mantêm-se nos mesmos elementos, com um incremento de 113,26 KN.m no apoio P29 e de 68,71 KN.m na zona do vão 29-30. Quanto ao esforço transversal, com o aumento da sobrecarga, o maior valor mantém-se no apoio P29, com incremento de 135,89 KN;

Pórtico 7: neste pórtico, os valores de maiores esforços relativamente ao momento fletor mantêm-se também nos mesmos elementos, com um incremento de 119,52 KN.m no apoio P17 e de 65,02 KN.m na zona do vão 17-18. Quanto ao esforço

transverso, com o aumento da sobrecarga, regista-se um incremento de cerca de 148 KN no apoio P17;

Pórtico 9: relativamente às variações registadas quanto aos valores do momento fletor, os valores de maiores esforços mantêm-se nos mesmos elementos, com um incremento de 227,28 KN.m no apoio P5 e de 56,38 KN.m na zona do vão 5-6. Quanto ao esforço transverso, com o aumento da sobrecarga, regista-se alteração no elemento que apresenta maior valor para o esforço transverso. Inicialmente era o apoio P3, que registava 71,10 KN, posteriormente passou a ser o apoio P5, registando 175,11 KN, sendo que o P3 assinala 163,15KN;

Pórtico 11: relativamente ao momento fletor, com o incremento da sobrecarga, verificou-se alteração nos elementos que apresentavam maiores valores, no que aos apoios diz respeito. Assim, passou a ser o apoio P49 (e não o P7) a apresentar maiores esforços. Verifica-se um incremento no valor dos esforços, de cerca de 291,83 KN.m nos apoios. Na zona dos vãos houve um incremento de 291,33 KN.m, registado no vão 49-37. Quanto ao esforço transverso, com o aumento da sobrecarga, o maior valor passou a ser no apoio P49 (e não no apoio P37), sendo que de forma geral, o incremento de valor do esforço transverso é de 159,54 KN;

Pórtico 12: neste pórtico registou-se também alteração nos elementos de apoios que apresentam maiores valores para o momento fletor. Assim, passou a ser o apoio P54 a apresentar maior valor (e não o P42), registando-se um incremento de 338,82 KN.m. No que aos vãos diz respeito, o maior valor regista-se igualmente no vão 54-42, havendo um incremento considerável de 366,54 KN.m. Relativamente ao esforço transverso inicialmente era o apoio P42 a registar maiores esforços, mas, posteriormente passou a ser o apoio P54, sendo o incremento de 188,30KN.

Perante os resultados obtidos o Pórtico 11 e o Pórtico 12 são os que apresentam maiores incrementos e alterações na distribuição de esforços, tanto no Diagrama de Momentos Fletores como no de Esforços Transversos.

4.3 REFORÇO À FLEXÃO E AO CORTE USANDO MATERIAIS DE FRP

Para a realização do dimensionamento dos reforços FRP utilizou-se o programa de cálculo *FRP Lamella*, da S&P. Este programa foi desenvolvido em ambiente operativo Windows: Ein9x, 2000, NT, XP, Vista, Windows 7.

No programa, entrada de dados faz-se através de várias janelas que sucessivamente vão surgindo, de acordo com os tópicos: *informação geral*, *secção transversal*, *solicitações*, *reforço à flexão* e *reforço ao corte*.

Os resultados são também apresentados em janelas adicionais, classificadas de acordo com os tópicos: *informação geral*, *reforço à flexão* e *reforço ao corte*.

Os títulos das diferentes janelas de entrada de dados são listados em forma de “árvore” na parte esquerda do ecrã, conforme se pode visualizar na Figura 73.

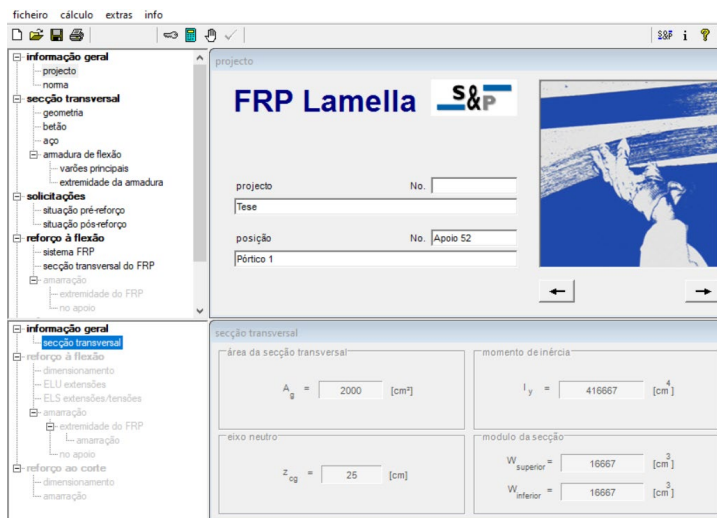


Figura 73- Programa FRP Lamella - Aspetto geral do layout inicial

4.3.1 Interface do programa “FRP Lamella”

4.3.1.1 Entrada de dados

Os cálculos iniciam-se com a entrada de dados, onde se insere a informação relativa à geometria da viga (Figura 74). Este programa permite a possibilidade de reforçar secções transversais tipo: lajes, vigas retangulares, vigas-T e vigas-I. Neste caso particular trata-se do dimensionamento de reforços em vigas 40x50 (cm) e pilares 40x40 (cm).

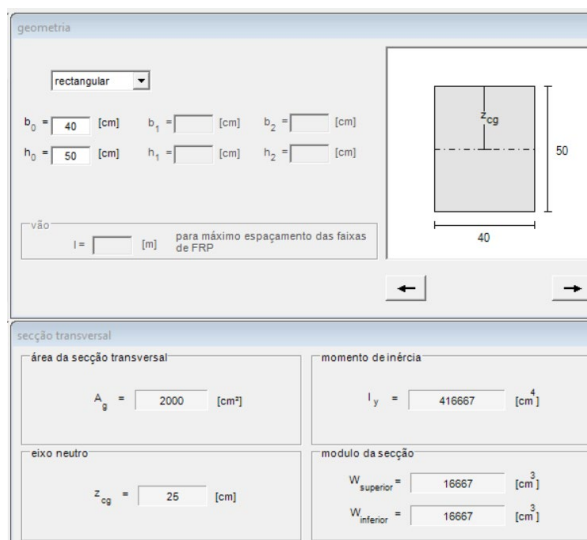


Figura 74- Programa FRP Lamella - Dados relativos à geometria da viga

Depois da entrada dos dados geométricos dos elementos os valores da secção transversal são calculados e exibidos na parte inferior:

- A área da secção transversal A_g da peça estrutural;
- A posição do eixo neutro z_{cg} da secção transversal em relação ao topo da peça;
- O momento de inércia I_y da secção transversal em questão;
- O módulo da secção $W_{superior}$ e $W_{inferior}$ aplicado ao topo e a base da secção transversal.

Seguidamente, numa nova janela, inserem-se os dados relativos ao betão considerado no projeto (Figura 75), neste caso o C25/30.

The screenshot shows the 'betão' (concrete) properties window. It is divided into two main sections: 'propriedades' (properties) and 'secção transversal' (cross-section).

propriedades:

- classe: C 25/30
- f_{ck} = 25 [N/mm²]
- α_{cc} = 1 [-]
- ϵ_{cu} = 3.5 [%]
- ϵ_{c2} = 2 [%]
- E_{cm} = 31476 [N/mm²]
- α_{ct} = 1 [-]
- f_{ctm} = 2.56 [N/mm²]

coeficiente de segurança parcial:

- γ_c = 1.5 [-]

secção transversal:

- área da secção transversal: A_g = 2000 [cm²]
- momento de inércia: I_y = 416667 [cm⁴]
- eixo neutro: z_{cg} = 25 [cm]
- módulo da secção: $W_{superior}$ = 16667 [cm³], $W_{inferior}$ = 16667 [cm³]

On the right side of the 'propriedades' section, there is a graph of stress σ_c versus strain ϵ_c . The curve shows a parabolic-rectangular shape. Key points on the graph are labeled: E_{cm} at the origin, ϵ_{c2} at the end of the parabolic part, f_{ck} at the peak stress, and ϵ_{cu} at the end of the rectangular part. The stress at ϵ_{c2} is labeled as $\frac{\alpha_{cc} \cdot f_{ck}}{\gamma_c}$.

Figura 75- Programa FRP Lamella - Dados relativos ao betão

Para além da classe do betão, tem-se também em consideração:

- a resistência característica do betão f_{ck} ;
- o fator de redução α_{cc} , o coeficiente que tem em conta os efeitos de longo prazo na resistência à compressão. Considera-se aqui o valor recomendado pelo EC 2, $\alpha_{cc}=1,0$;
- o valor da extensão última do betão ϵ_{cu} , que é limitado a 3,5 [%], de acordo com EC 2;
- a extensão no eixo da curva parabólica ϵ_{c2} e assumida com 2,0[%], de acordo com EC 2;
- o módulo de elasticidade médio do betão E_{cm} , necessário para o cálculo em estado não fissurado da peça estrutural;
- o fator de redução α_{ct} , coeficiente que tem em conta os efeitos a longo prazo na resistência à tração. Considera-se o valor recomendado pelo EC2, $\alpha_{ct}=1,0$;

- o valor médio da resistência à tracção do betão f_{ctm} , que define a transição entre a fase não fissurada e estado fissurado da secção transversal;
- o coeficiente de segurança parcial γ_c para o betão, predefinido como $\gamma_c=1,5$, de acordo com o EC 2.

E posteriormente, numa outra janela inserem-se os dados relativos ao aço considerado (Figura 76), que neste caso foi A500.

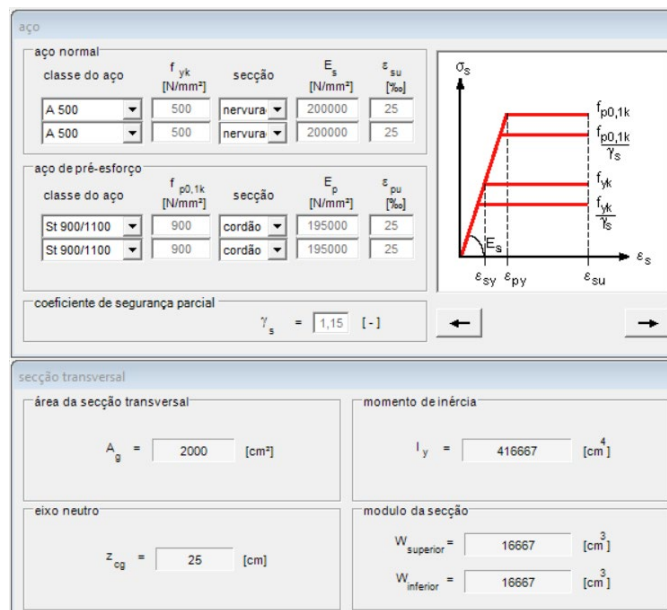


Figura 76- Programa FRP Lamella - Dados relativos ao Aço

Com a introdução destes dados, o gráfico exibe o diagrama de tensões-extensões.

Relativamente ao coeficiente de segurança parcial γ_s para o aço, considera-se 1,15, de acordo com EC 2.

Numa fase posterior, são introduzidos os dados relativos à armadura de flexão considerada em projeto, no que diz respeito aos diâmetros dos varões principais e sua localização no elemento (Figura 77), bem como informação relativamente ao pormenor das armaduras existentes nos apoios (Figura 78).

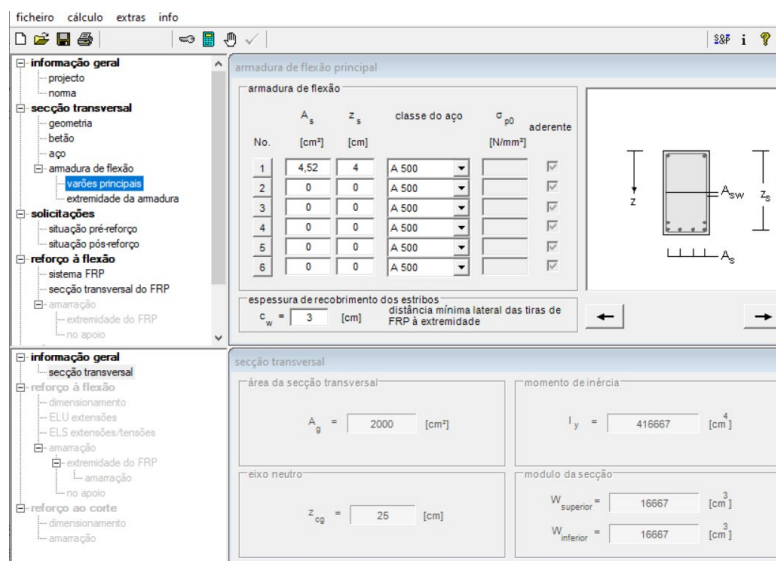


Figura 77- Programa FRP Lamella - Dados relativos à armadura de flexão

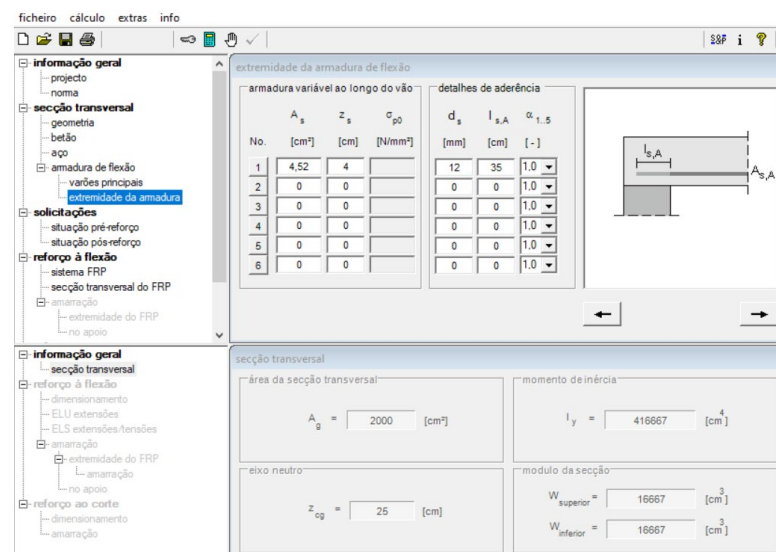


Figura 78- Programa FRP Lamella – Dados relativos à extremidade da armadura

Seguidamente inserem-se os dados relativos às solicitações na situação pré-reforço (Figura 79) e pós reforço (Figura 80).

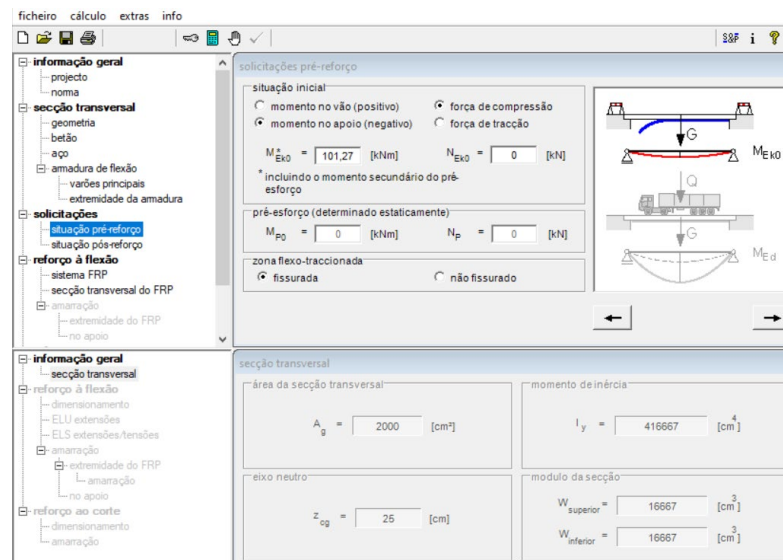


Figura 79- Programa FRP Lamella – Solicitações pré-reforço

A janela de entrada de dados *solicitações pré-esforço* define as cargas/ações instaladas antes do reforço com FRP. As tensões geradas no elemento de betão são tomadas em consideração para o cálculo.

Nesta fase tem que se escolher o tipo de cálculo momento positivo (momento no vão) ou negativo (momento no apoio).

Introduz-se o valor do momento fletor característico M_{Ek0} instalado durante a aplicação do reforço FRP. Este valor define o estado inicial de tensões na seção transversal.

O esforço axial característico N_{Ek} resulta das cargas impostas. As forças de compressão têm um efeito positivo e podem ser ignoradas.

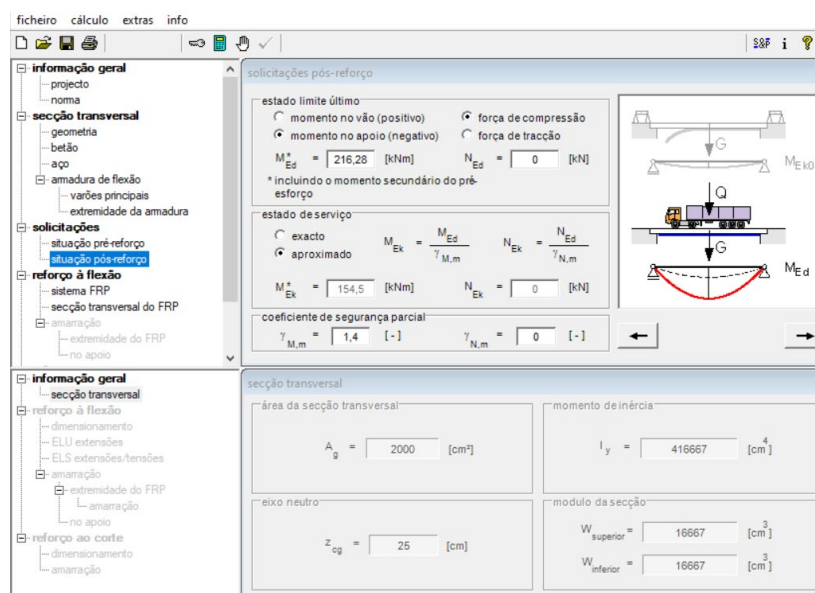


Figura 80- Programa FRP Lamella – Solicitações pós-Reforço

A janela de entrada de dados em estado pós-reforço define as futuras cargas/ações. Nesta fase introduz-se os momentos flectores impostos ao elemento de betão armado após o reforço com FRP.

Deve ser considerado o momento de cálculo M_{Edf} para as cargas esperadas considerando um fator de segurança parcial γ para as cargas permanentes e sobrecargas assim como para as combinações de ações ψ .

Relativamente ao fator de segurança γ considera-se 1,4 (EC 2 apresenta uma gama de valores entre 1,35 a 1,5).

Na fase seguinte, há a possibilidade de seleccionar o sistema FRP mais adequado que, se tratando de um programa desenvolvido pela empresa S&P, tem listado como possível solução todos os produtos por eles desenvolvido (Figura 81). A janela *sistema FRP* exhibe as propriedades dos CFRP laminados e mantas. Os valores de segurança e de redução, bem como os limites de extensões são pré-seleccionados de acordo com a Norma escolhida.

Nesta interface, para além da seleção do sistema FRP a considerar, é necessário também escolher a opção relativamente ao método construtivo a utilizar (no caso dos laminados) – método externamente aderido (EBR), ou método com laminado inserido (NSM). Para situações em que se tenha optado pela utilização de mantas, já não é necessário decidir pelo método de execução, pois automaticamente fica seleccionado o método externamente aderido (EBR).

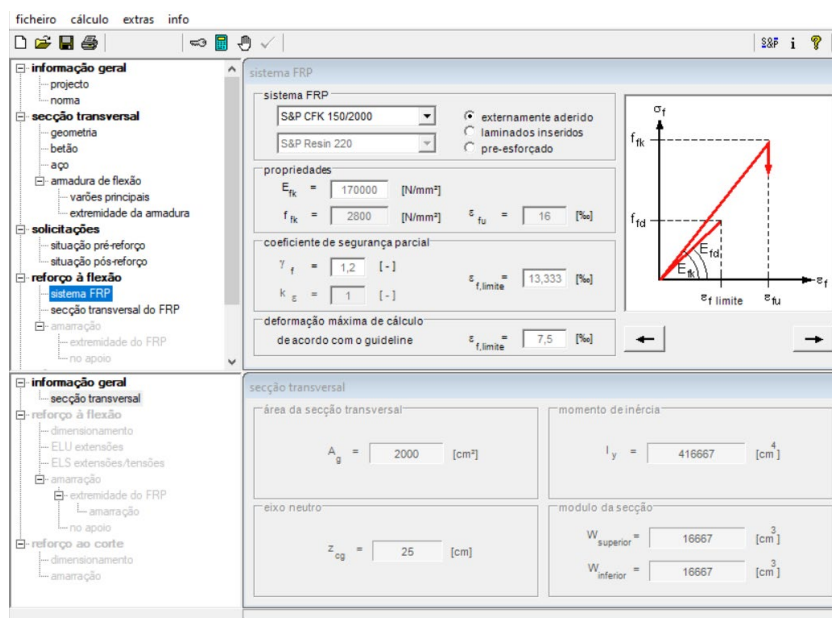


Figura 81- Programa FRP Lamella – Seleção do tipo de reforço e método a utilizar

Na janela de entrada de dados *secção transversal FRP – reforço de FRP* é necessário introduzir o número e disposição dos produtos FRP - Figura 83.

secção transversal do FRP

reforço de FRP

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

$s_{f,max}$

$z_{f,min}$

distancia até a extremidade

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

← →

Figura 82- Programa FRP Lamella – secção transversal do FRP

Para cada nível define-se a secção transversal de FRP, dependendo da solução escolhida.

Introduz-se o número de camadas FRP, n_f , colocado em sobreposição. Para laminados podem ser consideradas no máximo 2 camadas e cinco camadas para mantas.

No caso das vigas, introduz-se o número do FRP, m_f , colocado justaposto lado a lado. O espaçamento, s_f , entre faixas de reforço é calculado.

Para cada nível é calculada a área de secção transversal, A_f .

4.3.1.2 Dimensionamento do Reforço

Introduzidos todos os dados já referidos anteriormente e selecionado o reforço, é exibido então o resultado do dimensionamento do reforço considerado numa janela inferior, com a indicação da área da secção transversal do sistema de FRP escolhido ($A_{f, \text{efet}}$), (Figura 83), podendo esta ser comparada com a área da secção transversal necessária ($A_{f, \text{nec}}$), verificando-se ou não a viabilidade do reforço selecionado.

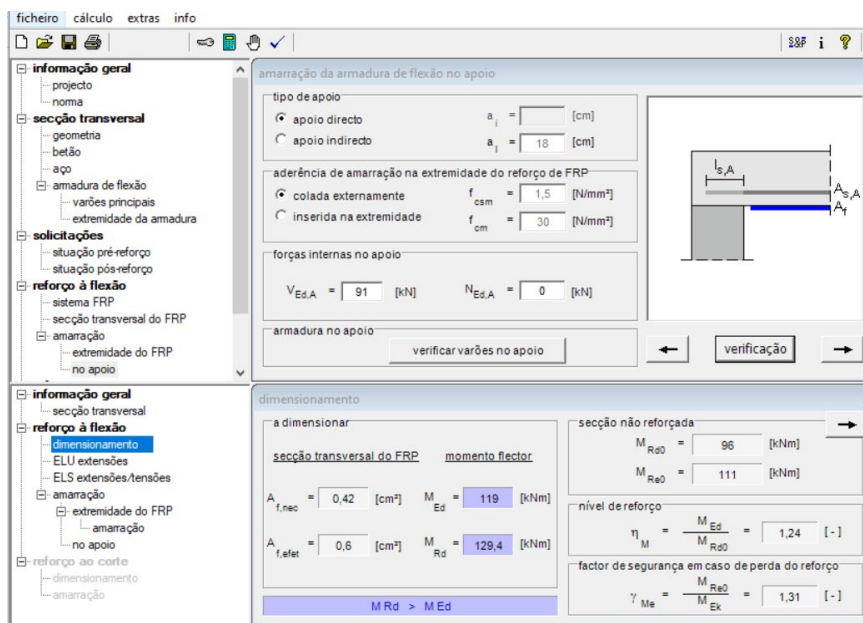


Figura 83- Programa FRP Lamella – Dimensionamento do Reforço (janela inferior)

O momento fletor resistente da secção reforçada, M_{Rd} , é determinado pela iteração adicional tendo em consideração a área de secção transversal efetiva do reforço FRP. Na linha de verificação a capacidade resistente, M_{Rd} , é comparada com o momento fletor atuante M_{Ed} .

O nível de reforço η indica o rácio entre o momento de cálculo atuante, M_{Ed} , da peça em estado reforçado e o momento resistente M_{Rd0} da secção não reforçada. De acordo com o guideline alemão $\eta < 2$ para reforços com FRP externamente aderidos.

4.3.1.3 Saída de resultados (ELU) e (ELS)

A janela de saída de resultados *extensões em estado limite último (ELU)* exhibe os diagramas de extensões iniciais e adicionais - Figura 84.

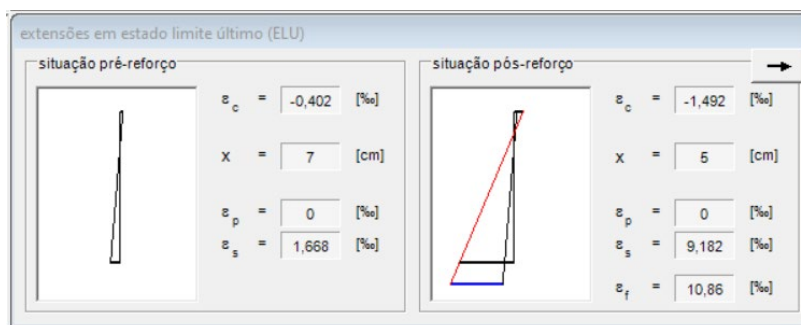


Figura 84- Programa FRP Lamella – Avaliação em Estado Limite Último (ELU)

A parte esquerda da janela exibe a distribuição de extensões iniciais na situação de pré-reforço resultante do momento fletor inicial M_{EK0} .

A parte direita do monitor exibe o perfil de extensões em estado limite último (ELU) considerando a área de secção transversal necessárias $A_{f,nec}$ de FRP.

São também exibidos os valores de extensão na extremidade comprimida ϵ_c e a posição da linha neutra de separação da zona comprimida x .

ϵ_p representa a extensão do aço de pré-esforço incluindo a extensão inicial devido ao pré-esforço.

A extensão da armadura ordinária em barras de aço e a extensão do material de FRP são exibidas como ϵ_s e ϵ_f respetivamente.

A janela de saída de dados *extensões/tensões em estado limite de serviço (ELS)* exibe o diagrama de extensões máximas para os diferentes materiais em estado de serviço - Figura 85.

A parte esquerda da janela apresenta a distribuição de extensões em estado limite de serviço (ELS) como resultado das cargas características considerando a secção transversal proporcionada pela FRP $A_{f,eff}$. A distribuição das extensões em serviço exibida é usada particularmente para o controlo de extensões no aço, que não deve exceder o limite de cedência.

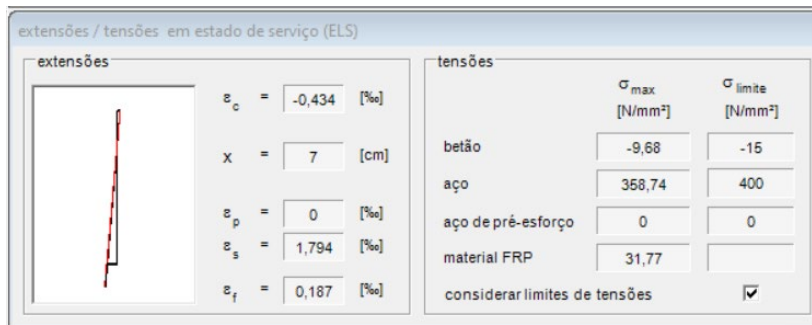


Figura 85- Programa FRP Lamella – Avaliação em Estado Limite de Serviço (ELS)

São também exibidos os valores de extensão na extremidade comprimida ϵ_c e a posição da linha neutra de separação da zona comprimida x .

ϵ_p é a extensão do aço de pré-esforço incluindo a extensão inicial devido ao pré-esforço.

A extensão da armadura ordinária em barras de aço e a extensão do material de FRP são exibidas como ϵ_s e ϵ_f respetivamente.

Na parte direita da janela é exibido o correspondente valor de tensão máxima σ_{limite} do EC2. Estão de acordo com as combinações características de ações.

4.3.1.4 Amarração do FRP na extremidade

A janela *amarração do FRP na extremidade* permite verificar a amarração por aderência da força de tração na extremidade das faixas de reforço com FRP - Figura 86.

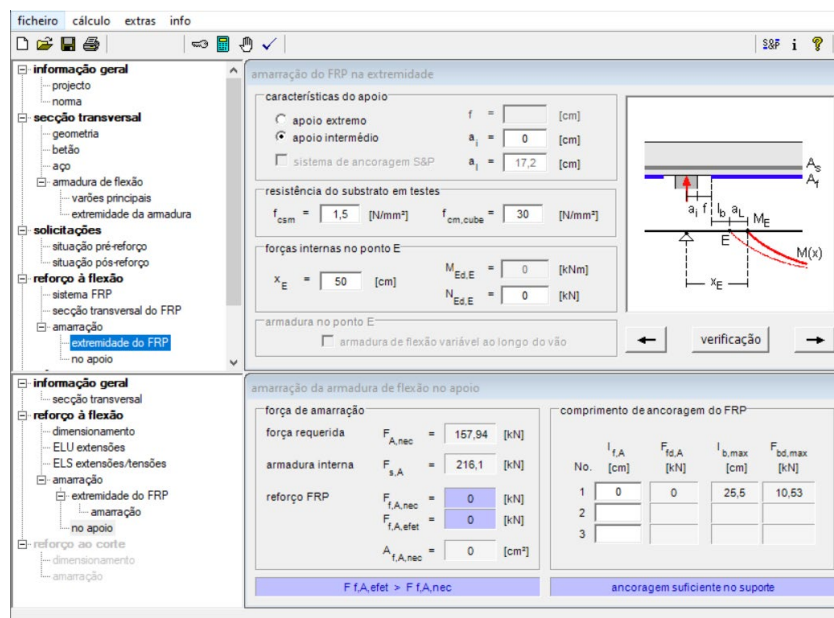


Figura 86- Programa FRP Lamella – Amarração do FRP na extremidade

Na situação de reforço de um determinado vão deve-se definir as condições de apoio entre vãos, optando-se por uma situação de apoio extremo ou apoio intermédio.

Para verificar a aderência no apoio extremo, introduzem-se os dados de distância f entre o final da faixa de reforço e a face do apoio. Para prevenir a delaminação do reforço esta distância não deverá exceder os 50mm.

É necessário inserir também a distância a_i entre a linha teórica do apoio e a face do apoio.

Para sistemas de FRP aplicados externamente, deve-se inserir a tensão de aderência do substrato f_{csm} . Tal como já referido no Capítulo 2, este valor deve ser aferido por um determinado número de ensaios pull-off. Considera-se como valor mínimo para laminados pré-fabricados 1,5 [N/mm²], para mantas de carbono 1,0 [N/mm²].

No caso de laminados inseridos na camada de recobrimento (NSM) é considerado a resistência ao corte característica do adesivo. Este valor é determinado tendo em consideração as propriedades específicas do sistema de adesivos.

Na parte inferior da janela correspondente à *amarração do FRP na extremidade* (Figura 86) visualiza-se a saída de resultados *amarração do FRP na extremidade*, bem como informação adicional acerca dos comprimentos de amarração e recomendações (Guideline Alemão).

No ponto E a força de tensão instalada no FRP é designada por $F_{fd,E}$. É determinada iterativamente tendo em conta o momento atuante antes de calculado $M_{Edf,E}$ no ponto E. Para a verificação da amarração em apoio intermédio é assumido $F_{fd,E}=0$, uma vez que o ponto E é o ponto de momento 0 (Figura 87).

F_{bd} indica o valor da força de rotura de amarração do sistema de FER escolhido, resultando das propriedades dos materiais promovidas pelo FRP e a resistência do substrato.

Para a verificação de ancoragem dos sistemas FRP externamente aderidos é aplicado o comprimento de amarração l_b relacionado com a máxima força de aderência $F_{bd,max}$. Este valor é calculado para cada faixa de reforço de FRP dependendo da secção transversal escolhida. O valor $l_{b,max}$ deve sempre ser considerado como mínimo de comprimento de ancoragem.

Os valores f_{max} , f_{min} e f definem a distância da extremidade das faixas de FRP à face do apoio.

forças de tensão no FRP		força de amarração	comprimento de amarração				
No.	$F_{fd,E}$ [kN]	$F_{bd,max}$ [kN]	$l_{b,max}$ [cm]	f_{max} [cm]	l_b [cm]	f [cm]	recomendado
1	0	10,53	25,5	7,3	0	5	
2							
3							

Figura 87- Programa FRP Lamella – Verificação da amarração do FRP na extremidade.

4.3.1.5 Saída de resultados amarração do FRP na extremidade

Para vigas, uma janela adicional é exibida para as exigências de cintagem na extremidade (Figura 88). Na parte esquerda é determinada a área da secção transversal do estribo externo no ponto E. à direita é verificada a amarração do estribo.

Figura 88- Programa FRP Lamella – Verificação da aderência do FRP – cintagem do reforço no ponto E

4.3.1.6 Amarração da armadura de flexão no apoio

A janela de amarração da armadura de flexão no apoio, permite comprovar a ancoragem do somatório das armaduras de flexão no apoio (Figura 89). Esta verificação só é necessária no caso do reforço de momentos atuantes positivos (momento no vão).

amarração da armadura de flexão no apoio

tipo de apoio:
 apoio directo $a_1 =$ [] [cm]
 apoio indirecto $a_1 =$ 18 [cm]

aderência de amarração na extremidade do reforço de FRP:
 colada externamente $f_{csm} =$ 1,5 [N/mm²]
 inserida na extremidade $f_{cm} =$ 30 [N/mm²]

forças internas no apoio:
 $V_{Ed,A} =$ 91 [kN] $N_{Ed,A} =$ 0 [kN]

amarração no apoio: verificar varões no apoio [] [] verificação [] []

amarração da armadura de flexão no apoio

força de amarração:
 força requerida $F_{A,nec} =$ 45,61 [kN]
 armadura interna $F_{s,A} =$ 205,18 [kN]
 reforço FRP:
 $F_{fA,nec} =$ 0 [kN]
 $F_{fA,efet} =$ 0 [kN]
 $A_{fA,nec} =$ 0 [cm²]

comprimento de ancoragem do FRP

No.	$l_{f,A}$ [cm]	F_{fA} [kN]	$l_{b,max}$ [cm]	$F_{bd,max}$ [kN]
1	0	0	25,5	10,53
2				
3				

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

Figura 89- Programa FRP Lamella – Amarração de armadura de flexão no apoio

Nesta janela em causa (Figura 89) a parte inferior, que corresponde à verificação exhibe na parte esquerda as diferentes forças de amarração. E na parte direita, o comprimento de amarração para cada nível de reforço de FRP.

$F_{fA,nec}$ é a força de ancoragem adicional necessária do FRP no apoio.

Mais a abaixo, na linha de verificação à esquerda, a ancoragem promovida pela força de amarração do FRP, $F_{fA,efet}$ é comparada com a força de amarração necessária do FRP no apoio. Este valor depende do comprimento de aderência $l_{f,A}$ (parte direita da janela).

Na linha inferior de verificação à direita é exibida informação sobre a amarração do FRP.

4.3.1.7 Dados sobre esforço transverso – armadura e cargas

Na janela de *esforço transverso – armadura e cargas* é onde se insere dados sobre a armadura de corte existente, bem como as cargas impostas no estado pós-reforço (Figura 90).

Para vigas insere-se a área de secção transversal por metro dos estribos internos a_{sw} .

Nesta fase define-se a secção relevante para a verificação de corte e insere-se a distância x_x desde a linha teórica do apoio.

O valor do esforço transversal de cálculo $V_{Sdf,x}$ é também introduzido, na situação pós-reforço na secção relevante x .

Insere-se o momento Fletor $M_{Edf,x}$, para determinar o nível exato z das forças internas.

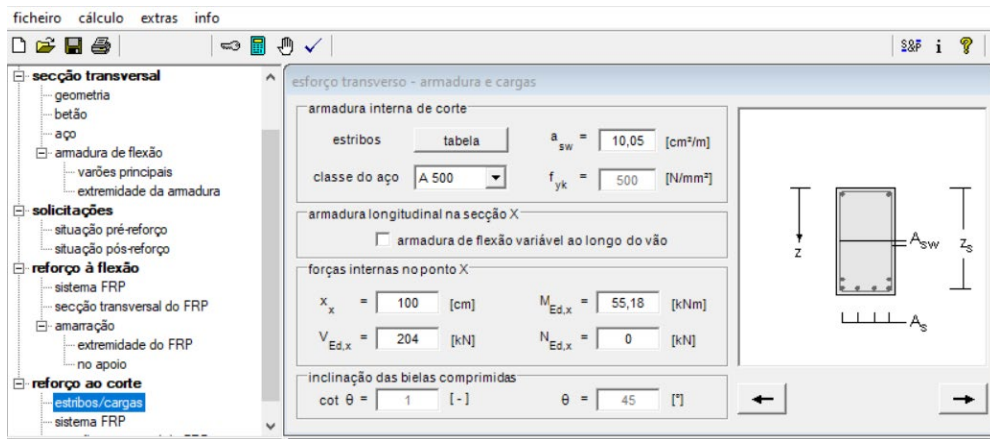


Figura 90- Programa FRP Lamella – Esforço Transverso – armadura e cargas

4.3.1.8 Sistema FRP – Reforço ao corte

Na janela de *reforço ao corte* são definidas as propriedades dos materiais de reforço para o reforço ao esforço transversal. Pode-se escolher entre mantas S&P e chapas de aço (Figura 91).

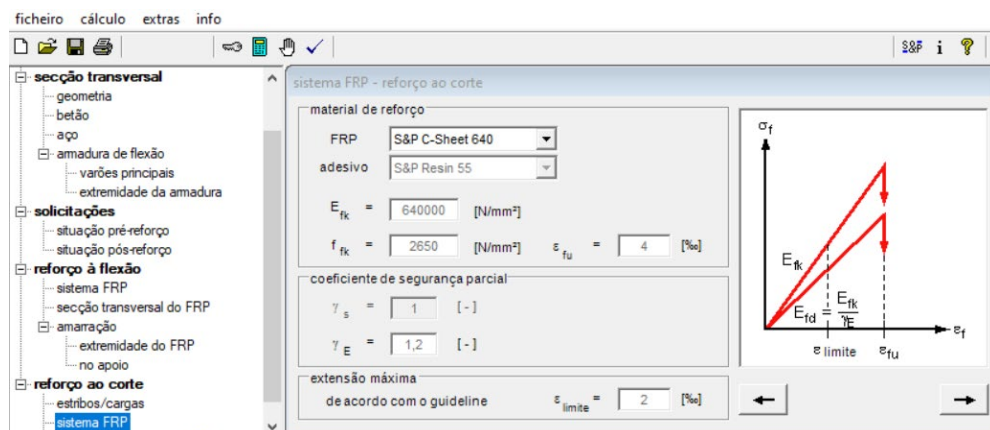


Figura 91- Programa FRP Lamella – Sistemas FRP – Reforço ao corte

4.3.1.9 Secção transversal de FRP – Reforço ao corte

Na janela *Secção transversal de FRP – Reforço ao corte*, introduzem-se as dimensões dos estribos adicionais (Figura 92).

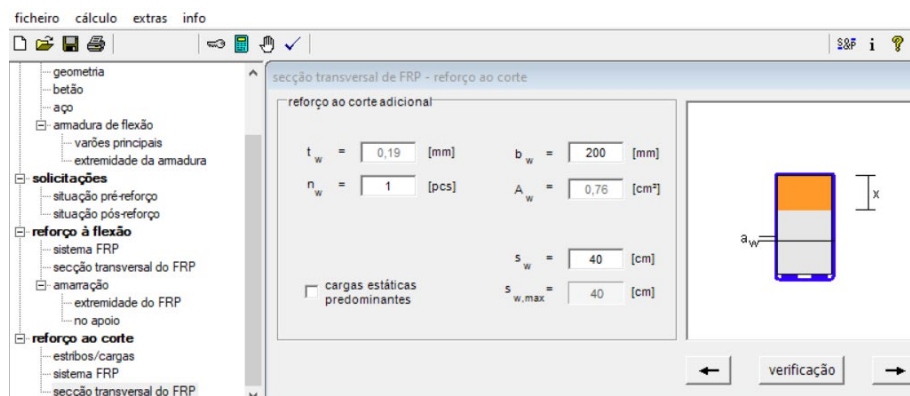


Figura 92- Programa FRP Lamella – secção transversal de FRP – reforço ao corte

A espessura nominal t_w de uma camada de reforço ao corte com FRP é exibida dependendo do tipo de FRP selecionando anteriormente.

Neste ponto, deve-se escolher o número de camadas de FRP, n_w . No caso das mantas podem-se escolher 5 níveis de espessuras.

Introduz-se também a largura b_w dos estribos em FRP. E é calculada a área secção transversal A_w de um estribo de FRP.

Introduz-se o espaçamento s_w de um estribo externo de FR. No caso de se considerar aplicações contínuas de mantas FRP, deve-se definir $s_w=b_w$. O espaçamento máximo $s_{w,max}$ é exibido.

4.3.1.10 Saída de resultados de reforço ao corte

Na parte esquerda da janela *reforço ao corte* a força de corte atuante é comparada com os valores de calculo de resistência. Na parte direita da janela são exibidos os elementos adicionais sobre a solução de reforço e algumas sugestões sobre a solução apresentada (Figura 93).

situação pré-reforço		situação pós-reforço	
$V_{Rd,c}$	= 58,11 [kN]	V_{Ed}	= 48 [kN]
$V_{Rd,s}$	= 120,77 [kN]	V_{Rd}	= 167,12 [kN]
$V_{Rd,max}$	= 599,48 [kN]	$V_{Rd,limite}$	= 391,85 [kN]
resistência ao corte dos estribos externos			
ΔV_{wd}	= 56,01 [kN]		
$\Delta V_{w,min}$	= 0 [kN]		
V Ed < V Rd,c		não há necess. confinamento transversal	

Figura 93- Programa FRP Lamella – Verificação do reforço ao corte

A resistência ao corte promovida pelo betão $V_{Rd,c}$ é calculada tendo em conta a resistência ao corte de cálculo e o rácio de armadura longitudinal. Nos casos em que o esforço transversal atuante de cálculo seja inferior a este valor, o reforço ao corte não é necessário.

A capacidade resistente ao corte da secção de armadura de corte interna $V_{Rd,s}$, indica se o reforço externo é necessário ou não para cobrir todos os esforços atuantes ao corte. Se a força de corte atuante de cálculo V_{Ed} não exceder a capacidade resistente $V_{Rd,s}$ da secção não reforçada, o reforço ao corte adicional só é necessário para transferir o reforço à flexão para os estribos internos. Nestes casos o reforço ao corte não necessita de ser amarrado na zona de compressão.

A resistência ao corte máxima $V_{Rd,max}$ corresponde à rotura da biela de compressão do betão.

A capacidade parcial resistente ao corte ΔV_{wd} resulta da secção transversal dos estribos externos selecionados.

À direita, a força de corte para o cálculo V_{Ed} é comparada com a resistência de corte $V_{Rd,s}$ da secção transversal reforçada.

Na parte de baixo esquerda da janela são exibidas recomendações adicionais para a amarração do reforço ao corte externo.

4.3.2 Dimensionamento de Reforços FRP das Vigas do Piso 0 (FRP Lamella da S&P)

Para o caso de estudo em causa procedeu-se à análise da necessidade de execução de reforços das vigas do Piso 0, usando o programa *FRP Lamella da S&P*, introduzindo todos os dados solicitados em cada fase do programa, tal como descrito anteriormente, procedendo a todas as respetivas verificações de segurança a cada meio vão e respetivos apoios.

Expõe-se nas tabelas abaixo os resultados obtidos no dimensionamento de reforços dos vãos e apoios de cada Pórtico. Para cada elementos analisado é indicado se há ou não necessidade de reforço. No caso de haver essa necessidade de reforço é

indicado o tipo de solução, no que diz respeito à flexão e ao corte, com cálculo das respetivas áreas de reforço de laminado FRP - A_f e de mantas - A_w para confinamento transversal adicional (reforço ao corte).

No caso do Pórtico 1 (Tabela 10), conclui-se que o vão 50-51, o vão 52-53 e o vão 53-54 carecem de reforço, com a aplicação de laminados aderidos externamente. Relativamente aos apoios, o apoio P49, P50 e P54 são os que apresentam necessidade de reforço, sendo que os restantes elementos não precisam. Ressalva-se a situação do vão 53-54, em que houve a necessidade de se aumentar a espessura da manta considerada para reforço de confinamento transversal na zona de amarração, preconizando-se a sobreposição de 3 mantas.

PÓRTICO 1											
SOLUÇÃO DE REFORÇO À FLEXÃO		Secção [mm/mm]	n_f [pcs]	m_f [pcs]	A_f [cm^2]	SOLUÇÃO DE REFORÇO AO CORTE		t_w [mm]	n_w [pcs]	b_w [mm]	A_w [cm^2]
Vão 49-50	Não há necessidade de reforço										
Vão 50-51	Laminado aderido externamente	60/1.4	1	1	0,84	Não há necessidade de confinamento transversal					
Vão 51-52	Não há necessidade de reforço										
Vão 52-53	Laminado aderido externamente	50/1.2	1	1	0,6	Não há necessidade de confinamento transversal					
Vão 53-54	Laminado aderido externamente	50/1.2	1	1	0,6	C-Sheet 240 (400g)		0,23	3	300	4,21
Apoio 49	Laminado aderido externamente	50/1.2	1	2	1,2	Não há necessidade de confinamento transversal					
Apoio 50	Laminado aderido externamente	150/1.4	1	1	2,1	C-Sheet 640		0,19	1	300	1,14
Apoio 51	Não há necessidade de reforço										
Apoio 52	Não há necessidade de reforço										
Apoio 53	Não há necessidade de reforço										
Apoio 54	Laminado aderido externamente	100/1.4	1	1	1,4	C-Sheet 640		0,19	1	200	0,76

Tabela 10- Resultado da análise de reforços FRP ao Pórtico 1

Da análise feita ao Pórtico 3 (Tabela 11) apenas os vãos 38-39, vão39-40 e vão 41-52 necessitam de reforço – laminados aderidos externamente.

PÓRTICO 3											
SOLUÇÃO DE REFORÇO À FLEXÃO		Secção [mm/mm]	n_f [pcs]	m_f [pcs]	A_f [cm^2]	SOLUÇÃO DE REFORÇO AO CORTE		t_w [mm]	n_w [pcs]	b_w [mm]	A_w [cm^2]
Vão 37-38	Não há necessidade de reforço										
Vão 38-39	Laminado aderido externamente	50/1,2	1	1	0,6	C-Sheet 640		0,19	1	300	1,14
Vão 39-40	Laminado aderido externamente	50/1,2	1	1	0,6	C-Sheet 640		0,19	1	300	1,14
Vão 40-41	Não há necessidade de reforço										
Vão 41-42	Laminado aderido externamente	50/1,2	1	1	0,6	Não há necessidade de confinamento transversal					
Apoio 37	Não há necessidade de reforço										
Apoio 38	Não há necessidade de reforço										
Apoio 39	Não há necessidade de reforço										
Apoio 40	Não há necessidade de reforço										
Apoio 41	Não há necessidade de reforço										
Apoio 42	Não há necessidade de reforço										

Tabela 11- Resultado da análise de reforços FRP ao Pórtico 3

Dos cálculos efetuados para os elementos do Pórtico 5 (Tabela 12), todos os vão precisam de reforço e apenas o apoio extremo esquerdo P25 precisa de ser reforçado com laminado aderido externamente.

PÓRTICO 5											
SOLUÇÃO DE REFORÇO À FLEXÃO		Secção [mm/mm]	n_f [pcs]	m_f [pcs]	A_f [cm^2]	SOLUÇÃO DE REFORÇO AO CORTE		t_w [mm]	n_w [pcs]	b_w [mm]	A_w [cm^2]
Vão 25-26	Laminados Inseridos	10/1,4	1	1	0,14	C-Sheet 640	0,19	1	100	0,38	
Vão 26-27	Laminado aderido externamente	50/1,2	1	1	0,6	C-Sheet 640	0,19	1	200	0,76	
Vão 27-28	Laminado aderido externamente	50/1,2	1	1	0,6	C-Sheet 640	0,19	1	200	0,76	
Vão 28-29	Laminado aderido externamente	50/1,2	1	1	0,6	C-Sheet 640	0,19	1	200	0,76	
Vão 29-30	Laminado aderido externamente	80/1,2	1	1	0,96	C-Sheet 640	0,19	1	300	1,14	
Apoio 25	Laminado aderido externamente	50/1,2	1	1	0,6	C-Sheet 640	0,19	1	100	0,38	
Apoio 26	Não há necessidade de reforço										
Apoio 27	Não há necessidade de reforço										
Apoio 28	Não há necessidade de reforço										
Apoio 29	Não há necessidade de reforço										
Apoio 30	Não há necessidade de reforço										

Tabela 12- Resultado da análise de reforços FRP no Pórtico 5

Relativamente ao Pórtico 7 (Tabela 13), somente o vão 13-14 e o vão 17-18 carecem de reforço, com solução de aplicação de laminado aderido externamente.

PÓRTICO 7											
SOLUÇÃO DE REFORÇO À FLEXÃO		Secção [mm/mm]	n_f [pcs]	m_f [pcs]	A_f [cm^2]	SOLUÇÃO DE REFORÇO AO CORTE		t_w [mm]	n_w [pcs]	b_w [mm]	A_w [cm^2]
Vão 13-14	Laminado aderido externamente	80/1,4	1	1	1,12	Não há necessidade de confinamento transversal					
Vão 14-15	Não há necessidade de reforço										
Vão 15-16	Não há necessidade de reforço										
Vão 16-17	Não há necessidade de reforço										
Vão 17-18	Laminado aderido externamente	50/1,2	1	1	0,6	C-Sheet 640	0,19	1	300	1,14	
Apoio 13	Não há necessidade de reforço										
Apoio 14	Não há necessidade de reforço										
Apoio 15	Não há necessidade de reforço										
Apoio 16	Não há necessidade de reforço										
Apoio 17	Não há necessidade de reforço										
Apoio 18	Não há necessidade de reforço										

Tabela 13- Resultado da análise de reforços FRP no Pórtico 7

Quanto ao Pórtico 9 (Tabela 14), somente o vão 05-06 precisa de ser reforçado com um laminado aderido externamente, com solução adicional de reforço ao conte com manta de alto módulo.

PÓRTICO 9											
SOLUÇÃO DE REFORÇO À FLEXÃO		Secção	n_f	m_f	A_f	SOLUÇÃO DE REFORÇO AO CORTE		t_w	n_w	b_w	A_w
		[mm/mm]	[pcs]	[pcs]	[cm^2]			[mm]	[pcs]	[mm]	[cm^2]
Vão 01-02	Não há necessidade de reforço										
Vão 02-03	Não há necessidade de reforço										
Vão 03-04	Não há necessidade de reforço										
Vão 04-05	Não há necessidade de reforço										
Vão 05-06	Laminado aderido externamente	50/1,2	1	1	0,6	C-Sheet 640	0,19	1	300	1,14	
Apoio 01	Não há necessidade de reforço										
Apoio 02	Não há necessidade de reforço										
Apoio 03	Não há necessidade de reforço										
Apoio 04	Não há necessidade de reforço										
Apoio 05	Não há necessidade de reforço										
Apoio 06	Não há necessidade de reforço										

Tabela 14- Resultado da análise de reforços FRP no Pórtico 9

Os dimensionamentos realizados para o Pórtico 11 (Tabela 15) e para o Pórtico 12 (Tabela 16), foram os que resultaram em maior necessidade de reforço.

No caso do Pórtico 11, no apoio P49, a solução passa pela colocação de 15 laminados, duplos, inseridos no betão, colocados lado a lado, devidamente espaçados. Atendendo à largura da viga, ao espaço necessário para a execução dos rasgos e colocação da resina para aderência do respetivo laminado, esta solução, embora exequível, aparenta ser extremamente adensada.

PÓRTICO 11											
SOLUÇÃO DE REFORÇO À FLEXÃO		Secção	n_f	m_f	A_f	SOLUÇÃO DE REFORÇO AO CORTE		t_w	n_w	b_w	A_w
		[mm/mm]	[pcs]	[pcs]	[cm^2]			[mm]	[pcs]	[mm]	[cm^2]
Vão 49-37	Laminado aderido externamente	120/1,2	1	2	2,88	C-Sheet 640	0,19	1	300	1,14	
Vão 37-25	Não há necessidade de reforço										
Vão 25-13	Laminado aderido externamente	50/1,2	1	1	0,6	Não há necessidade de confinamento transversal					
Vão 13-01	Laminado aderido externamente	50/1,2	1	1	0,6	C-Sheet 640	0,19	1	300	1,14	
Apoio 49	Laminados inseridos	20/1,4	2	15	8,4	Não há necessidade de confinamento transversal					
Apoio 37	Não há necessidade de reforço										
Apoio 25	Laminados inseridos	20/1,4	1	3	0,84	Não há necessidade de confinamento transversal					
Apoio 13	Não há necessidade de reforço										
Apoio 01	Laminados inseridos	10/1,4	1	1	0,14	C-Sheet 640	0,19	1	300	1,14	

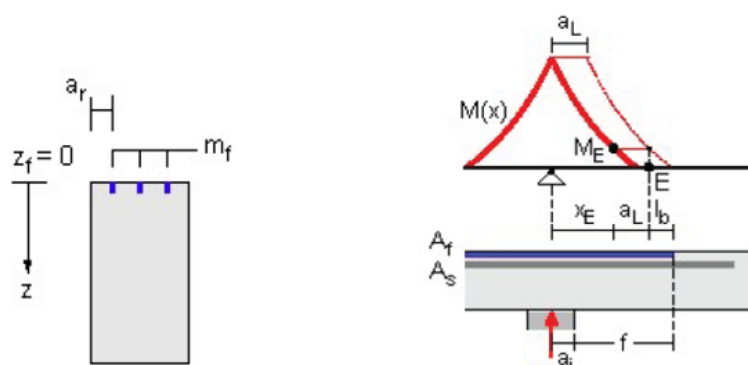
Tabela 15- Resultado da análise de reforços FRP no Pórtico 11

Fazendo a mesma análise para o caso do Pórtico 12 (Tabela 16), a solução determinada para o apoio P54, com a solução de 30 laminados duplos inseridos no betão, não é exequível, pois resulta na sobreposição de reforços (o próprio programa de cálculo alerta para este facto). Importa, portanto, ressaltar que é necessário analisar criteriosamente os resultados obtidos, avaliando a viabilidade deste tipo de solução de reforço para cada caso.

PÓRTICO 12										
SOLUÇÃO DE REFORÇO À FLEXÃO					SOLUÇÃO DE REFORÇO AO CORTE					
		Secção [mm/mm]	n_f [pcs]	m_f [pcs]	A_f [cm^2]		t_w [mm]	n_w [pcs]	b_w [mm]	A_w [cm^2]
Vão 54-42	Laminado aderido externamente	100/1,2	1	2	2,4	C-Sheet 640	0,19	1	300	1,14
Vão 42-30	Não há necessidade de reforço									
Vão 30-18	Laminado aderido externamente	50/1,2	1	1	0,6	C-Sheet 640	0,19	1	300	1,14
Vão 18-06	Não há necessidade de reforço									
Apoio 54	Laminados inseridos	20/1,4	2	30	16,8	N.A. (Sobreposição de laminados)				
Apoio 42	Não há necessidade de reforço									
Apoio 30	Laminados inseridos	10/1,4	2	4	1,12	C-Sheet 640	0,19	1	300	1,14
Apoio 18	Não há necessidade de reforço									
Apoio 06	Laminados inseridos	10/1,4	1	1	0,14	C-Sheet 640	0,19	1	300	1,14

Tabela 16- Resultado da análise de reforços FRP no Pórtico 12

No caso de reforço em zona de apoios, o uso de laminados inseridos é a solução genericamente apresentada. A Figura 94 representa, esquematicamente em corte transversal, o posicionamento dos laminados inseridos. Estes localizam-se superiormente ao elemento (Viga).


Figura 94- Esquema de posicionamento de laminados inseridos, corte transversal e corte longitudinal - Apoio 49 - Pórtico 11

No que diz respeito aos reforços FRP a colocar na zona do vão, quando a solução é a execução de laminados FRP inseridos, a Figura 95, ilustra o posicionamento desses mesmos reforços.

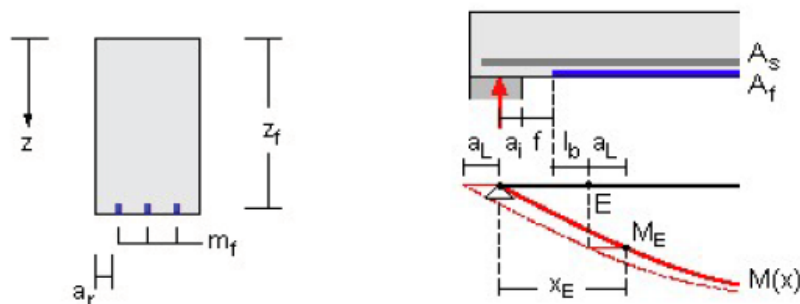


Figura 95- Esquema de posicionamento de laminados inseridos (A_f), corte transversal e longitudinal – Vão 25-26 - Pórtico 5

Quando a solução de reforço na zona do vão passa pela colocação de laminados aderidos externamente, estes reforços posicionam-se sob a viga, conforme esquema da Figura 96.

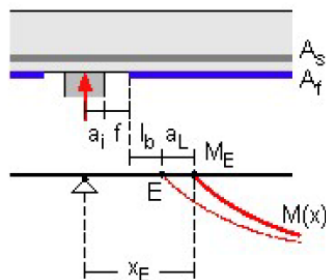


Figura 96- Esquema de posicionamento de laminados aderidos externamente (A_f), corte longitudinal – Vão 49-37 - Pórtico 11

Havendo a necessidade de colocar de mantas CFRP para confinamento transversal na zona de vão, o esquema de aplicação será conforme Figura 97, neste caso, sem necessidade de amarrar no banzo comprimido.

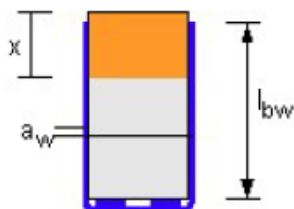


Figura 97- Esquema de posicionamento de laminados aderidos externamente (A_f) com manta de confinamento transversal (a_w)- Vão 54-42 - Pórtico 12

Apresenta-se de seguida, na Figura 98, um esquema longitudinal do Pórtico 1, que pretende ilustrar a localização dos reforços resultantes do dimensionamento com

programa **FRP Lamella da S&P**, realizado em cada vão e apoio, cujo resultado já se encontra sintetizado na Tabela 10.

Deste modo, representa-se em corte longitudinal um reforço de laminado colado exteriormente no apoio P49 (sendo que serão necessárias 2 peças paralelas), sem necessidade de confinamento transversal como reforço na zona de amarração. No vão 49-50 não será necessário colocar reforço. No apoio 50, do dimensionamento feito resultou a necessidade de se colocar um laminado colado exteriormente, com manta de reforço transversal associada na zona de amarração. Neste caso, como a viga na zona do pilar é interrompida pelo prolongamento do mesmo para o piso superior, considerou-se essa interrupção, colocando de ambos os lados a mesma solução. No vão 50-51, representa-se o reforço considerado necessário, com laminado colado externamente. Para o apoio P51, P52 e P53 não resultou a necessidade de colocar reforços. A igual conclusão se chegou para o vão 51-52. Para o vão 53-54, do dimensionamento resultou a necessidade de se colocar um laminado colado aderido externamente, contemplando também reforço transversal, com a colocação de 3 mantas sobrepostas, com largura de 300mm. E finalmente, para o apoio P54, constatou-se a necessidade de colocar um laminado colado externamente, contemplando também a colocação de uma manta com 200mm de largura para reforço transversal na zona de amarração, junto ao apoio.

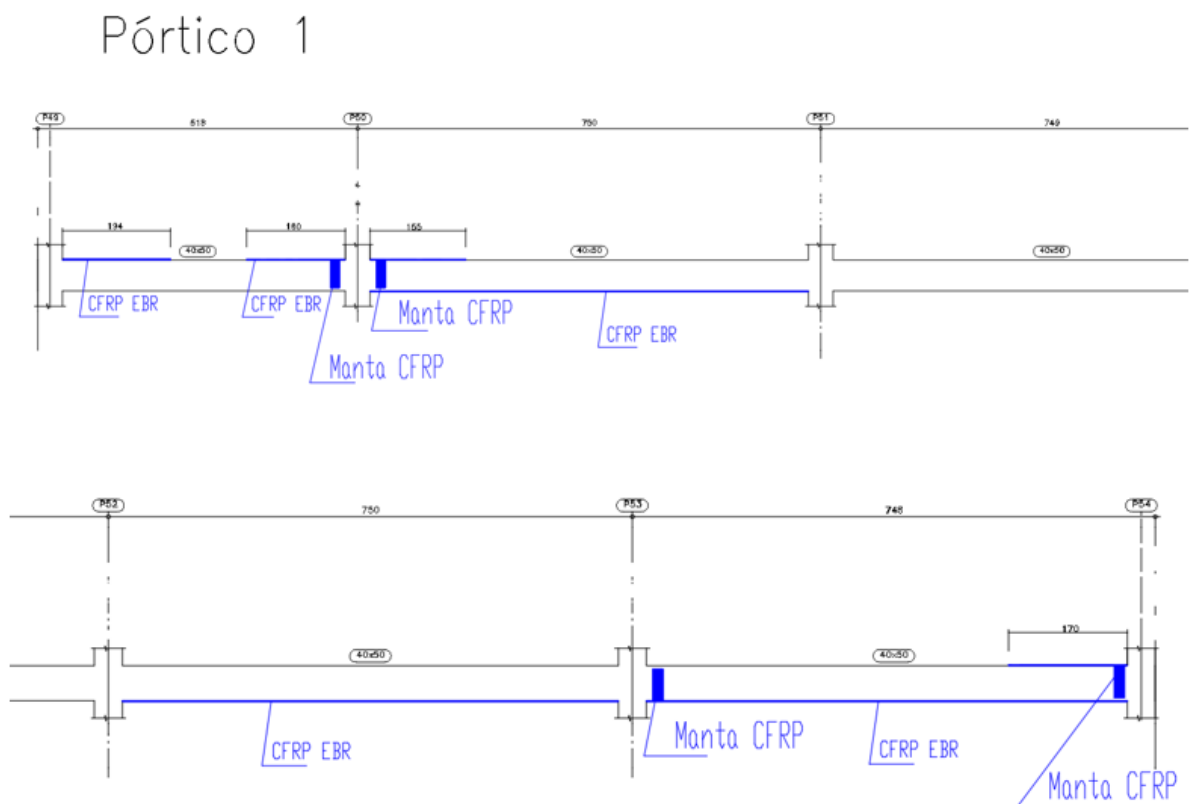


Figura 98- Esquema longitudinal do Pórtico 1, com localização dos reforços resultantes do dimensionamento.

Do programa de cálculo **FRP Lamella da S&P**, é possível extrair relatórios que resumem o dimensionamento feito para cada elemento, com as devidas verificações. Os relatórios do dimensionamento do vão 52-53 do Pórtico 1, do vão 28-29 do Pórtico 5 e o dimensionamento do apoio P06 do Pórtico 12 encontram-se em anexo.

5 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O reforço de elementos de Betão Armado com elementos de compósitos reforçados com polímeros de Fibra tem vindo a demonstrar-se uma técnica em grande desenvolvimento, com grandes potencialidades e uma boa alternativa às comuns técnicas de reforço, técnicas mais tradicionais com recurso a betão, aço, cofragens.

Cada vez mais, a reabilitação, e a remodelação estão mais presentes na engenharia, quer seja pela conjuntura económica, adaptabilidade, ou tendência social. E facto é que o uso de reforços com polímeros de fibras são uma solução viável, de fácil uso, que apresentam boas características. A alta resistência, grande rigidez e baixo peso, módulo de elasticidade que varia entre 230 GPa e 640 GPa, e resistência à tração entre 1500GPa e 5000GPa são características que tornam desejável este tipo solução.

Um pouco por todo o mundo, o interesse na investigação e normalização desta técnica tem vindo a aumentar, e grandes progressos se têm vindo a fazer. No entanto, a informação encontra-se ainda dispersa e a falta de resultados corroborantes, adicionada à falta de normas próprias, tornam o processo de dimensionamento desta técnica um pouco confuso e pouco objetivo. Por isso mesmo, há ainda uma grande aproximação e “colagem” às normas, requisitos e Eurocódigos utilizados como base nas técnicas tradicionais de reforço e reabilitação de estruturas de betão. Motivo pela qual a Norma EN 1504 foi abordada nesta dissertação.

Por outro lado, verifica-se que os fabricantes destes materiais, têm vindo a investir cada vez mais, procurando colocar no mercado os seus produtos, facilitando a sua aplicação e desenvolvendo programas como o utilizado no capítulo 4 desta dissertação.

Relativamente ao método de dimensionamento utilizado nesta dissertação, conclui-se que o software desenvolvido pela S&P se apresenta como uma opção muito interessante na avaliação da necessidade do uso de reforços em elementos de betão e respetivas verificações. No entanto, verifica-se que, para usar este programa de cálculo é necessário o conhecimento prévio de informação estrutural de projeto da estrutura a reforçar na sua fase inicial e isso nem sempre é fácil, principalmente na área da reabilitação. Havendo a necessidade de, por vezes, se assumirem determinadas premissas para se conseguir avançar no cálculo e chegar a uma conclusão.

O principal objetivo deste trabalho foi o de explorar e desenvolver o método de reforço de estruturas de betão armado com recurso a polímeros de fibra de carbono. Este método encontra-se ainda pouco conhecido pelos projetistas de estruturas, e interessa por isso torná-lo mais próximo dos potenciais utilizadores desta tecnologia.

Ficou demonstrado que com o conhecimento da situação inicial e final em termos de esforços, é possível dimensionar e aplicar de uma forma fácil os reforços necessários para a estrutura cumprir com segurança um aumento da sua vida útil, eventualmente com um uso diferente daquele para o qual a estrutura foi inicialmente dimensionada. É simples para um projetista que conheça as seções de betão armado de uma estrutura, avaliar a necessidade de reforços pelo conhecimento dos diagramas de esforços finais. Também é simples para uma empresa de construção civil aplicar os referidos reforços, desde que seguindo as especificações técnicas do fabricante. Contudo, não é muito intuitivo o uso do software de cálculo, pois não estão muito visíveis para o utilizador do programa os significados dos vários parâmetros que interessam para o dimensionamento.

Como desenvolvimentos futuros, é evidente a urgente normalização dos requisitos e premissas de dimensionamento desta técnica. Considerando que os métodos de cálculo, indicados nos relatórios e documentos publicados no âmbito desta temática, são extremamente complexos e iterativos é necessário o desenvolvimento de um método/programa de cálculo de fácil utilização, mais intuitivo e objetivo. Verifica-se de grande importância para a disseminação desta tecnologia, a melhoria do software de cálculo dos reforços, tornando-o mais “user-friendly”, e mais intuitivo o seu conhecimento.

Também se recomenda uma aplicação deste método de reforço aplicado a outros elementos estruturais como lajes, pilares, paredes de betão e até mesmo sapatas. Estes estudos aplicados no âmbito de teses de mestrado, apresentando casos práticos académicos, podem ser bastante úteis para a futura aplicação desta técnica por parte de outros projetistas, e contribuir para uma maior difusão da técnica de dimensionamento, e consequentemente reduzir o seu custo, que só se verificará quando existir uma utilização massiva destes materiais.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (2012). American Association of Transportation Officials, Guide Specifications for Design of Bonded FRP Systems for Repair and Strengthening of Concrete Bridge Elements;
- ACI 440.2R-08 (2008) Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, American Concrete Institute;
- AZEVEDO, D.M.M. (2008). Reforço de Estruturas de Betão com Colagem de Sistemas Compósitos de CFRP – Recomendações para Dimensionamento, Dissertação Mestrado, FEUP, Porto;
- BARROS, J. (2004). Dimensionamento de Reforço à flexão e ao corte com FRP segundo as recomendações do ACI 440, Report 04-DEC/E12, Universidade do Minho;
- BARROS, J. (2004). Materiais Compósitos no Reforço de Estruturas. Jounadas de Engenharia Civil. Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil;
- BATISTA, L.B. (2012). Reabilitação de estruturas de betão de acordo com a Norma NP EN 1504, Relatório de Estágio Mestrado, ISEC;
- BETONKALENDER (2014). Strengthening of Concrete Structures with Adhesively Bonded Reinforcement, Design and Dimension Of CFRP Laminates and Steel Plates, Konrad Zilch, Roland Niedermeier, Wolfgang Finckh;
- BOTO, T.A.P.M. (2015). Estratégias para Intervenções de Reparação e Reforço em Estruturas de Betão Armado, Dssertação Mestrado, ISEC, dezembro 2015;
- CASTRO, B.F.M. (2013). Estudo e Caracterização Mecânica de Compósitos Reforçados com Fibras Naturais, Mestrado Eng. Mecânica, ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto;
- CLIPCARBONO. <https://www.clipcarbono.com/pt/tecidos/1662-amostra-comercial-de-fibra-de-carbono-tecida-2x2-3k-160gm2-250-x-200-mm.html>
- CNR (2004). Advisory Committee on Technical Recommendatios for Construction – National Research Council, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures, 2004;
- CORREIA, J. RAMÔA (2012). Utilização de Materiais FRP na Reabilitação e Reforço de Estruturas, Instituto Superior Técnico;
- CORREIA, J. (2008). GFRP Pultruded profiles in civil engineering: Hybrid solutions, bonded connections and fire behaviour. PhD thesis, Technical University of Lisbon;
- CRUZ J., BOROJEVIC, A., SENA-CRUZ J., PEREIRA E., FERNANDES, P., SILVA, P., KWIECIEN A. (2016). Encontro Nacional Betão Estrutura- - BE2016 – FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra: Comportamento da aderência de sistemas de reforço NCM-CFRP na presença de diferentes tipos de adesivos.

DE LORENZIS, L., TENG, J. G. (2006). *Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures*, *Composites Part B: Engineering*, Elsevier;

EMMONS, P.H., VAYSBURD, A.M. (1995). *System concept in design and construction of durable concrete repairs*, *Construction and Building Materials*, Vol. 10, Elsevier;

FERRARI, V.J. (2007), Reforço à flexão de vigas de betão armado com manta de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) aderido a substrato de transição constituído por compósito cimentício de alto desempenho, São Carlos;

fib-Bulletin 14 (2001), Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures;

fib-Bulletin 90 (2019), Externally Applied FRP Reinforcement for Concrete Structures;

FIGUEIRAS, J.A.; JUVANDES, L. (2001). Reforço de Pontes por Colagem de Sistemas CFRP – caso das Pontes de N.N da Guia, Seminário Segurança e Reabilitação das Pontes em Portugal, FEUP, Porto;

FIRMO, J. P. (2010). Comportamento ao fogo de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de fibras de carbono (CFRP) - Desenvolvimento de sistemas de proteção ao fogo, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, dezembro;

FORTES, A.S.; BARROS, PADARATZ, I.J. (2002). Vigas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento, Relatório 02-DEC/E-13, Relatório da Investigação desenvolvida no âmbito do programa de Doutoramento de Adriano S. Fortes;

FORTES, A. S., *et al.* (2002). Vigas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento, Universidade do Minho;

FRP – Lamella – Manual de Utilizador, Software version 5.x – Programa de Cálculo para o Reforço à Flexão e ao Corte com Sistema FRP S&P;

JUVANDES, L. (1999), Reforço e Reabilitação de Estruturas de Betão usando Materiais Compósitos de “CFRP”, Dissertação Doutoramento;

JUVANDES, L. (2011). Aplicações de Compósitos FRP no Reforço de Estruturas. 1^{as} Jornadas de Materiais de Construção;

MATTHYS, S. (2000). *Structural behavior and design of concrete members strengthened with externally bonded FRP reinforcement. Doctoral Thesis, Ghent University;*

NSAMBU, R. (1997). Reforço à Flexão de Vigas de Betão Armado com Laminados de fibra de Carbono, Tese de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 1997;

PINTO, T. M. C. G. (2008). Estudo de tintas intumescentes na proteção de elementos estruturais em condições de incêndio, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Industrial, Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança;

POHORYLES, D. (2016). Realistic FRP Seismic Strengthening Schemes for Interior Reinforced Concrete Beam – Column Joints. Thesis Submitted for the degree of Doctor of Philosophy in Earthquake Engineering.

ROSTÁSY et al (1996);

RODRIGUES, C. CHASTRE (2005). Reparação e Reforço de Estruturas de Betão Armado com Sistemas Compósitos de FRP, Publicação UNIC-DTC;

RIBEIRO, S.; ULRIX E. (2000). Aderência entre compósitos reforçados com fibras de carbono e Betão, Artigo apresentado no Congresso REPAR 2000 – Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas, LNEC;

SILVA, J. (2013). Comportamento ao fogo de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de fibras de carbono (CFRP), Tese de Mestrado Instituto Superior Técnico de Lisboa;

SILVA, P.A.S.C.M. (2008). Comportamento de Estruturas de Betão Reforçadas por colagem Exterior de sistemas de CFRP, Dissertação Doutoramento, FEUP;

TRIANAFILLOU, T. C., and PELVRIS, N. (1992). *Strengthening of RC beams with epoxybonded fiber-composite materials*, *Materials and Structures*, 25;

https://pt.wikipedia.org/wiki/Polímero_de_fibra_de_carbono_reforçado;

7 ANEXOS

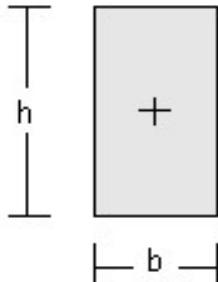
7.1 - Relatório Dimensionamento Vão 52-53_Pórtico 1;

7.2 - Relatório Dimensionamento Vão 28-29_Pórtico 5;

7.3 - Relatório Dimensionamento Apoio P06_Pórtico 12;

S&P FRP Lamella
reforço à flexão e ao corte usando materiais de FRP

secção transversal



geometria

rectangular

b = 40 [cm]
h = 50 [cm]

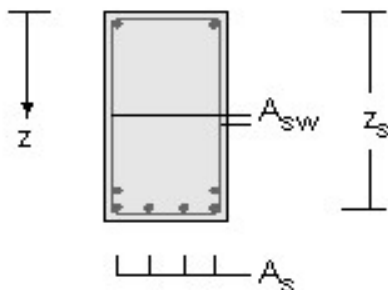
betão

classe:

C 25/30

$f_{ck} = 25$ [N/mm²]
 $\epsilon_{cu} = 3,5$ [%]
 $\epsilon_{c2} = 2$ [%]

$\alpha_{cc} = 1$ [-]
 $E_{cc} = 31476$ [N/mm²]
 $f_{ctm} = 2,56$ [N/mm²]
 $\alpha_{ct} = 1$ [-]



$\gamma_c = 1,5$ [-]

aço

$\gamma_s = 1,15$ [-]

armadura de flexão

varões principais

No.	A_s [cm ²]	z_s [cm]	classe do aço	f_{yk} [N/mm ²]	E_s [N/mm ²]	d_s [mm]
1	6,53	36	A 500	500	200000	12

solicitações

<u>situação pré-reforço</u>	momento no vão (positivo)		força de compressão	
no instante do reforço	$M = 73$	[kNm]	$N_{Ek0} = 0$	[kN]
pré-esforço (estaticamente determinado)	$M_{P0} = 0$	[kNm]	$N_P = 0$	[kN]
zona de flexo-tracção não fissurada				

<u>situação pós-reforço</u>	momento no vão (positivo)		força de compressão	
estado limite último	$M_{Ed} = 119$	[kNm]	$N_{Ed} = 0$	[kN]
coeficiente de segurança parcial	$\gamma_{M,m} = 1,4$	[-]	$\gamma_{N,m} = 0$	[-]
estado de serviço	$M_{Ek} = 85$	[kNm]	$N_{Ek} = 0$	[kN]

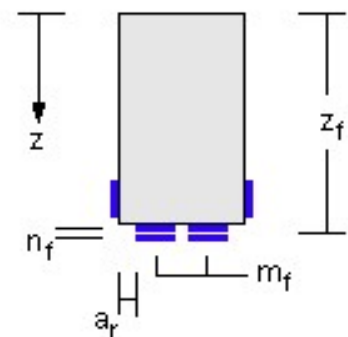
reforço à flexão

sistema FRP

S&P CFK 150/2000
S&P Resin 220

aderido externamente

$E_{fk} = 170000$	[N/mm ²]
$f_{fk} = 2800$	[N/mm ²]
$\varepsilon_{fu} = 16$	[%o]
$\gamma_f = 1,2$	[-]
$\varepsilon_{f,limite} = 7,5$	[%o]



secção transversal do FRP

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

análise

em referencia a

Eurocódigo 2

DIBt Zulassungen Z-36.12-62 / Z-36.12-67

situação pré-reforço

resistência da secção não reforçada:

$$M_{Rd0} = 96 \quad [\text{kNm}]$$

$$M_{Re0} = 111 \quad [\text{kNm}]$$

situação pós-reforço

nível de reforço: $\eta_M = 1,24 \quad [-]$

segurança em caso de perda dos laminados: $\gamma_{Me} = 1,31 \quad [-]$

dimensionamento

$$A_{f,nec} = 0,42 \quad [\text{cm}^2]$$

$$A_{f,efet} = 0,6 \quad [\text{cm}^2]$$

$$M_{Ed} = 119 \quad [\text{kNm}]$$

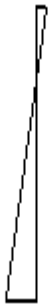
$$M_{Rd} = 129,4 \quad [\text{kNm}]$$

verificação

$$M_{Rd} > M_{Ed}$$



extensões iniciais



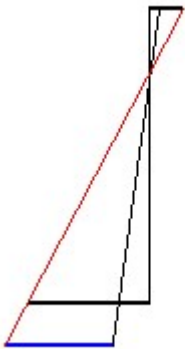
$$\varepsilon_c = -0,552 \quad [‰]$$

$$x = 8,8 \quad [\text{cm}]$$

$$\varepsilon_p = 0 \quad [‰]$$

$$\varepsilon_s = 1,695 \quad [‰]$$

extensões - estado limite último ($A_{f,nec}$)



$$\varepsilon_c = -1,875 \quad [‰]$$

$$x = 7,8 \quad [\text{cm}]$$

$$\varepsilon_p = 0 \quad [‰]$$

$$\varepsilon_s = 6,724 \quad [‰]$$

$$\varepsilon_f = 7,5 \quad [‰]$$

extensões / tensão - estado limite de serviço ($A_{f,efet}$)



$$\varepsilon_c = -0,641 \quad [‰]$$

$$x = 9 \quad [\text{cm}]$$

$$\varepsilon_p = 0 \quad [‰]$$

$$\varepsilon_s = 1,936 \quad [‰]$$

$$\varepsilon_f = 0,369 \quad [‰]$$

$$\varepsilon_{py} = 0 \quad [‰]$$

$$\varepsilon_{sy} = 2,5 \quad [‰]$$



tensões

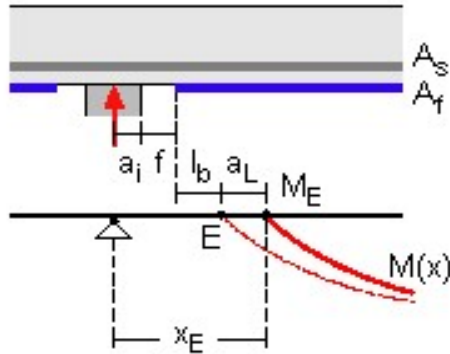
betão	$\sigma_{c,max} = -13,46$	[N/mm ²]
aço de pré-esforço	$\sigma_{p,max} = 0$	[N/mm ²]
aço	$\sigma_{s,max} = 387,15$	[N/mm ²]
material FRP	$\sigma_{f,max} = 62,8$	[N/mm ²]

tensões limites

	$\sigma_{c,limite} = -15$	[N/mm ²]
	$\sigma_{p,limite} = 0$	[N/mm ²]
	$\sigma_{s,limite} = 400$	[N/mm ²]



amarração do FRP na extremidade



apoio intermédio

$$a_i = 0 \quad [\text{cm}]$$

$$a_l = 18 \quad [\text{cm}]$$

tensão de aderência do substrato

$$f_{\text{csm}} = 1,5 \quad [\text{N/mm}^2]$$

resistência à compressão do betão

$$f_{\text{cm,cube}} = 30 \quad [\text{N/mm}^2]$$

forças internas no ponto E

$$x_E = 50 \quad [\text{cm}]$$

$$M_{\text{Ed,E}} = 0 \quad [\text{kNm}]$$

$$N_{\text{Ed,E}} = 0 \quad [\text{kN}]$$

armadura no ponto E

No.	A_s [cm ²]	z_s [cm]
1	6,53	36

força de amarração

No.	$F_{\text{fd,E}}$ [kN]	$F_{\text{bd,max}}$ [kN]
1	0	10,53

comprimento de amarração

$l_{\text{b,max}}$ [cm]	f_{max} [cm]
25,5	6,5

recomendado

l_b [cm]	f [cm]
	5

verificação

apenas o mínimo de ancoragem é requerida ✓

$$f_{\text{max}} > 0$$

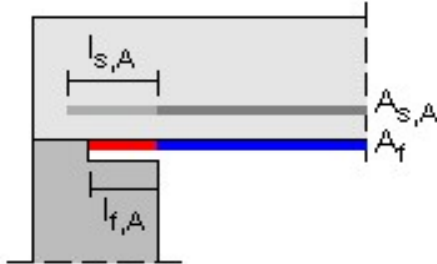
aderência do FRP - cintagem mínima do reforço à flexão no ponto E

$$V_{\text{Ed,x}} = 30 \quad [\text{kN}]$$

$$V_{\text{limit,B1}} = 67,75 \quad [\text{kN}]$$

não é requerida cintagem no ponto E ✓

amarração da armadura de flexão no apoio



apoio intermédio

apoio directo

colada externamente

tensão de aderência do substrato

$$f_{\text{csm}} = 1,5 \quad [\text{N/mm}^2]$$

resistência à compressão do betão

$$f_{\text{cm}} = 30 \quad [\text{N/mm}^2]$$

forças internas no apoio

$$V_{\text{Ed,A}} = 91 \quad [\text{kN}]$$

$$N_{\text{Ed,A}} = 0 \quad [\text{kN}]$$

armadura no apoio

No.	A_s [cm ²]	z_s [cm]	d_s [mm]	$l_{s,A}$ [cm]	$\alpha_{1..5}$ [-]	secção
1	6,53	36	12	35	1	nervurado

força de amarração

força requerida $F_{A,nec} = 45,61 \quad [\text{kN}]$

armadura interna $F_{s,A} = 205,18 \quad [\text{kN}]$

reforço FRP $F_{f,A,nec} = 0 \quad [\text{kN}]$ $A_{f,A,nec} = 0 \quad [\text{cm}^2]$

$F_{f,A,efet} = 0 \quad [\text{kN}]$

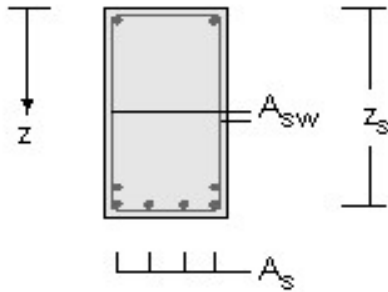
No.	$l_{f,A}$ [cm]	$F_{fd,A}$ [kN]	$l_{b,max}$ [cm]	$F_{bd,max}$ [kN]
1	0	0	25,5	10,53

verificação

$F_{f,A,efet} > F_{f,A,nec}$ ✓

ancoragem suficiente no suporte

reforço ao corte



armadura interna de corte

$$a_{sw} = 10,05 \quad [\text{cm}^2/\text{m}]$$

A 500

$$E_s = 200000 \quad [\text{N}/\text{mm}^2]$$

$$f_{yk} = 500 \quad [\text{N}/\text{mm}^2]$$

forças internas no ponto X

$$V_{Ed,x} = 30 \quad [\text{kN}]$$

$$M_{Ed,x} = 2,3 \quad [\text{kNm}]$$

$$N_{Ed,x} = 0 \quad [\text{kN}]$$

$$x_x = 100 \quad [\text{cm}]$$

força de compressão

resistência ao corte

$$V_{Rd,c} = 67,75 \quad [\text{kN}]$$

$$V_{Rd,s} = 120,88 \quad [\text{kN}]$$

$$V_{Rdf} = 139,25 \quad [\text{kN}]$$



$$V_{Rdf,limite} = 392,17 \quad [\text{kN}]$$

$$\cot \theta = 1 \quad [-]$$

$$\theta = 45 \quad [^\circ]$$

verificação

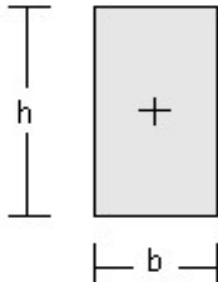
$$V_{Ed} < V_{Rd,c}$$



não há necess. confinamento transversal

S&P FRP Lamella
reforço à flexão e ao corte usando materiais de FRP

secção transversal



geometria

rectangular

b = 40 [cm]
h = 50 [cm]

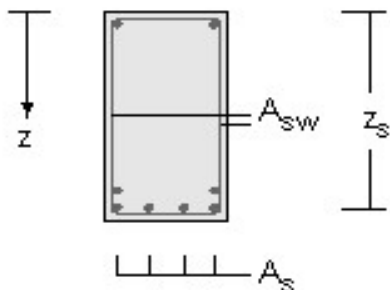
betão

classe:

C 25/30

$f_{ck} = 25$ [N/mm²]
 $\epsilon_{cu} = 3,5$ [%]
 $\epsilon_{c2} = 2$ [%]

$\alpha_{cc} = 1$ [-]
 $E_{cc} = 31476$ [N/mm²]
 $f_{ctm} = 2,56$ [N/mm²]
 $\alpha_{ct} = 1$ [-]



$\gamma_c = 1,5$ [-]

aço

$\gamma_s = 1,15$ [-]

armadura de flexão

varões principais

No.	A_s [cm ²]	z_s [cm]	classe do aço	f_{yk} [N/mm ²]	E_s [N/mm ²]	d_s [mm]
1	6,53	36	A 500	500	200000	12

solicitações

<u>situação pré-reforço</u>	momento no vão (positivo)	força de compressão
no instante do reforço	$M = 83,69$ [kNm]	$N_{Ek0} = 0$ [kN]
pré-esforço (estaticamente determinado)	$M_{P0} = 0$ [kNm]	$N_P = 0$ [kN]
zona de flexo-tracção não fissurada		

<u>situação pós-reforço</u>	momento no vão (positivo)	força de compressão
estado limite último	$M_{Ed} = 121,78$ [kNm]	$N_{Ed} = 0$ [kN]
coeficiente de segurança parcial	$\gamma_{M,m} = 1,4$ [-]	$\gamma_{N,m} = 0$ [-]
estado de serviço	$M_{Ek} = 87$ [kNm]	$N_{Ek} = 0$ [kN]

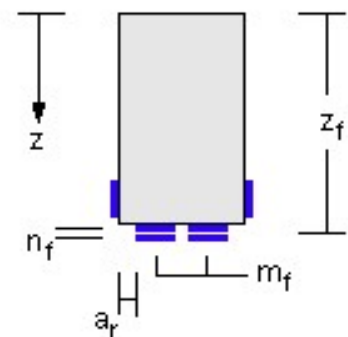
reforço à flexão

sistema FRP

S&P CFK 150/2000
S&P Resin 220

aderido externamente

E_{fk}	= 170000	[N/mm ²]
f_{fk}	= 2800	[N/mm ²]
ε_{fu}	= 16	[%o]
γ_f	= 1,2	[-]
$\varepsilon_{f,limite}$	= 7,5	[%o]



secção transversal do FRP

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

análise

em referencia a

Eurocódigo 2

DIBt Zulassungen Z-36.12-62 / Z-36.12-67

situação pré-reforço

resistência da secção não reforçada:

$$M_{Rd0} = 96 \quad [\text{kNm}]$$

$$M_{Re0} = 111 \quad [\text{kNm}]$$

situação pós-reforço

nível de reforço: $\eta_M = 1,27 \quad [-]$

segurança em caso de perda dos laminados: $\gamma_{Me} = 1,28 \quad [-]$

dimensionamento

$$A_{f,nec} = 0,46 \quad [\text{cm}^2]$$

$$A_{f,efet} = 0,6 \quad [\text{cm}^2]$$

$$M_{Ed} = 121,8 \quad [\text{kNm}]$$

$$M_{Rd} = 129,5 \quad [\text{kNm}]$$

verificação

$$M_{Rd} > M_{Ed}$$



extensões iniciais



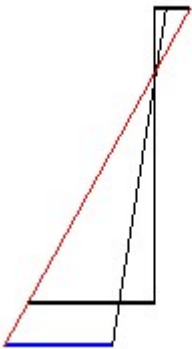
$$\varepsilon_c = -0,639 \quad [‰]$$

$$x = 8,9 \quad [\text{cm}]$$

$$\varepsilon_p = 0 \quad [‰]$$

$$\varepsilon_s = 1,945 \quad [‰]$$

extensões - estado limite último ($A_{f,nec}$)



$$\varepsilon_c = -1,943 \quad [‰]$$

$$x = 7,8 \quad [\text{cm}]$$

$$\varepsilon_p = 0 \quad [‰]$$

$$\varepsilon_s = 6,98 \quad [‰]$$

$$\varepsilon_f = 7,5 \quad [‰]$$

extensões / tensão - estado limite de serviço ($A_{f,efet}$)



$$\varepsilon_c = -0,664 \quad [‰]$$

$$x = 8,9 \quad [\text{cm}]$$

$$\varepsilon_p = 0 \quad [‰]$$

$$\varepsilon_s = 2,012 \quad [‰]$$

$$\varepsilon_f = 0,102 \quad [‰]$$

$$\varepsilon_{py} = 0 \quad [‰]$$

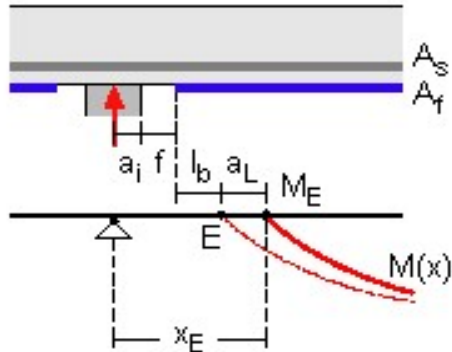
$$\varepsilon_{sy} = 2,5 \quad [‰]$$



tensões

betão	$\sigma_{c,max} = -13,84$	[N/mm ²]
aço de pré-esforço	$\sigma_{p,max} = 0$	[N/mm ²]
aço	$\sigma_{s,max} = 402,33$	[N/mm ²]
material FRP	$\sigma_{f,max} = 17,36$	[N/mm ²]

amarração do FRP na extremidade



apoio intermédio

$a_i = 0$ [cm]
 $a_l = 18$ [cm]

tensão de aderência do substrato

$f_{csm} = 1,5$ [N/mm²]

resistência à compressão do betão

$f_{cm,cube} = 30$ [N/mm²]

forças internas no ponto E

$x_E = 50$ [cm]
 $M_{Ed,E} = 0$ [kNm]
 $N_{Ed,E} = 0$ [kN]

armadura no ponto E

No.	A_s [cm ²]	z_s [cm]
1	6,53	36

força de amarração

No.	$F_{fd,E}$ [kN]	$F_{bd,max}$ [kN]
1	0	10,53

comprimento de amarração

$l_{b,max}$ [cm]	f_{max} [cm]
25,5	6,5

recomendado

l_b [cm]	f [cm]
	5

verificação

apenas o mínimo de ancoragem é requerida

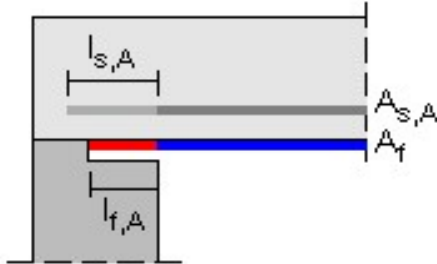


$f_{max} > 0$

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

$t_w = 1 \times 0,19$ [mm] $l_b = 50$ [cm]
 $b_w = 300$ [mm] $F_{bd} = 0$ [kN] $F_{wd} = 0$ [kN]

amarração da armadura de flexão no apoio



apoio intermédio

apoio directo

colada externamente

tensão de aderência do substrato

$$f_{\text{csm}} = 1,5 \quad [\text{N/mm}^2]$$

resistência à compressão do betão

$$f_{\text{cm}} = 30 \quad [\text{N/mm}^2]$$

forças internas no apoio

$$V_{\text{Ed,A}} = 264,83 \quad [\text{kN}]$$

$$N_{\text{Ed,A}} = 0 \quad [\text{kN}]$$

armadura no apoio

No.	A_s [cm ²]	z_s [cm]	d_s [mm]	$l_{s,A}$ [cm]	$\alpha_{1..5}$ [-]	secção
1	6,53	36	12	35	1	nervurado

força de amarração

força requerida $F_{A,nec} = 132,64 \quad [\text{kN}]$

armadura interna $F_{s,A} = 205,18 \quad [\text{kN}]$

reforço FRP $F_{f,A,nec} = 0 \quad [\text{kN}]$

$F_{f,A,efet} = 0 \quad [\text{kN}]$

$A_{f,A,nec} = 0 \quad [\text{cm}^2]$

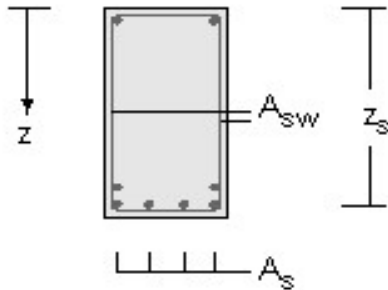
No.	$l_{f,A}$ [cm]	$F_{fd,A}$ [kN]	$l_{b,max}$ [cm]	$F_{bd,max}$ [kN]
1	0	0	25,5	10,53

verificação

$F_{f,A,efet} > F_{f,A,nec}$ ✓

ancoragem suficiente no suporte

reforço ao corte



armadura interna de corte

$$a_{sw} = 10,05 \quad [\text{cm}^2/\text{m}]$$

A 500

$$E_s = 200000 \quad [\text{N}/\text{mm}^2]$$

$$f_{yk} = 500 \quad [\text{N}/\text{mm}^2]$$

forças internas no ponto X

$$V_{Ed,x} = 142 \quad [\text{kN}]$$

$$M_{Ed,x} = 27 \quad [\text{kNm}]$$

$$N_{Ed,x} = 0 \quad [\text{kN}]$$

$$x_x = 100 \quad [\text{cm}]$$

força de compressão

resistência ao corte

$$V_{Rd,c} = 67,75 \quad [\text{kN}]$$

$$V_{Rd,s} = 120,81 \quad [\text{kN}]$$

$$V_{Rdf} = 167,18 \quad [\text{kN}]$$

$$\cot \theta = 1 \quad [-]$$

$$\theta = 45 \quad [^\circ]$$

$$V_{Rdf,limite} = 391,97 \quad [\text{kN}]$$

verificação

$$V_{Rd} > V_{Ed} \quad V_{Ed} < V_{Rd,limite}$$

amarrar no banzo comprimido!

$$x = 25 \quad [\text{cm}]$$

material de reforço

S&P C-Sheet 640

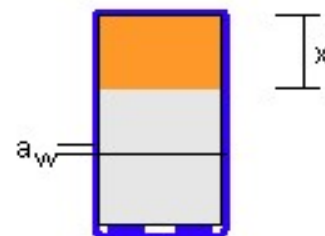
S&P Resin 55

$$E_{fk} = 640000 \quad [\text{N}/\text{mm}^2]$$

$$f_{fk} = 2650 \quad [\text{N}/\text{mm}^2]$$

$$\varepsilon_{limite} = 2 \quad [^\circ]$$

$$\gamma_E = 1,2 \quad [-]$$



reforço ao corte adicional

$$n_w = 1 \quad [\text{pcs}]$$

$$t_w = 0,19 \quad [\text{mm}]$$

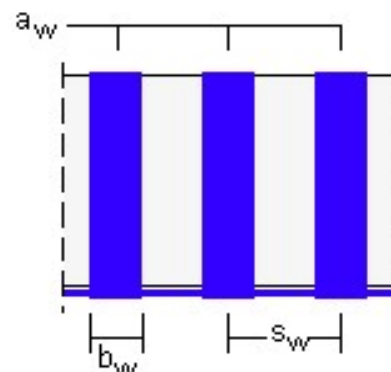
$$b_w = 200 \quad [\text{mm}]$$

$$s_w = 40 \quad [\text{cm}]$$

$$\alpha = 90 \quad [^\circ]$$

$$\Delta V_{wd} = 56,03 \quad [\text{kN}]$$

$$\Delta V_{w,min} = 30,85 \quad [\text{kN}]$$



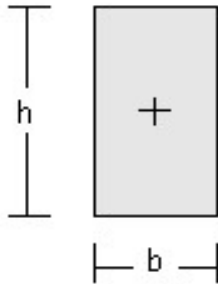
amarração de estribo externo adicional

$$F_{wd} = 34,43 \quad [\text{kN}]$$

$$f_{wd} = 86,07 \quad [\text{kN}/\text{m}]$$

S&P FRP Lamella
reforço à flexão e ao corte usando materiais de FRP

secção transversal



geometria

rectangular

b = 40 [cm]
h = 50 [cm]

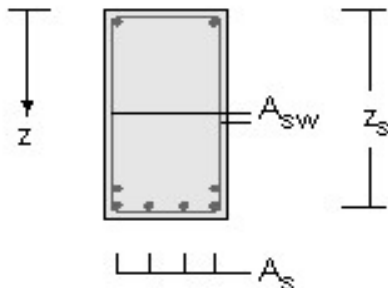
betão

classe:

C 25/30

$f_{ck} = 25$ [N/mm²]
 $\epsilon_{cu} = 3,5$ [%]
 $\epsilon_{c2} = 2$ [%]

$\alpha_{cc} = 1$ [-]
 $E_{cc} = 31476$ [N/mm²]
 $f_{ctm} = 2,56$ [N/mm²]
 $\alpha_{ct} = 1$ [-]



$\gamma_c = 1,5$ [-]

aço

$\gamma_s = 1,15$ [-]

armadura de flexão

varões principais

No.	A_s [cm ²]	z_s [cm]	classe do aço	f_{yk} [N/mm ²]	E_s [N/mm ²]	d_s [mm]
1	2,36	4	A 500	500	200000	10

solicitações

<u>situação pré-reforço</u>	momento no apoio (negativo)	força de compressão
no instante do reforço	$M = 23,2$ [kNm]	$N_{Ek0} = 0$ [kN]
pré-esforço (estaticamente determinado)	$M_{p0} = 0$ [kNm]	$N_p = 0$ [kN]
zona de flexo-tracção não fissurada		

<u>situação pós-reforço</u>	momento no apoio (negativo)	força de compressão
estado limite último	$M_{Ed} = 55,85$ [kNm]	$N_{Ed} = 0$ [kN]
coeficiente de segurança parcial	$\gamma_{M,m} = 1,4$ [-]	$\gamma_{N,m} = 0$ [-]
estado de serviço	$M_{Ek} = 39,9$ [kNm]	$N_{Ek} = 0$ [kN]

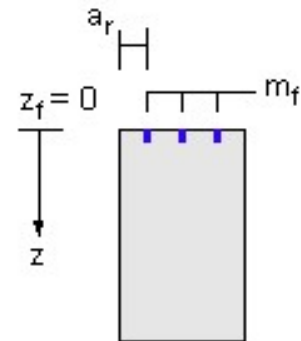
reforço à flexão

sistema FRP

S&P CFK 150/2000
S&P Resin 220

laminados inseridos

E	$= 170000$	[N/mm ²]
f_{fk}	$= 2800$	[N/mm ²]
ε_{fu}	$= 16$	[%o]
γ_f	$= 1,2$	[-]
k	$= 0,8$	[-]
$\varepsilon_{f,limite}^{\varepsilon}$	$= 10,98$	[%o]



secção transversal do FRP

No.	secção [mm/mm]	n_f [pcs]	m_f [pcs]	s_f [cm]	A_f [cm ²]	z_f [cm]
1	10 / 1.4	1	1	0	0,14	0

análise

em referencia a

Eurocódigo 2

DIBt Zulassungen Z-36.12-62 / Z-36.12-67

situação pré-reforço

resistência da secção não reforçada:

$$M_{Rd0} = 46,2 \quad [\text{kNm}]$$

$$M_{Re0} = 53,2 \quad [\text{kNm}]$$

situação pós-reforço

nível de reforço:

$$\eta_M = 1,21 \quad [-]$$

segurança em caso de
perda dos laminados:

$$\gamma_{Me} = 1,33 \quad [-]$$

dimensionamento

$$A_{f,nec} = 0,11 \quad [\text{cm}^2]$$

$$A_{f,efet} = 0,14 \quad [\text{cm}^2]$$

$$M_{Ed} = 55,8 \quad [\text{kNm}]$$

$$M_{Rd} = 58,2 \quad [\text{kNm}]$$

verificação

$$M_{Rd} > M_{Ed}$$



extensões iniciais



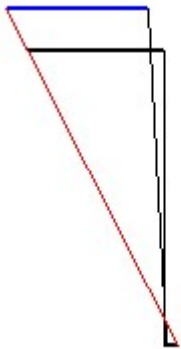
$$\epsilon_s = 1,119 \quad [‰]$$

$$\epsilon_p = 0 \quad [‰]$$

$$x = 6,2 \quad [cm]$$

$$\epsilon_c = -0,175 \quad [‰]$$

extensões - estado limite último ($A_{f,nec}$)



$$\epsilon_f = 10,862 \quad [‰]$$

$$\epsilon_s = 11,039 \quad [‰]$$

$$\epsilon_p = 0 \quad [‰]$$

$$x = 4,2 \quad [cm]$$

$$\epsilon_c = -1,095 \quad [‰]$$

extensões / tensão - estado limite de serviço ($A_{f,efet}$)



$$\epsilon_f = 0,839 \quad [‰]$$

$$\epsilon_s = 1,881 \quad [‰]$$

$$\epsilon_p = 0 \quad [‰]$$

$$\epsilon_{sy} = 2,5 \quad [‰]$$

$$\epsilon_{py} = 0 \quad [‰]$$



$$x = 6,3 \quad [cm]$$

$$\epsilon_c = -0,301 \quad [‰]$$

tensões

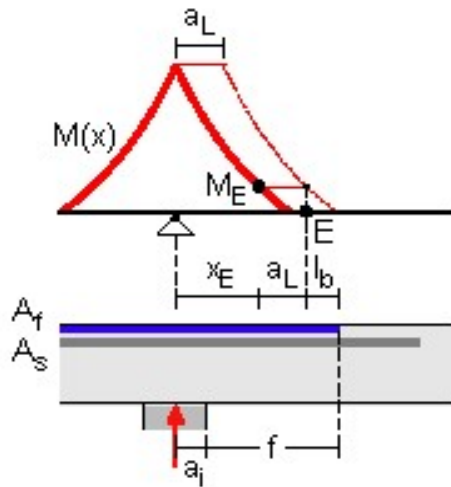
betão	$\sigma_{c,max} = -6,96$	[N/mm ²]
aço de pré-esforço	$\sigma_{p,max} = 0$	[N/mm ²]
aço	$\sigma_{s,max} = 376,28$	[N/mm ²]
material FRP	$\sigma_{f,max} = 142,66$	[N/mm ²]

tensões limites

$\sigma_{c,limite} = -15$	[N/mm ²]
$\sigma_{p,limite} = 0$	[N/mm ²]
$\sigma_{s,limite} = 400$	[N/mm ²]



amarração do FRP na extremidade



$a_i = 20 \text{ [cm]}$
 $a_i = 22,7 \text{ [cm]}$

resistência adesiva de corte
S&P Resin 220

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

forças internas no ponto E

$x_E = 100 \text{ [cm]}$
 $M_{Ed,E} = 46,2 \text{ [kNm]}$
 $N_{Ed,E} = 0 \text{ [kN]}$

armadura no ponto E

No.	A_s [cm ²]	z_s [cm]
1	2,36	4

força de amarração

No.	$F_{fd,E}$ [kN]	F_{bd} [kN]
1	5,6	5,6

comprimento de amarração

l_b [cm]	f_{min} [cm]
3,3	106

verificação

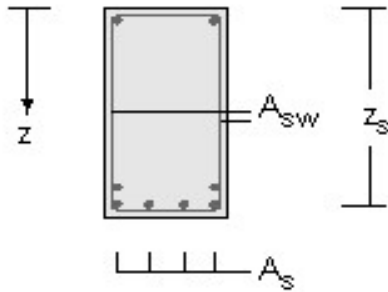
$F_{fd,E} < F_{bd}$ ✓

apenas o mínimo de ancoragem é requerida

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

não é requerida cintagem no ponto E ✓

reforço ao corte



armadura interna de corte

$$a_{sw} = 19,63 \quad [\text{cm}^2/\text{m}]$$

A 500

$$E_s = 200000 \quad [\text{N}/\text{mm}^2]$$

$$f_{yk} = 500 \quad [\text{N}/\text{mm}^2]$$

forças internas no ponto X

$$V_{Ed,x} = 59,4 \quad [\text{kN}]$$

$$M_{Ed,x} = 25 \quad [\text{kNm}]$$

$$N_{Ed,x} = 0 \quad [\text{kN}]$$

$$x_x = 50 \quad [\text{cm}]$$

força de compressão

resistência ao corte

$$V_{Rd,c} = 68,83 \quad [\text{kN}]$$

$$V_{Rd,s} = 321,33 \quad [\text{kN}]$$

$$V_{Rdf} = 753,45 \quad [\text{kN}]$$



$$V_{Rdf,limite} = 391,99 \quad [\text{kN}]$$

$$\cot \theta = 1 \quad [-]$$

$$\theta = 45 \quad [^\circ]$$

verificação

$$V_{Ed} < V_{Rd,c}$$



não há necess. confinamento transversal