



isec
Engenharia

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

**Reforço de Estruturas de Betão Armado
com Compósitos Reforçados com Fibras
de Carbono CFRP.**

Autor

José Carlos Fernandes dos Santos

Orientador

Prof. Doutor António José Pedroso de Moura Correia

Coimbra, setembro, 2022

INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA



isec
Engenharia

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**Reforço de Estruturas de Betão Armado com
Compósitos Reforçados com Fibras de Carbono CFRP**

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

Autor

José Carlos Fernandes dos Santos

Orientador

Prof. Doutor António José Pedroso de Moura Correia

INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA

Coimbra, setembro, 2022

AGRADECIMENTOS

Inicialmente tenho de agradecer o meu orientador Doutor António José Pedroso de Moura Correia pela vontade que demonstrou em ajudar e em aprender coisa novas, que por si é inspirador. Tenho também de expressar que a sua disponibilidade foi muito importante para garantir o sucesso da pesquisa, da organização e do produto final no geral.

Tenho de agradecer aos meus pais pelo constante apoio e suporte durante o todo o processo.

Gostaria de agradecer a disponibilidade e a amabilidade da engenheira Joana Carvalho pelos conselhos e pelo material disponibilizado.

Agradeço a dedicação, a vontade de ajudar, as orientações relativas ao programa de dimensionamento e a paciência demonstrada aquando das explicações que a Engenheira Joana Pereira demonstrou.

RESUMO

A dissertação vai abordar sistemas alternativos para reforço das estruturas, denominados por FRP. Serão dados a conhecer diversos tipos de FRP mais utilizados e o porquê, as técnicas utilizadas na sua construção, aplicação dos mesmos e informações mais específicas necessárias ter em consideração, com as condições durante um incêndio.

Vão ser dados a conhecer também alguns pormenores e resultados de ensaios e experiências desenvolvidas por autores/as para melhorar a compressão dos conceitos e para apresentar informações que puderam ser úteis para o desenvolvimento do documento e para possíveis desenvolvimentos futuros.

O dimensionamento será efetuado com recurso a um programa de cálculo desenvolvido pela empresa S&P Reinforcement, nos quais serão tidos em consideração apenas alguns elementos da estrutura, visto que existe muito pouca informação sobre os mesmos.

Os elementos em estudo são:

- Pilares;
- Se possível, as paredes da caixa de elevadores.

No final serão analisadas as conclusões, incluindo uma critica sobre as fases de dimensionamento e se o que foi feito será a melhor forma ou se poderá ser melhorado.

Palavras-chave: Materiais Compósitos Reforçados com Fibra (FRP), Reforço e Reabilitação de Estruturas, Técnica EBR, Técnica NSM, Laminados, Dimensionamento

ABSTRACT

The dissertation will address alternative systems for strengthening structures, called FRP. The several types of FRP most used and why, the techniques used in its construction, application of them and more specific information necessary to consider, such as the resistant capacity in fire conditions, will be made known.

Some details and results of tests and experiments developed by authors will also be made known to improve the compression of concepts and to present information that could be useful for the development of the document and for future developments.

The design will be made using a calculation program developed by the company S&P Reinforcement, in which only some elements of the structure will be considered, since there is little information about them. The elements under study are:

- Columns.
- If possible, the walls of the elevator box.

In the end, the conclusions will be examined, including a criticism of the sizing phases and whether what has been done will be the best way or whether it can be improved.

Keywords: Fiber Reinforced Composite Materials (FRP), Reinforcement and Rehabilitation of Structures, EBR Technique, NSM technique, Laminates, Sizing.

Conteúdo

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	ENQUADRAMENTO	17
1.2	OBJETIVOS.....	17
1.3	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	18
2	ESTADO DA ARTE.....	19
2.1	MANTAS DE CFRP NO CONFINAMENTO DE ELEMENTOS DE BETÃO SUBMETIDOS A COMPRESSÃO	19
2.2	CONFINAMENTO DE PILARES DE BETÃO ARMADO REFORÇADOS TOTAL E PARCIALMENTE COM MANTAS DE CFRP SUBMETIDOS A CARRRGAMENTOS CICLICOS DE COMPRESSÃO	22
2.3	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA LIGAÇÃO FRP-BETÃO	24
2.4	LIGAÇÕES EM SUPERFÍCIES CURVAS ENTRE COMPÓSITOS DE FRP E BETÃO SUJEITAS A TEMPERATURAS ELEVADAS	25
2.5	(The Sensitivity of Acoustic-Laser Technique for Detecting the Defects in CFRP-bonded Concrete Systems) (SENSIBILIDADE DE TÉCNICA ACÚSTICA/LASER PARA DETECÇÃO DE DEFEITOS NO REFORÇO CFRP) .	26
2.6	ACTIVE CFRP-BASED CONFINEMENT STRATEGIES FOR RC COLUMNS WITH RECTANGULAR CROSS SECTIONS (ESTRATÉGIAS DE CONFINAMENTO DE CFRP ACTIVAS PARA PILARES COM SECÇÕES RECTANGULARES).....	28
2.7	NOVA ABORDAGEM NO REFORÇO DE ESTRUTURAS COM MATERIAIS COMPÓSITOS	30
3	COMPÓSITOS DE POLÍMEROS FRP	32
3.1	CONSIDERAÇÕES	32
3.2	CONSTITUINTES DOS FRP E ALGUMAS PROPRIEDADES	32
3.2.1	FIBRAS.....	34
3.2.2	MATRIZ	38
3.2.3	PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	39
3.2.4	RESINAS	40
3.3	REVESTIMENTOS	42
3.4	PROCESSOS DE FABRICO	43
3.5	TIPOS DE SISTEMAS.....	45
3.5.1	SISTEMAS CURADOS “IN SITU” (HAND LAY-UP) – MANTAS E TECIDOS FLEXÍVEIS	46
3.5.1.1	MANTAS DE CFRP NO CONFINAMENTO DE ELEMENTOS DE BETÃO SUBMETIDOS À COMPRESSÃO.....	48
3.5.2	SISTEMAS PRÉ-FABRICADOS LAMINADOS E VARÕES CFRP	51
3.5.2.1	LAMINADOS	51
3.5.2.2	UTILIZAÇÃO DOS LAMINADOS PARA REFORÇAR O PILAR À FLEXÃO	54
3.5.3	SISTEMAS ESPECIAIS	54
3.6	TÉCNICAS DE APLICAÇÃO	58
3.6.1	REQUISITOS GERAIS.....	58

3.6.2	TÉCNICAS	59
3.7	COMPORTAMENTO AO FOGO.....	62
3.8	COMPORTAMENTO A LONGO PRAZO	64
3.9	MODOS DE RUTURA (ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS)	65
3.9.1	AÇÃO COMPLETA DO COMPÓSITO.....	65
3.9.2	PERDA DE AÇÃO POR PARTE DO COMPÓSITO.....	66
4	Dimensionamento.....	68
4.1	CONSIDERAÇÕES	68
4.2	DOCUMENTAÇÃO.....	68
4.3	PROPOSTA DE DIMENSIONAMENTO.....	69
4.3.1	PILARES	69
4.3.1.1	VERIFICAÇÃO.....	70
4.3.1.1.1	PILAR RECTANGULAR	71
4.3.1.1.2	PILAR CIRCULAR.....	73
4.3.1.2	DIMENSIONAMENTO (CONFINADO EM TODA A SUA ALTURA) - [FIB 14.4].....	74
4.3.1.2.1	PONTO 1 – IMPOSIÇÃO DE $\epsilon_{c,i}$	75
4.3.1.2.2	PONTO 2 – TENSÃO LATERAL (σ_l)	75
4.3.1.2.3	PONTO 3 – RESISTÊNCIA MÁXIMA DE CONFINAMENTO (f_{cc}).....	76
4.3.1.2.3.1	CIRCULAR	76
4.3.1.2.3.2	RETANGULAR	76
4.3.1.2.4	PONTO 4 – CALCULAR O VALOR DA TENSÃO CORRENTE NO BETÃO (σ_c)	76
4.3.1.2.5	PONTO 5 – CALCULAR O VALOR DA EXTENSÃO LATERAL (ϵ_l).....	77
4.3.1.2.6	PONTO 6 – CALCULAR A TENSÃO LATERAL CORRENTE (σ_l).....	78
4.3.1.2.6.1	CIRCULAR	78
4.3.1.2.6.2	RETANGULAR	78
4.3.1.2.7	PONTO 7 – VERIFICAÇÃO DOS VALORES	79
4.3.1.3	DIMENSIONAMENTO CONSIDERANDO OS MOMENTOS FLECTORES - [FIB 14.4].....	80
4.3.1.4	DIMENSIONAMENTO - [ACI 440.2R-08] – ESFORÇO AXIAL – CONFINAMENTO.....	80
4.3.1.4.1	PONTO 1 – COMPUTAR AS PROPRIEDADES DO FRP	80
4.3.1.4.2	PONTO 2 – DETERMINAR A RESISTÊNCIA MÁXIMA DE CONFINAMENTO DO BETÃO	81
4.3.1.4.3	PONTO 3 – DETERMINAR A PRESSÃO MÁXIMA DE CONFINAMENTO.....	81
4.3.1.4.4	PONTO 4 – DETERMINAR O NÚMERO DE CAMADAS.....	82
4.3.1.4.5	PONTO 5 – VERIFICAÇÃO DA EXTENSÃO AXIAL ÚLTIMA DO BETÃO CONFINADO	83
4.3.1.5	DIMENSIONAMENTO - [ACI 440.2R-08] – ESFORÇO TRANSVERSO.....	84
4.3.1.5.1	PONTO 1 – VERIFICAÇÃO DA NECESSIDADE DE REFORÇO	84
4.3.1.5.2	PONTO 2 – COMPUTAR AS PROPRIEDADES DO FRP	85
4.3.1.5.3	PONTO 3 – CALCULAR O VALOR EFETIVO DA EXTENSÃO AO NÍVEL DO FRP PARA REFORÇO A ESFORÇO TRANSVERSO.....	85
4.3.1.5.4	PONTO 4 – DETERMINAR A ÁREA DE FRP REQUERIDA	86
4.3.1.5.5	PONTO 5 – DETERMINAR O NÚMERO DE CAMADAS.....	87
4.3.2	MUROS E PAREDES	88
4.3.2.1	DIMENSIONAMENTO	88
4.3.2.1.1	ESTADO INICIAL	88
4.3.2.1.2	DETERMINAÇÃO DA ÁREA NECESSÁRIA (ESTADO LIMITE ÚLTIMO).....	91
4.3.2.1.3	ESCOLHER A ÁREA FRP	93
4.3.2.2	VERIFICAÇÕES	93

4.3.2.2.1	LIMITAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES	94
4.3.2.2.2	LIMITAÇÃO DAS TENSÕES	95
4.3.2.2.3	LIMITAÇÃO DA ABERTURA DE FENDAS	97
4.3.2.2.4	LIMITAÇÃO DA FENDILHAÇÃO NAS INTERFACES.....	98
4.3.2.2.5	DUCTILIDADE	99
4.3.2.2.6	VERIFICAÇÃO DA ADESÃO DO FRP	100
4.3.2.3	ESFORÇO TRANSVERSO	102
4.3.2.3.1	PONTO 1 – VERIFICAÇÃO DA NECESSIDADE DE REFORÇO	103
4.3.2.3.2	PONTO 2 – DETERMINAR A RESISTÊNCIA DO REFORÇO	103
4.3.2.3.3	PONTO 3 – OUTRA FORMA DE ANALISAR	105
5	CASO DE ESTUDO	107
5.1	CONSIDERAÇÕES	107
5.2	PROJETO DE REFORÇO	108
5.2.1	PILARES	111
5.2.1.1	CONFINAMENTO - COLONNA.....	112
5.2.1.1.1	NOME DO PROJETO	112
5.2.1.1.2	ESCOLHER MODELOS.....	113
5.2.1.1.3	SECÇÃO TRANSVERSAL	114
5.2.1.1.4	ESCOLHA DO AÇO	115
5.2.1.1.5	ESCOLHA DO BETÃO	116
5.2.1.1.6	ESCOLHA DO FRP	118
5.2.1.1.7	APLICAÇÃO DO ESFORÇO AXIAL	119
5.2.1.1.8	RESULTADOS	120
5.2.1.2	FLEXÃO – LAMELLA	123
5.2.1.2.1	NOME DO PROJETO E ESTRUTURA.....	123
5.2.1.2.2	ESCOLHA DOS REGULAMENTOS.....	124
5.2.1.2.3	ESCOLHA DA SECÇÃO	125
5.2.1.2.4	ESCOLHA DO BETÃO	126
5.2.1.2.5	ESCOLHA DO AÇO	127
5.2.1.2.6	ARMADURAS DE FLEXÃO	129
5.2.1.2.7	EXTREMIDADE DA ARMADURA	131
5.2.1.2.8	SOLICITAÇÕES PRÉ-REFORÇO	132
5.2.1.2.9	SOLICITAÇÕES PÓS-REFORÇO.....	133
5.2.1.2.10	ESCOLHA DO FRP	135
5.2.1.2.11	A SECÇÃO TRANSVERSAL DO FRP	137
5.2.1.2.12	REFORÇO TRANSVERSO	139
5.2.1.2.13	CASOS PARTICULARES.....	139
5.2.1.2.14	RESULTADOS	141
5.2.2	PAREDE DA CAIXA DE ELEVADOR	143
6	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	144
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	146
8	ANEXOS.....	149
8.1	Outros Reforços.....	149
8.2	Esforços e armaduras	149

8.3	<i>Peças desenhadas [reforços]</i>	149
8.4	<i>Imagens do excel de dimensionamento</i>	149

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.1 - Exemplificação das disposições das mantas (Ferreira et al, 2003)	20
Figura 2.1.2 - Exemplos de rutura verificados do trabalho (Ferreira et al, 2003)	21
Figura 2.2.1 - Pormenor dos sistemas utilizados (Ferreira et al, 2008)	23
Figura 2.2.2 - Posição dos LVDTs (Ferreira et al, 2008)	23
Figura 2.4.1 - Tensões interfaciais numa ligação colada em uma superfície curva (Biscaia et al, 2016)	25
Figura 2.5.1 - Provete utilizado (Qiu et al, 2016)	26
Figura 2.5.2 - Componentes e Distribuição dos componenetes (Qiu et al, 2016)	27
Figura 2.6.1 - Várias percentagens de água na resina (Agante et al, 2008)	29
Figura 2.7.1 - Técnica de reforço aplicada no pilar (Barros et al, 2002)	31
Figura 2.7.2 - Localização dos transdutores e extensómetros (Barros et al, 2002)	31
Figura 3.2.1 - Comparação de algumas propriedades entre o aço, alumínio e o compósito (Juvantes, 1999)	33
Figura 3.2.2 - Compósito FRP (Juvandes, 2011)	34
Figura 3.2.3 - Relação tensão-deformação das fibras, matriz e FRP (Carvalho, 2021)	35
Figura 3.2.4 - Relação tensão/extensão dos vários materiais indicados (Barros, 2004)	36
Figura 3.4.1 - Processo de pultrusão (fiberprofil)	44
Figura 3.4.2 - Processo de injeção em vácuo (Mcdaniel et al, 2014)	45
Figura 3.4.3 - Exemplo da disposição das fibras (Mcdaniel et al, 2014)	45
Figura 3.5.1 - Sistema curado “in situ” – manta (S&P C-Sheet 240)	46
Figura 3.5.2 - Reforço das estátuas do Edifício Palladium no Porto (Juvandes, 2011)	47
Figura 3.5.3 - Demonstração visual das várias direções (Juvandes, 2011)	48
Figura 3.5.4 - Exemplo da deformação do pilar (Figueira, 2016)	48
Figura 3.5.5 - Várias formas de reforço de pilares (Figueira, 2016)	49
Figura 3.5.6 - Diagrama tensão/extensão (Figueira, 2016)	49
Figura 3.5.7 - Sistema pré-fabricado – laminado e varões CFRP (Catálogo S&P C-Laminate)	51
Figura 3.5.8 - Sistema pré-fabricado - varões CFRP (Juvandes, 2011)	51
Figura 3.5.9 - Laminados em um pilar pela técnica NSM (S&P C-Laminate (slot-applied))	52
Figura 3.5.10 - Utilização de ancoragens com laminados pela técnica EBR(S&P C-Laminate (End-Anchor))	53
Figura 3.5.11 - Utilização do pré-esforço (Reinforcement – Underground Garage, Coop, Kasparstrasse – Bern, Switzerland)	53
Figura 3.5.12 - Sistema especial de aplicação automática em pilares (Figueira, 2016)	55
Figura 3.5.13 - Aplicação prática do sistema acima (fib 14.2)	55
Figura 3.5.14 - Aplicação do método em um pilar (Esteves, 2003)	56
Figura 3.5.15 - Exemplificação da nova técnica de deslocamento (fib 14.2)	56
Figura 3.5.16 - Sistema de aquecimento para cura rápida (fib 14.2)	57
Figura 3.5.17 - Sistema de aquecimento para cura rápida na prática (fib 14.2)	57
Figura 3.6.1 - Aplicação de laminados unidirecionais pela técnica EBR (S&P C-Laminate surface applied)	60
Figura 3.6.2 - Aplicação de laminados bidirecionais pela técnica EBR (S&P C-Laminate surface applied)	60
Figura 3.6.3 - Aplicação da manta pela técnica EBR (S&P C-Sheet 240)	61
Figura 3.6.4 - Aplicação de laminados em uma parede pela técnica NSM (S&P C-Laminate (slot-applied))	62
Figura 3.9.1 - Interfaces mais comuns de rutura (fib bulletin 14)	66
Figura 3.9.2 - Exemplos da rotura do betão junto à superfície e abaixo das armaduras (fib bulletin 14)	66
Figura 4.3.1 - Pormenor demonstrativo do pilar retangular (S&P Colonna)	71

Figura 4.3.2 - Representação do confinamento em secções não circulares (fib bulletin 14)	72
Figura 4.3.3 - Pormenor demonstrativo do pilar circular (S&P Colonna)	73
Figura 4.3.4 - Representação das tensões de confinamento laterais originadas pelo confinamento (fib bulletin 14)	74
Figura 4.3.5 - Fluxograma do procedimento iterativo (fib bulletin 14)	75
Figura 4.3.6 - Gráfico tensão/extensão (Avis Technique 3/14-773)	76
Figura 4.3.7 - Representação dos valores σ_f e α (ACI 440.2R-08)	87
Figura 4.3.8 - Secção da parede	88
Figura 4.3.9 - Estado Inicial (fib bulletin 14)	89
Figura 4.3.10 - Diagrama de Tensões (Estruturas de Betão I - Técnico de Lisboa)	90
Figura 4.3.11 - Diagrama tensão extensão do betão (Manual do FRP Lamella)	91
Figura 4.3.12 - Análise da secção no estado limite último com os respetivos diagramas de extensões e tensões (fib 14.4)	92
Figura 4.3.13 - Força máxima transferida entre o FRP e o betão (CNR-DT 200/2004)	102
Figura 4.3.14 - Reforço transversal do pilar (fib 14.5)	103
Figura 5.2.1 - Planta do Edifício na Lousã	109
Figura 5.2.2 - Corte Transversal do Edifício na Lousã	109
Figura 5.2.3 - Planta do edifício de PEC	110
Figura 5.2.4 - Corte Transversal de PEC	110
Figura 5.2.5 - Planta considerada para o confinamento (PEC-2019/2020)	111
Figura 5.2.6 - Implantação dos pilares em planta no edifício da Lousã	112
Figura 5.2.7 - Nome do projeto (Colonna)	113
Figura 5.2.8 - Escolha dos modelos (Colonna)	114
Figura 5.2.9 - Escolha da secção (Colonna)	114
Figura 5.2.10 - Escolha das armaduras (Colonna)	115
Figura 5.2.11 - Submenu de escolha (Colonna)	116
Figura 5.2.12 - Introdução da resistência do aço (colonna)	116
Figura 5.2.13 - Submenu de escolha (Colonna)	117
Figura 5.2.14 - Aplicação do valor correto da resistência (Colonna)	117
Figura 5.2.15 - Submenu de escolha do FRP (Colonna)	118
Figura 5.2.16 - Submenu para a escolha da resina (Colonna)	119
Figura 5.2.17 - Aplicação do esforço axial (Colonna)	120
Figura 5.2.18 - Primeira simulação (Colonna)	121
Figura 5.2.19 - Segunda simulação [utilizada] (Colonna)	121
Figura 5.2.20 - Extensões e resistências triaxiais (Colonna)	122
Figura 5.2.21 - Menu inicial (Lamella)	124
Figura 5.2.22 - Escolha dos regulamentos e códigos (Lamella)	125
Figura 5.2.23 - Escolha da secção (Lamella)	125
Figura 5.2.24 - Informações da secção (Lamella)	126
Figura 5.2.25 - Escolha da classe de betão (Lamella)	126
Figura 5.2.26 - Valores considerados para o betão (Lamella)	127
Figura 5.2.27 - Escolha da classe do aço (Lamella)	128
Figura 5.2.28 - Valores considerados para o aço (Lamella)	128
Figura 5.2.29 - Botão para mudar valores definidos (Lamella)	129
Figura 5.2.30 - Exemplo da localização das armaduras tracionadas	130
Figura 5.2.31 - Quadro de armaduras (Lamella)	130
Figura 5.2.32 - Representação dos valores necessários (Lamella)	131
Figura 5.2.33 - Apresentação dos valores relacionados com a extremidade (Lamella)	132
Figura 5.2.34 - Menu de aplicação dos esforços pré-reforço (Lamella)	132
Figura 5.2.35 - Menu de aplicação dos esforços a resistir (Lamella)	134
Figura 5.2.36 - Menu de escolha do CFRP (Lamella)	135
Figura 5.2.37 - Apresentação do submenu de escolha (Lamella)	136

Figura 5.2.38 - Escolha dos valores para primeira iteração (Lamella)	137
Figura 5.2.39 - Iteração capaz de resistir ao pretendido (Lamella)	138
Figura 5.2.40 - Erro incomum de incapacidade resistente (Lamella)	139
Figura 5.2.41 - Erro relativo à falha na zona de compressão (Lamella)	140
Figura 5.2.42 – Primeiros resultados para o estado limite último (Lamella)	141
Figura 5.2.43 - Segundos resultados (Lamella)	142
Figura 5.2.44 – Secção da parede	143

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Composição do betão utilizados nos provetes [kg/m ³] (Ferreira et al, 2003)	19
Tabela 2 -Tabela resumo dos ensaios efetuados (Ferreira et al, 2003)	20
Tabela 3 - Detalhes dos provetes (Agante et al, 2008)	29
Tabela 4 - Tabela resumo das propriedades dos materiais (Barros, 2004)	37
Tabela 5 - Propriedades das várias fibras (Figueira, 2016)	37
Tabela 6 - Valores mais comuns das várias fibras (Carvalho, 2021)	38
Tabela 7 - Tabela resumo das propriedades das resinas (Barros, 2004).....	41
Tabela 8 - Propriedades de resina epóxi (Carvalho, 2021)	42
Tabela 9 - Sistemas e suas utilizações (Carvalho, 2021)	46
Tabela 10 - Resumo dos diferentes tipos de sistemas curados “in situ” (Figueira, 2016)	47
Tabela 11 - Materiais que constituem os sistemas FRP mais comuns (Juvandes, 2011)	54
Tabela 12 - Coeficiente de Redução Ambiental (ACI 440.2R-08)	81
Tabela 13 - Factor de redução adicional recomendado que tem em conta o reforço a esforço transversal (ACI 440.2R-08)	83
Tabela 14 - Coeficiente de Redução Ambiental (ACI 440.2R-08)	85
Tabela 15 - Tabela resumo	122
Tabela 16 - Tabela resumo dos reforços	142
Tabela 17 - Legenda da tabela resumo dos reforços	143

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	- <i>Comité Euro-International du Béton</i>
CEN	- <i>Comité Européen de Normalização</i>
CFRP	- Polímeros (ou compósitos) reforçados com fibras de carbono (C)
CFS	- <i>Carbon fibre sheets</i> , mantas de FRP
CNR	- <i>Consiglio Nazionale delle Ricerche</i>
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>
LNEC	- 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 (GPa)
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 início 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 do 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)
N_{Edf}	- força axial total incidente no pilar [após intervenção] (KN)
$N_{Rd,p}$	- capacidade resistente [axial] da secção (KN)
f_{co}	- tensão de cedência do betão não confinado (MPa)
f_{so}	- tensão de cedência do aço (MPa)
k_ε	- coeficiente de eficácia do confinamento

k_e	- coeficiente de eficácia do confinamento
A_c	- área de betão (cm^2)
A_s	- área de armadura ordinária (cm^2)
A_{st}	- área de armadura ordinária (cm^2)
A_g	- área total da secção transversal (cm^2)
A_u	- área total de betão não confinado em secções retangulares (cm^2)
f_{cc}	- tensão de cedência do betão confinado à compressão (MPa)
E_{sec}	- módulo secante
f_{fu}^*	- resistência última à tração do FRP (MPa)
f_{fu}	- resistência última à tração do FRP contabilizando o coeficiente C_E (MPa)
C_E	- coeficiente de redução ambiental
f'_{cc}	- resistência máxima do betão confinado à compressão (MPa)
f_l	- pressão máxima de confinamento (MPa)
k_a	- fator de eficiência do reforço FRP tendo em conta o valor f'_{cc}
k_b	- fator de eficiência do reforço FRP tendo em conta o valor ε_{ccu}
f'_c	- tensão de cedência do betão não confinado (MPa)
r_c	- raio do boleamento efetuado nos cantos (cm)
A_e	- área transversal de betão efetivamente confinado (cm^2)
n	- número de camadas
E_f	- módulo de elasticidade do FRP (GPa)
$V_{f,reqd}$	- esforço transversal majorado (KN)
ΔV_u	- esforço transversal a reforçar (KN)
V_{Rd}	- resistência ao esforço transversal da secção (KN)
$V_{Rd,s}$	- valor de cálculo do esforço transversal equilibrado pela armadura de esforço transversal na tensão de cedência (KN)
V_{Ed}	- valor do esforço transversal após intervenção (KN)
$A_{fv,reqd}$	- armadura de esforço transversal necessário (cm^2)
s_f	- espaçamento entre as faixas de tecido FRP (cm)
w_f	- largura das faixas de tecido FRP (cm)
r	- recobrimento (cm)
b_w	- largura das faixas FRP (mm)
t_w	- espessura do FRP (mm)
D	- diâmetro do pilar
Z_f	- distância do centro geométrico da tira de FRP à resta superior da secção

A_{sl}	- área total da armadura ordinária (cm^2)
E_s	- módulo de elasticidade (GPa)
f_{yk}	- resistência característica do betão (MPa)
E_{c0}	- extensão de cedência do betão não confinado (GPa)
E_{fk}	- módulo de elasticidade do FRP (GPa)
f_{fk}	- resistência à tração característica (MPa)
$f_{cc, fib}$	- resistência do betão confinado (MPa)
$f_{cu, fib}$	- resistência última do betão confinado (MPa)
b_0	- base da secção (cm)
h_0	- altura da secção (cm)
z_{cg}	- posição do eixo neutro da peça (considerado desde o topo da peça) (cm)
I_y	- momento de inércia da secção
E_{cm}	- módulo de elasticidade média do betão (GPa)
f_{ctm}	- resistência média à tração do betão (MPa)
E_p	- módulos de elasticidade do aço pré-esforçado (GPa)
z_s	- altura útil (cm)
$S_{f, max}$	- espaçamento máximo dos laminados (cm)
$z_{f, min}$	- profundidade mínima de aplicação dos laminados (cm)
E_{fib}	- módulo de elasticidade das fibras (GPa)
V_{fib}	- fração volumétrico de fibras
E_m	- módulo de elasticidade da matriz (GPa)
V_m	- fração volumétrico de matriz
f_{fib}	- tensão de cedência das fibras (MPa)
f_m	- tensão de cedência da matriz (MPa)

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} (‰)
$\emptyset$	- 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)
ρ_{eq}	- percentagem de armadura equivalente (%)
σ_i	- tensão que o elemento necessita de resistir
$\varepsilon_{c,i}$	- extensão do betão comprimido sobre esforço axial (‰)
σ_l	- tensão lateral de confinamento
σ_{lx}	- tensão lateral de confinamento na direção x em secções retangulares
σ_{ly}	- tensão lateral de confinamento na direção y em secções retangulares
σ_c	- tensão uniaxial do betão
ε_{cc}	- extensão do betão comprimido quando a tensão de cedência do betão confinado é atingida (‰)

ε_{co}	- extensão de cedência do betão não confinado (‰)
ε_{cu}^*	- extensão última do betão (‰)
ε_{cu}	- extensão última do betão contabilizando o coeficiente C_E (‰)
ε_l	- extensão lateral
β	- propriedade do betão utilizado no cálculo da extensão lateral
ρ_j	- rácio volumétrico de aço
ρ_{jx}	- rácio volumétrico de aço na direção x em secções retangulares
ρ_{jy}	- rácio volumétrico de aço na direção y em secções retangulares
ε_{fu}	- extensão de rutura do FRP (‰)
ε_{ccu}	- extensão axial à compressão última do betão confinado (‰)
ε_{fe}	- extensão efetiva ao nível do FRP aquando rutura (‰)
ε'_c	- extensão máxima do betão não confinado correspondente ao valor de f'_c (‰)
ψ_f	- fator de redução da capacidade resistente do FRP
ϕ	- fator de redução da resistência
ρ_g	- rácio de armadura e a área da secção
α	- ângulo da manta
ϕ_{trans}	- diâmetro da armadura transversal
ϕ_{long}	- diâmetro da armadura longitudinal
$\varepsilon_{fd,e}$	- extensão efetiva de cálculo do FRP (‰)
γ_f	- coeficiente parcial de segurança
γ_E	- coeficiente parcial de segurança para o FRP
σ_{fw}	- tensão no tecido considerando uma extensão igual a 0.2%
γ_s	- fator parcial de segurança para o aço
α_{cc}	- fator de redução que tem em conta efeitos de longo prazo na resistência à compressão
γ_c	- fator parcial de segurança do betão
$\varepsilon_{f,lim}$	- extensão limite do FRP (‰)
γ_{cc}	- fator parcial de segurança para a resistência triaxial do pilar utilizado para o betão não reforçado
$\varepsilon_{c,lim}$	- extensão axial limite do pilar (‰)

ν	- coeficiente do Poisson
ε_{c2}	- extensão no eixo da curva parabólica (‰)
α_{ct}	- fator de redução que tem em conta os efeitos a longo prazo na resistência à tração
ε_{pu}	- extensão máxima do aço pré-esforçada (‰)
$\alpha_{1.5}$	- coeficiente de eficiência da ancoragem
σ_{p0}	- tensão na zona de apoio para o pré-esforço
$\gamma_{M.m}$	- valor médio do coeficiente de segurança parcial para o momento
$\gamma_{N.m}$	- valor médio do coeficiente de segurança parcial para a força axial

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

No panorama atual a reabilitação dos edifícios está a ser cada vez mais importante devido a ocorrências de erros no projeto ou durante a construção, necessidade de aumentar a capacidade resistente de uma estrutura (diferentes tipos de utilização), capacidade resistente contra a carbonatação do betão e corrosão, ataques químicos como ácidos, incêndios, vandalismos, entre outros.

As novas tecnologias são desenvolvidas para que sejam mais práticas, que apresentem melhores características (mecânicas e químicas) e que garantam uma boa adaptabilidade.

Uma das técnicas que têm sido desenvolvidas nos últimos anos está relacionada com a utilização de compósitos de fibras (vidro, aramida e carbono [mais comuns]) [FRP – Fibre Reinforced Polymmer].

Esta técnica é uma boa alternativa em relação aos materiais como o aço, argamassas cimentícias e alvenarias resistentes porque se mostram de utilização e aplicação fácil. Algumas das características que mais se salientam quando comparados com os materiais mais comuns são o peso específico mais baixo, elevadas resistências mecânicas, capacidade resistente contra corrosão e ataques químicos.

Dos polímeros mencionados acima, o que têm vindo a demonstrar melhor aplicabilidade na Engenharia Civil são os polímeros de carbono. Os polímeros de carbono serão os estudados no trabalho.

1.2 OBJETIVOS

A dissertação realizada tem os seguintes objetivos:

- Dar a conhecer os vários tipos de compósitos de fibras e o porquê da sua utilização;
- Aprofundar o conhecimento sobre as várias técnicas em uso para a aplicação e desenvolvimento dos compósitos;
- Dar a conhecer o programa de cálculo desenvolvido pela empresa S&P Reinforcement para reforço de pilares, paredes e muros com compósitos de fibras de carbono tal como as formas para os dimensionar.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

- **Capítulo 1 – Introdução** – Este ponto terá como foco a apresentação dos objetivos do documento, da sua organização e garantir o enquadramento tendo em conta a realidade atual.
- **Capítulo 2 – Estado da Arte** – Este ponto tem como objetivo dar a conhecer os vários trabalhos desenvolvidos por vários investigadores/as sobre pontos importantes relacionados com o reforço de pilares e muros de betão armado utilizando compósitos CFRP.
- **Capítulo 3 – Compósitos FRP** – Este capítulo tem como objetivo dar a conhecer as várias informações relativas ao sistema em estudo, que foram obtidas ao longo de vastos anos de estudo (revisão bibliográfica). Isto inclui a sua constituição, forma como são produzidos, diferentes tipos, vulnerabilidades e vantagens, conclusões retiradas por autores/as de ensaios e experiências sobre, por exemplo, comportamento ao fogo, entre outros.
- **Capítulo 4 – Dimensionamento** – Este ponto está relacionado com o dimensionamento do reforço de compósito CFRP. Tal será efetuado utilizando informações que têm sido recolhidas ao longo do tempo por vários autores/as e também será retirada informação dos métodos de cálculo utilizados pelos programas que serão utilizados para o caso de estudo mais à frente.
- **Capítulo 5 – Caso de Estudo** – Neste ponto será apresentado o reforço de pilares de betão armado, considerando um caso de incêndio. Para tal será utilizado o programa “FRP Colonna 1.6”, desenvolvido pela empresa S&P – Reinforcement e o “FRP Lamella 5.6” desenvolvido pela mesma empresa.
- **Capítulo 6 – Conclusões** – Este ponto será necessário para apresentar as conclusões do trabalho (incluindo reflexões sobre o que foi feito e possíveis coisas que poderiam ter sido feito de uma forma melhor) e sugerir desenvolvimentos futuros.
- **Capítulo 7 – Referências Bibliográficas** – Apresentação das referências utilizadas.
- **Capítulo 8 – Anexos** – Apresentação de informações que complementam o documento.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 MANTAS DE CFRP NO CONFINAMENTO DE ELEMENTOS DE BETÃO SUBMETIDOS A COMPRESSÃO

Foi feito um estudo por base de uma tese de doutoramento pela aluna Ferreira et al. [2003] da Universidade do Minho que visa a verificação da influência da largura das mantas (W), do número de faixas ao longo da altura (S) e do número de camadas por faixa (L) no aumento da resistência à compressão uniaxial e da ductilidade do betão. Este estudo é importante porque permite verificar se é viável a utilização de faixas distanciadas quando comparado com o confinamento total de um pilar.

Uma vantagem estaria relacionada com a diminuição dos custos dos materiais (manta e resinas) e da mão-de-obra, por exemplo.

Os provetes utilizados tinham 300 mm de altura e 150 mm de diâmetro;

A tabela seguinte apresenta quantitativamente os vários componentes do betão utilizado para fazer os provetes:

Cimento Secil 32.5 II	Brita grossa	Brita média	Areia	Água
350.0	725.93	438.23	694.59	155.83

Tabela 1 - Composição do betão utilizado nos provetes [kg/m³] (Ferreira et al, 2003)

Esta informação é importante porque o conjunto de todos os componentes vão garantir as várias características do betão, como a sua resistência à compressão, número de vazios, ductilidade, entre outros.

Foram feitos vários ensaios, cada um constituído por três provetes. A variação das variáveis W, S e L originaram provetes com diferentes percentagens de confinamento ($p_f = A_f / A_{c,t}$), onde:

- A_f – secção transversal do sistema de confinamento (fornecedor da manta utilizada no ensaio com 0,167 mm):
 - $A_f = 2 * S * W * L * 0.167 \text{ mm}^2$
- $A_{c,t}$ – secção longitudinal do provete 150x300 mm²

Analisando p_f em conjunção com a melhoria dos resultados pretenderam concluir a importância de cada elemento da equação. Os provetes são designados por WiSjLk, onde: i, j e k são os valores atribuídos a cada variável W, S e L respetivamente.



Figura 2.1.1 - Exemplificação das disposições das mantas (Ferreira et al, 2003)

Tabela 1 – Series de ensaios (continua)

W [mm]	S [-]	t [mm]	L [-]	A _f [mm³]	ρ _f [%]	Designação do provete	Sistema de confinamento
15	1	-	1	5.01	1.11E-02	W15S1L1	
			2	10.02	2.23E-02	W15S1L2	
			3	15.03	3.34E-02	W15S1L3	
			4	20.04	4.45E-02	W15S1L4	
			6	30.06	6.68E-02	W15S1L6	
	3	85	1	15.03	3.34E-02	W15S3L1	
			2	30.06	6.68E-02	W15S3L2	
			3	45.09	1.00E-01	W15S3L3	
			4	60.12	1.34E-01	W15S3L4	
			6	90.18	2.00E-01	W15S3L6	
	5	45	1	25.05	5.57E-02	W15S5L1	
			2	50.1	1.11E-01	W15S5L2	
			3	75.15	1.67E-01	W15S5L3	
			4	100.2	2.23E-01	W15S5L4	
			6	150.3	3.34E-01	W15S5L6	
30	3	70	3	90.18	2.00E-01	W30S3L3	
			5	150.3	3.34E-01	W30S3L5	
			7	210.42	4.68E-01	W30S3L7	
			7	210.42	4.68E-01	W30S3L7	
	4	45	3	120.24	2.67E-01	W30S4L3	
			5	200.4	4.45E-01	W30S4L5	
			7	280.56	6.23E-01	W30S4L7	
45	4	30	3	180.36	4.01E-01	W45S4L3	
			5	300.6	6.68E-01	W45S4L5	
			7	420.84	9.35E-01	W45S4L7	
			7	420.84	9.35E-01	W45S4L7	
60	3	40	3	180.36	4.01E-01	W60S3L3	
			5	300.6	6.68E-01	W60S3L5	
			7	420.84	9.35E-01	W60F3L7	
			7	420.84	9.35E-01	W60F3L7	
300	1	-	3	300.6	6.68E-01	W300S1L3	
			5	501	1.11E+00	W300S1L5	
			7	701.4	1.56E+00	W300S1L7	

Tabela 2 -Tabela resumo dos ensaios efetuados (Ferreira et al, 2003)

Analisando a imagem e a tabela acima é possível aferir que as zonas onde não existe confinamento vão estar sujeitas a tensões superiores, porque as zonas abaixo e acima estão a impedir que o betão deforme. Assim o betão que está na zona “desprotegida” vai estar sobre tensões maiores e será o local de rutura mais provável.

Resultados

Foram identificadas as formas de rutura para cada uma das aplicações das mantas, como demonstra a figura seguinte:

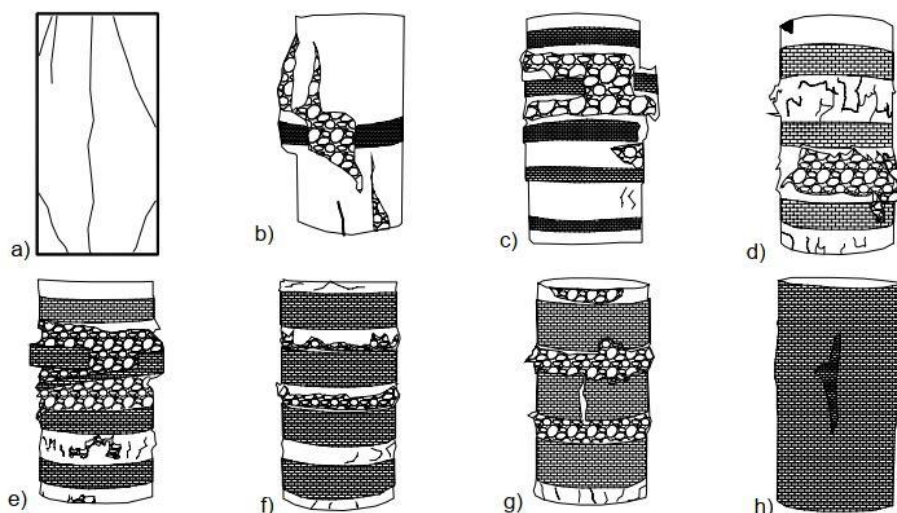


Figura 2.1.2 - Exemplos de rutura verificados no trabalho (Ferreira et al, 2003)

Na análise anterior postulou-se que a rutura seria mais provável entre as faixas e, é parcialmente o que está a acontecer. Os casos mais interessantes da imagem acima são os que apresentam maior número de faixas com larguras menores porque têm tendência para uma rutura menos controlada e mais “agressiva” para o betão e para as mantas. Este ponto talvez esteja ligado ao facto de as tensões elevadas exercidas no provete estarem a agir nas faixas de manta menos espessas, ou seja, existe um menor número de fibras a resistir, levando ao colapso do sistema. Também poderá ser devido à falta de confinamento na zona e, dessa forma, os varões sofrem encurvadura e causam tensões mais elevadas no local que levam à degradação do betão.

Concluiu-se que a tensão máxima registada nos provetes de betão não confinados são ultrapassados apenas nas séries com uma percentagem de confinamento (ρ_f) superior a 0.17.

Nas séries com um valor superior a 0,17 registou-se um aumento da capacidade de absorção de energia. Em todas as séries verificou-se um aumento de capacidade de carga e absorção de energia com o aumento do número de camadas CFRP por faixa. É interessante que acima das cinco camadas o aumento não foi significativo quando comparado com as cinco camadas.

Tendo em conta a largura e o número de faixas foi verificado que houve aumentos da capacidade de carga e energia absorvida nos casos onde havia menor espaço livre

entre as faixas. Este facto deve-se ao facto de haver uma grande concentração de esforços nas zonas que não estão reforçadas.

A extensão máxima na camada mais externa da manta diminuiu com o aumento do número de camadas aplicadas nas faixas.

Dicas enunciadas pelos autores:

A capacidade resistente dos provetes de betão (30 MPa a 40 MPa) pode ser duplicada utilizando três tipos de sistemas de confinamento:

- Quatro faixas de 45 mm de largura com quatro camadas por faixa;
- Três faixas de 60 mm de largura com cinco camadas por faixa;
- Completo envolvimento do provete com duas camadas

2.2 CONFINAMENTO DE PILARES DE BETÃO ARMADO REFORÇADOS TOTAL E PARCIALMENTE COM MANTAS DE CFRP SUBMETIDOS A CARRRGAMENTOS CICLICOS DE COMPRESSÃO

O trabalho realizado no âmbito de um doutoramento realizado por Ferreira et al. [2008] da Universidade do Minho tem como objetivo aumentar o conhecimento relacionado com carregamentos cíclicos de compressão, como será no caso de um sismo. Foi analisado com especial atenção as ações horizontais oriundas do sismo que origina tensões de flexão e corte no pilar.

O ensaio consiste numa série de ensaios monotónicos (carga aplicada num sentido) e cíclicos com 14 provetes cilíndricos com 600 mm de altura e 200 mm de diâmetro. O betão utilizado foi C30/35 com varões longitudinais $\phi 8$, confinados por uma manta do tipo CF120 S&P 240 (200 g/m²).

A cada um dos provetes é dada a designação $WiLk_c/m$ onde Wi é a largura da faixa com i a variar entre 45, 60 e 600 mm e LK é o número de camadas por faixa com k igual a 3 ou a 5. O ensaio foi realizado utilizando uma prensa servo-controlada (garante um controlo muito maior) com carga máxima igual a 2250 kN, controlando a força a uma velocidade de 15 kN/s.

Na primeira figura está apresentado os sistemas considerados e a segunda apresenta a distribuição de três aparelhos LVDTs (Linear variable differential transformer) para medir a extensão axial do provete.

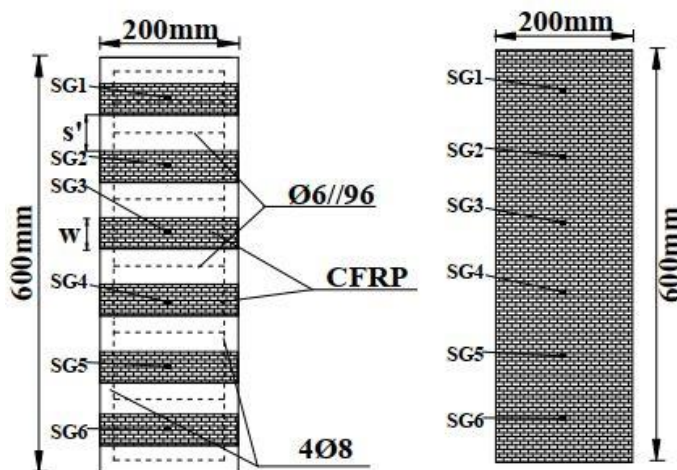


Figura 2.2.1 - Pormenor dos sistemas utilizados (Ferreira et al, 2008)

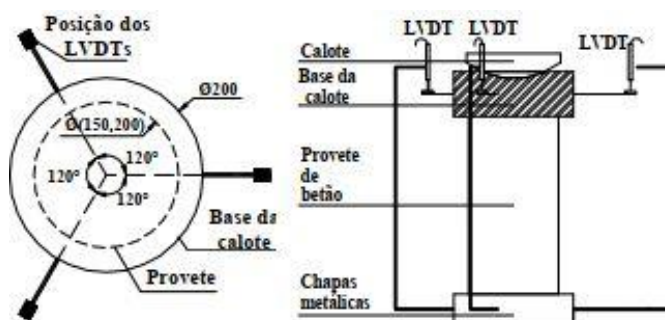


Figura 2.2.2 - Posição dos LVDTs (Ferreira et al, 2008)

Também foi investigado tendo em consideração a utilização de faixas espaçadas ao invés do confinamento total para apresentar um resultado que possa ser extrapolado para mais que uma forma de aplicação dos sistemas, na prática.

Resultados

Foi concluído que a curva monotónica pode ser considerada como uma envolvente da resposta cíclica.

Foi observado um aumento da ductilidade entre 7 e 10 vezes superiores aos registados nos provetes de referência.

Foi observado que a degradação do betão é superior quando a distancia entre a faixas de CFRP são superiores. Uma das justificações foi o facto de uma zona maior sem confinamento provocar uma encurvadura dos varões mais acentuada, originando tensões internas grandes que vão eventualmente levar à rutura do betão.

Foi observado que o modelo completamente confinado não aproximou a curva monotónica e a envolvente cíclica, como seria de esperar. A justificação dada dita que muito possivelmente existiram irregularidades no fabrico do provete.

2.3 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA LIGAÇÃO FRP-BETÃO

Este trabalho, realizado por Barros et al. [2010], permite fazer recomendações sobre a configuração de ensaio mais adequada para caracterizar a aderência entre o betão e o FRP para reforço, segundo a técnica NSM (Near Surface Mounted).

São analisadas três configurações de ensaio de ensaio:

- Ensaio de arranque simples do tipo push (EAS);
 - É designada por push porque a carga aplicada no FRP é equilibrada por uma reação de compressão no topo do bloco de betão armado.
- Ensaio de arranque duplo do tipo pull (EAD);
 - Tem a designação de pull porque os dois blocos de betão que formam o provete são afastados um do outro, tracionando o FRP ligado a ambas.
- Ensaio de arranque em flexão (EAF).

Normalmente os ensaios de arrancamento são utilizados para determinar o comprimento ótimo de amarração entre os sistemas FRP e o betão.

Através dos resultados dos ensaios e através da análise inversa com recurso a ferramentas numéricas de análise por elementos finitos e modelos analíticos, é possível definir leis de comportamento local na ligação.

Conclusões

Os estudos revelaram que o EAS e o EAD são ensaios mais adequados para a caracterização dos dados mais relevantes para formulações que permitam prever a contribuição dos laminados FRP pela técnica NSM (Near Surface Mounted) no reforço ao corte em vigas.

O EAS é, no entanto, mais aconselhado porque é necessário um provete de ensaio mais simples, a montagem é menos complexa que os outros ensaios e permite avaliar a influência da profundidade de instalação dos laminados CFRP.

No caso do EAF, é recomendado para a determinação do comportamento da ligação entre os laminados e o betão no contexto de reforço à flexão (vigas e lajes).

Tendo como base os resultados experimentais e numéricos foi possível assumir um comportamento linear e elástico nos materiais utilizados, se o objetivo for a determinação de um perfil de tensões no FRP ao longo do comprimento de ligação até uma tensão máxima que não ultrapasse 50% da resistência à tração.

2.4 LIGAÇÕES EM SUPERFÍCIES CURVAS ENTRE COMPÓSITOS DE FRP E BETÃO SUJEITAS A TEMPERATURAS ELEVADAS

O trabalho realizado por Biscaia et al. [2016] da Universidade Nova de Lisboa permite analisar um nicho pouco desenvolvido relacionado com a avaliação da aderência betão/compósito em superfícies curvas quando sujeita a altas temperaturas.

Debruça-se sobre os processos de deslocamento do compósito FRP quando colado em superfícies curvas de betão armado sujeita a ações mecânica e a altas temperaturas.

Abaixo estão representadas as forças que ocorrem entre o FRP colado externamente e a superfície de betão armado sob uma superfície curva. Os desenvolvimentos das tensões nas ligações coladas são de grande importância para perceber os modos de rutura.

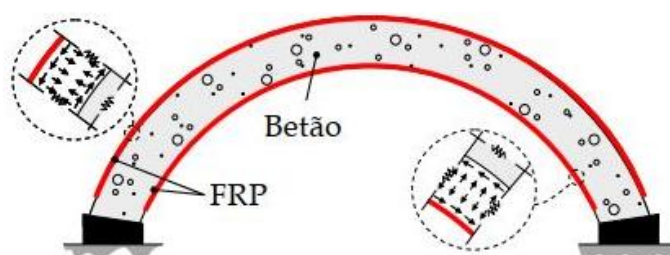


Figura 2.4.1 - Tensões interfaciais numa ligação colada em uma superfície curva (Biscaia et al, 2016)

Conclusões

O aumento da temperatura reduz a resistência da ligação CFRP/Betão e aumenta o comprimento efetivo da ligação (necessário um comprimento maior para transferir as tensões de forma eficaz).

Para as superfícies curvas não parece afetar o comprimento de ligação efetivo porque as distribuições das tensões de aderência tangenciais não dependem do raio de ligação.

Numa situação mais realista sob cargas de serviço, o aumento da temperatura vai desenvolver deslocamentos mais significativos na interface e diminuir drasticamente a força inicial.

A diminuição do raio de ligação CFRP/Betão aumenta as tensões radiais que se desenvolvem na interface.

O aumento do raio da ligação e da temperatura diminuem a ductilidade da ligação.

2.5 (The Sensitivity of Acoustic-Laser Technique for Detecting the Defects in CFRP-bonded Concrete Systems) (SENSIBILIDADE DE TÉCNICA ACÚSTICA/LASER PARA DETEÇÃO DE DEFEITOS NO REFORÇO CFRP)

O trabalho realizado por Qiu et al. [2016] da Faculdade do MIT permite analisar a sensibilidade da técnica, visto que existem poucas informações relativas a este procedimento. Quando utilizada é útil para a verificação de defeitos perto da superfície, sendo necessário saber se apresenta sensibilidade para verificar as zonas mais profundas do reforço.

A escolha do artigo está relacionada a um pensamento a longo prazo, no sentido de ser possível analisar as anomalias do reforço e, desta forma, fazer a sua reparação com o objetivo de aumentar a vida útil de peça, de uma forma relativamente barata e fácil.

De forma geral esta técnica funciona através da vibração do reforço oriundo de ondas sonoras e consequente medição da vibração do reforço utilizando um laser.

Uma outra característica boa do sistema é o facto de poder ser utilizada em vários campos do saber, como deteção de anomalias em outros tipos de compósitos em mecânica, por exemplo.

A fibra de carbono utilizada na experimentação foi fabricada no laboratório.

Para fazer o teste criaram uma peça de betão com uma zona especificamente sem material para servir de anomalia, como se poderá ver nas imagens seguintes.

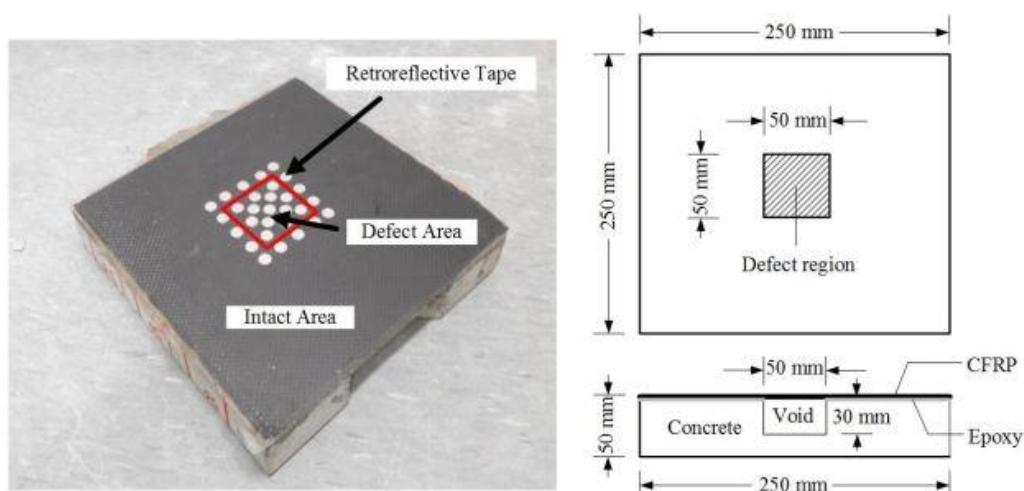


Figura 2.5.1 - Provete utilizado (Qiu et al, 2016)

É enviado um ruído da coluna de som, que vai excitar o material a vibrar (testadas várias frequências, que podem conter as frequências de ressonância do FRP).

Como se pode observar, na zona onde foi feita a anomalia existe um conjunto de painéis para refletir o laser em direção a um fotoreceptor que converte o laser em sinais elétricos. A frequência dos sinais (que vai permitir a modulação posterior, é igual à frequência do laser, que está relacionada com a vibração do FRP).

Nas imagens seguintes estão apresentados os componentes utilizados na experiência e a sua distribuição.

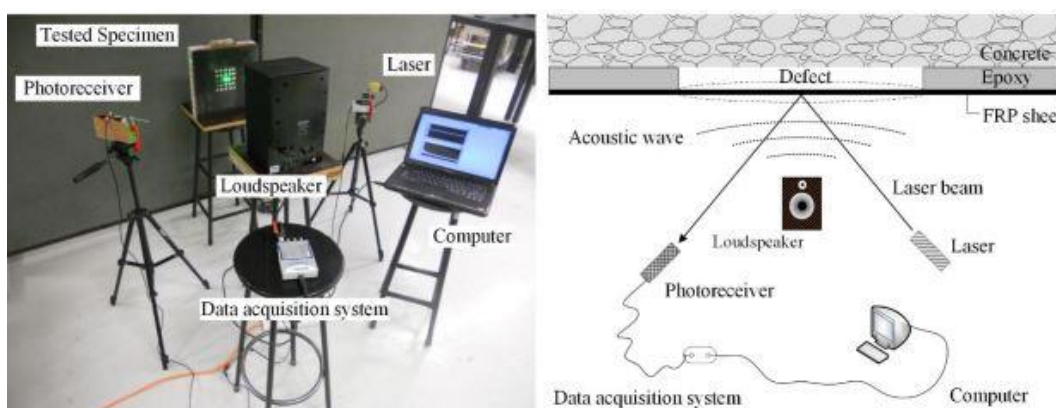


Figura 2.5.2 - Componentes e distribuição dos componentes (Qiu et al, 2016)

Conclusões

A técnica acústica/laser tem várias vantagens para deteção de feitos. Para painéis FRP/betão utilizados aparenta um pico na frequência igual a 3670 Hz, que indica a presença de defeito.

Os resultados indicam que a vibração na região com defeito é significativamente maior quando comparado com a região intacta. Foi provado que a técnica permite identificar a localização e o tamanho dos defeitos na estrutura.

Foram identificados quatro parâmetros importantes que influenciam consideravelmente a sensibilidade do sistema:

- Distância de excitação acústica (distância da fonte sonora);
- O ângulo das ondas sonoras incidentes;
- O ângulo incidente do laser;
- SPL (sound pressure level):
 - Pressão causada pela pelas ondas sonoras (ondas de pressão).

Para garantir a melhor sensibilidade e fiabilidade para deteção dos defeitos por parte do sistema, foram encontrados os valores mais importantes para cada parâmetro (tendo em consideração a distribuição apresentada na imagem anterior), assim:

- Distância de excitação acústica:
 - A distância de excitação não deverá ser superior a 40 cm. A partir dos 200 cm a sensibilidade é muito baixa;
 - Uma boa solução é a utilização de um sistema PAA (parametric acoustic array) que providencia maior energia acústica e permite focar a energia melhor que um sistema comum acústico.
- O ângulo das ondas sonoras incidentes:
 - É sugerido que seja 90°.
- O ângulo incidente do laser:
 - Sugerido que seja entre 30° e 60°.
- SPL (sound pressure level):
 - Deve ser pelo menos 100 dB. Se o valor for muito elevado vai levar a vibrações significativas do laser e do fotoreceptor, tornando resultados inadequados.

Pressão causada pela ondas sonoras (ondas de pressão).

2.6 ACTIVE CFRP-BASED CONFINEMENT STRATEGIES FOR RC COLUMNS WITH RECTANGULAR CROSS SECTIONS (ESTRATÉGIAS DE CONFINAMENTO DE CFRP ACTIVAS PARA PILARES COM SECÇÕES RECTANGULARES)

O seguinte estudo efetuado por Agante et al. [2008] tem como objetivo estudar a viabilidade da utilização de resinas expansivas que possam introduzir um nível de pós-tensão no compósito CFRP.

Primeiramente foi estudada a percentagem de água ótima para garantir a expansão da resina (o volume da resina pode aumentar até 10 vezes). Com o valor ótima da água foi estudada a influência da espessura entre a superfície do betão e o CFRP no processo de pós-tensão. Por fim foram efetuados testes de compressão para verificar a performance do sistema de confinamento.

O betão utilizado apresenta resistência à compressão igual a 42 MPa, moldados em cubos com 150 mm de lado. O maior objetivo destes testes foi a verificação da variação da direção das fibras, causada pela expansão da resina.

Foi utilizado um sistema de fibra unidirecionais de CFRP (mantas) e a resina expansiva.

O programa experimental explora 11 diferentes soluções possíveis para a introdução de pós-tensão no compósito CFRP.

Na tabela seguinte estão apresentadas as percentagens de água na resina e a espessura entre os materiais:

Specimen identification code	Resin water %	Gap with (mm)	Connection type
UR	-	-	none
BW	-	-	bonded
PW04.05	4	5	pos-tensioned
PW04.06	4	6	pos-tensioned
PW04.07	4	7	pos-tensioned
PW05.05	5	5	pos-tensioned
PW05.06	5	6	pos-tensioned
PW05.07	5	7	pos-tensioned
PW07.05	7	5	pos-tensioned
PW07.06	7	6	pos-tensioned
PW07.07	7	7	pos-tensioned

Tabela 3 - Detalhes dos provetes (Agante et al, 2008)

Os provetes foram sujeitos a cargas uniaxiais com controlo do deslocamento a um ritmo igual a 15 $\mu\text{m/s}$ até ao ponto de rutura. Os provetes foram testados com uma idade igual a 40 dias.

A imagem seguinte representa às várias percentagens de água na resina.

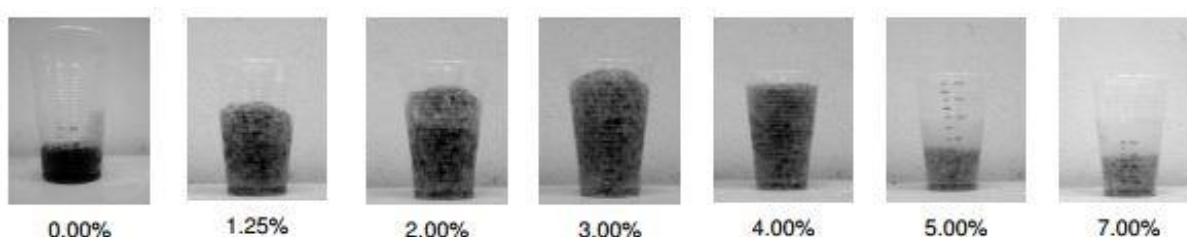


Figura 2.6.1 - Várias percentagens de água na resina (Agante et al, 2008)

Conclusões

Foi concluído que a introdução de pós-tensão no CFRP induzido pela utilização de resinas expansivas aumenta a capacidade resistente do sistema, mas o aumento da resistência é inferior ao obtido aquando da utilização de sistemas tradicionais de colagem de CFRP. Desta forma a utilização de resinas expansivas não é uma estratégia de confinamento de CFRP adequada para pilares com secções retangulares (provetes estudados).

Durante o controlo da resina expansiva foi concluído que a mistura que apresenta 5% de água apresenta uma maior estabilidade volumétrica, com um aumento do volume aproximadamente igual a 50%.

2.7 NOVA ABORDAGEM NO REFORÇO DE ESTRUTURAS COM MATERIAIS COMPÓSITOS

O presente documento foi realizado por Barros et al. [2002] da Universidade do Minho. O objetivo do trabalho foi a apresentação dos resultados mais significativos das experimentações que visam avaliar o desempenho da técnica de fixação de laminados de CFRP em ranhuras efetuados no betão de recobrimento.

A técnica de reforço proposta baseia-se nos procedimentos seguintes:

- Aberturas com largura entre 4 e 5 mm e profundidades entre 12 e 15 mm são executados nas faces dos elementos a reforçar;
- As aberturas são limpas utilizando ar comprimido;
- Os CFRP são limpos com acetona;
- Os adesivos são produzidos conforme as especificações dos fabricantes;
- As aberturas são preenchidas com adesivo;
- Aplicação de adesivo nas faces do CFRP;
- Aplicação dos CFRP, retirando-se posteriormente o adesivo em excesso;

A cura do adesivo dura pelo menos cinco dias.

Para o reforço dos pilares à flexão foram feitas séries de ensaios apresentados na tabela seguinte, onde os elementos foram submetidos a compressão axial constante e carga horizontal cíclica. Os pilares SR não foram reforçados, os PR foram reforçados antes do ensaio e a série CR foram reforçados após o ensaio com um a realização de segundo ensaio.

Os provetes são constituídos por pilares e as respetivas sapatas. Vão estar submetidos a cargas constantes de compressão axial de 150 kN, que introduziu uma tensão de 3.75 MPa no pilar. As forças foram registadas por células de carga, enquanto os deslocamentos foram obtidos por transdutores de deslocamentos (LVDT's). Para as extensões foram utilizados extensómetros.

O carregamento foi realizado através de oito ciclos de deslocamentos desde os 2.5 mm até 20.0 mm, com incrementos de 2.5 mm à velocidade de deformação igual a 150 $\mu\text{m/s}$.

As imagens seguintes apresentam a técnica de aplicação do reforço e a localização dos vários transdutores e extensómetros, respetivamente:

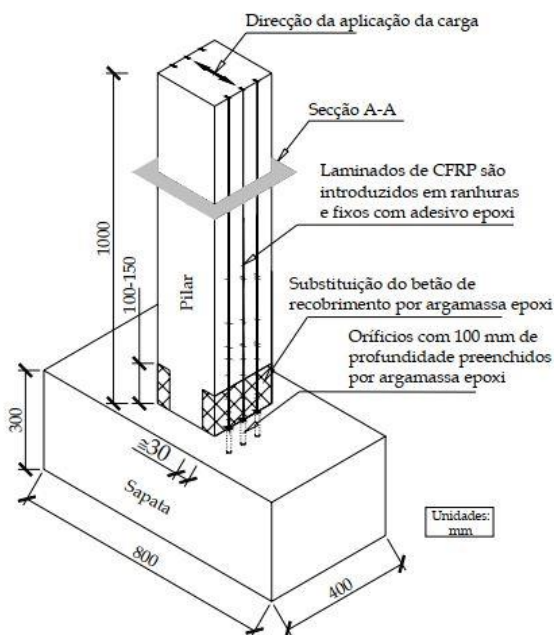


Figura 2.7.1 - Técnica de reforço aplicada no pilar (Barros et al, 2002)

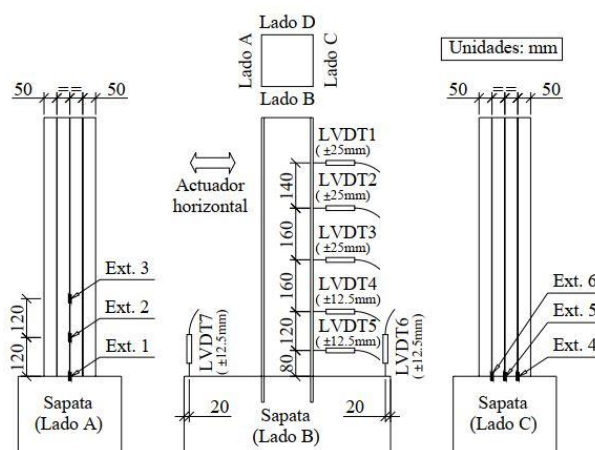


Figura 2.7.2 - Localização dos transdutores e extensómetros (Barros et al, 2002)

Conclusão

O reforço proporcionou um aumento significativo da capacidade de cargas dos pilares. A capacidade de carga aumenta em pilares que apresentam uma menor percentagem de armadura convencional. Como o reforço proposto não induz confinamento no betão, a energia dissipada não varia significativamente. O sistema é mais eficiente que a colagem externa, originando aumento mais significativos da capacidade de carga dos elementos.

3 COMPÓSITOS DE POLÍMEROS FRP

3.1 CONSIDERAÇÕES

É sempre indicado a procura de materiais novos que possam ser melhores que os existentes numa variedade de características. Um desses materiais são os compósitos de fibras. Para a correta aplicação destes materiais é necessário a criação de normas e requisitos para a correta aplicação destes materiais.

Nas indústrias como aeronáutica e automóvel, por exemplo, existe uma grande panóplia de informação e normas para garantir a utilização segura e eficaz destes sistemas, especialmente por apresentarem propriedades mecânicas mais elevadas que os materiais mais comuns como o alumínio e por apresentarem densidades, em alguns casos, substancialmente mais baixas.

Na engenharia civil está a ser ponderada cada vez mais a sua utilização, especialmente no ramo da reabilitação e, ainda muito início, no reforço de pavimentos rodoviários.

A sua utilização está muito ligada ao facto de poderem ser aplicados em quase qualquer secção com relativa facilidade devido à natureza da sua construção e por não necessitarem de muito espaço para a sua aplicação. Um exemplo são as mantas que podem “abraçar” qualquer geometria desde que se tenha cuidado com arestas vivas (não arredondadas).

Uma das complicações, retirando a menor informação sobre o assunto, que afeta a decisão de utilizar este tipo de materiais é o preço, visto que, apesar do custo de aplicação e de mão de obra ser mais baixo, o custo de produção poderá ser mais elevado.

3.2 CONSTITUINTES DOS FRP E ALGUMAS PROPRIEDADES

Os compósitos de FRP são constituídos por dois ou mais componentes com composições distintas, de maneira que combinem e garantam um bom desempenho. No caso em estudo os compósitos são formados por fibras contínuas de reforço, orgânicas ou inorgânicas, embebidas numa matriz polimérica. Estes materiais também podem conter aditivos como por exemplo agentes catalisadores, retardadores, aceleradores de cura ou outros materiais que possam aumentar as capacidades do compósito como filler (material de enchimento).

Estes materiais são cada vez mais utilizados porque permitem realizar tarefas específicas como garantir a maior resistência possível e melhorar o módulo de elasticidade, tendo em conta uma densidade mais baixa, como é o exemplo das fibras de carbono.

O diagrama seguinte permite dar uma ideia geral sobre o comportamento dos compósitos face a dois materiais mais comuns como o aço e o alumínio.

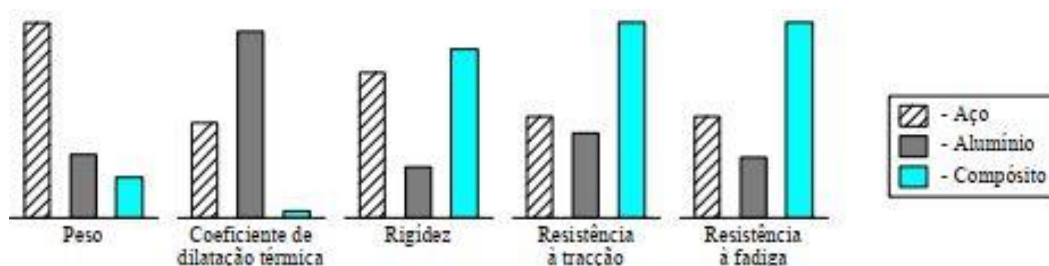


Figura 3.2.1 - Comparação de algumas propriedades entre o aço, alumínio e o compósito (Juvantes, 1999)

É de frisar que esta comparação está muito dependente dos materiais, mas apresenta um “resumo” de informações que têm sido obtidas ao longo do tempo.

Normalmente, antes da aplicação de fibras, eram utilizadas chapas de aço para reforço que apresentam alguns inconvenientes que levaram à necessidade de dimensionar os sistemas com base em materiais e técnicas alternativas, tais como:

- Dificuldade de aplicação em obra (acessibilidade e pelo seu peso);
- Mesmo tratadas, especialmente em zonas mais críticas, existe sempre um risco de corrosão (garantir durabilidade e segurança);
- Necessário a execução de juntas de ligação entre as chapas (limitação do dimensionamento);

Durante a aplicação e a sua produção serão utilizados outros materiais, como as resinas que se utilizam como os primários que garantem uma boa ligação compósito/betão, por exemplo.

A fibras são os reforços, por outras palavras, são o componente que garante a rigidez e a capacidade resistente do sistema, sendo constituídos por filamentos com diâmetros pequenos.

A matriz é constituída por um adesivo que tem como função principal garantir uma boa transferência de esforços entre as fibras (garantir que as fibras funcionem em conjunto, como se fosse um material único se tratasse [ligante]) e o betão. Normalmente a matriz apresenta uma boa ductilidade.

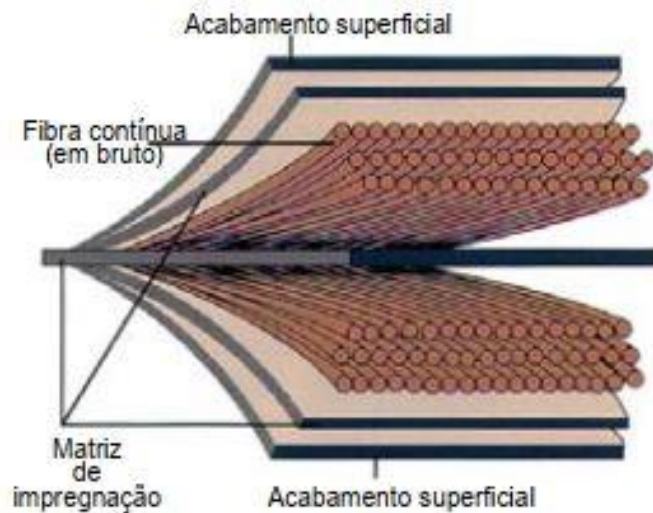


Figura 3.2.2 - Compósito FRP de referência (Juvandes, 2011)

3.2.1 FIBRAS

As fibras presentes são filamentos com diâmetros muito pequenos (equiparados a um fio de cabelo [espessura máxima de 0,25 mm]) que apresentam algumas características muito interessantes, tais como:

- Alta resistência à tração:
 - Ultrapassando varões de pré-esforço;
- Módulo de elasticidade elevados;
- Densidade mais baixa:
 - O peso do reforço é inferior, causando esforços menores à estrutura;
 - Maior facilidade de transporte;
 - Melhora a trabalhabilidade devido ao peso mais baixo.
- Apresentam um comportamento frágil:
 - Não apresentam tensão de cedência e consequentemente deformação plástica (mais difícil prever, visualmente uma potencial rutura), ao contrário do aço.

Uma boa parte dos materiais são mais resistentes na forma de fibras. O rácio entre o comprimento das fibras e o diâmetro permite uma boa transferência das cargas, garantindo uma boa utilização do material.

É necessário ter em conta que os valores, como a resistência à tração e a rigidez, são mais elevadas na direção das fibras, diminuindo gradualmente à medida que a sua direção muda (comportamento anisotrópico). É algo parecido a outros materiais como

a madeira que apresentam melhor desempenho à tração, por exemplo, quando respeitada a direção das fibras.

Dadas algumas das características é possível notar que as fibras são os constituintes que mais favorecem o sistema total no sentido de rigidez e capacidade resistente. No diagrama seguinte é possível verificar as diferenças entre os dois componentes principais do compósito, em termos de resistência e deformação e a junção das duas em um compósito estruturado.

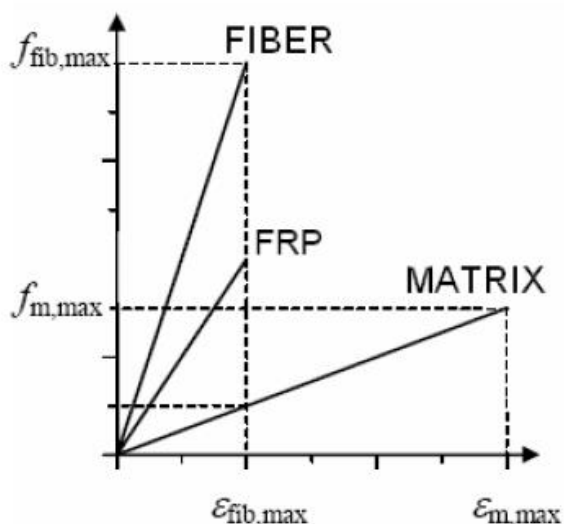


Figura 3.2.3 - Relação tensão-deformação das fibras, matriz e FRP (Carvalho, 2021)

Existem soluções com fibras em uma direção (FRP unidirecionais – laminados e mantas) e em várias direções (FRP bidirecionais e multidirecional - tecidos).

Atualmente estão disponíveis alguns materiais, sendo três os mais comuns na construção:

- Vidro (GFRP – Glass Fiber Reinforced Polymers);
- Aramida (AFRP – Aramid Fiber Reinforced Polymers);
- Carbono (CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polymers):
 - Objeto de estudo.

Dos três componentes, o carbono apresenta melhores propriedades mecânicas (resistência à tração), é mais resistente a agentes agressivos (químicos), não têm problemas de corrosão, não absorve água e menor peso específico.

Os de fibra de vidro apresentam menor custo, maior peso específico, menor resistência à fadiga e são vulneráveis a ações de agentes alcalinos. Também apresentam uma resistência à abrasão baixa, significando a necessidade de algum cuidado aquando a sua manipulação. Existem três principais tipos de fibras de vidro:

- Fibras de vidro tipo E:

- Contêm uma quantidade elevada de ácido bórico e aluminato, tornando-o pouco resistente contra produtos alcalinos.
- Fibras de vidro tipo S:
 - Mais resistentes que as anteriores, no entanto apresentam a mesma incapacidade resistente em relação a alcalinos.
- Fibras de vidro tipo AR:
 - Adição de zircónio para garantir resistência a elementos alcalinos, mantendo capacidades mecânicas semelhantes às fibras do tipo S.

As fibras de aramida são de difícil moldagem, têm baixa resistência à compressão, estão sujeitas a degradação causada pela radiação UV e a altas temperaturas, são sensíveis a fenómenos de fluência (deformação ao longo do tempo sobre cargas constantes), são tolerantes a impactos e alguma resistência à fadiga.

Já é possível ter uma pequena noção das vantagens do carbono em relação aos outros dois componentes, sendo, desta forma, justificável que a sua utilização seja aplicada e estudada com maior interesse para construção.

O diagrama (tensão/extensão) seguinte apresenta uma comparação entre aço convencional tipo A500, cordões pré-esforçados em aço, fibras de carbono de módulo de elasticidade elevado (HM), fibras de carbono de elevada resistência (HS), fibras de aramida e fibras de vidro. Está apresentado também uma tabela que permite analisar algumas características de cada um dos materiais para comparação, de forma a evidenciar mais as diferenças.

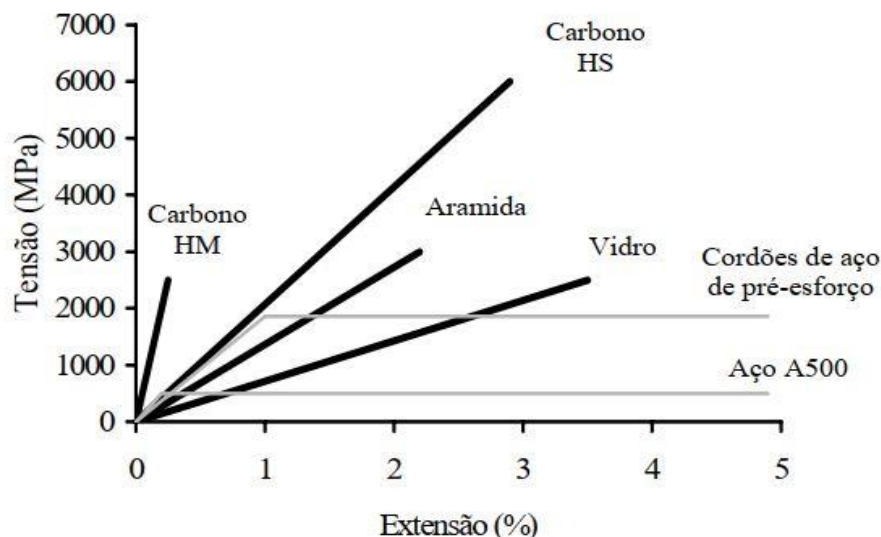


Figura 3.2.4 - Relação tensão/extensão dos vários materiais indicados (Barros, 2004)

Material	Módulo de elasticidade [GPa]	Resistência à tracção [MPa]	Densidade [Kg/m ³]
Betão	20-40	1-3	2400
Aço	200-210	240-690	7800
Fibras de vidro (E)	69-72	1860-2680	1200-2100
Fibras de carbono	200-800	1380-6200	1500-1600
Fibras de aramida	69-124	3440-4140	1200-1500

Tabela 4 - Tabela resumo das propriedades dos materiais (Barros, 2004)

É possível verificar que as fibras, apesar de apresentarem uma densidade inferior ao betão e bastante inferior ao aço, possuem uma capacidade resistente bastante superior aos demais casos.

É especialmente interessante verificar as diferentes fibras e perceber que o carbono apresenta uma densidade mais constante que as outras e apresenta uma variação possível de resistências muito superior às demais, tendo também em conta o facto de o módulo de elasticidade ser bastante elevado. Apesar de apresentar o mesmo mínimo que o aço, alcança patamares muito superiores, o que dá uma vantagem porque pode manter a sua forma sem sofrer deformação para a mesma força aplicada.

A tabela seguinte é puramente informativa, apresentando mais algumas características importantes de cada um dos tipos de fibra apresentados.

Propriedade	Vidro - E	Carbono	Aramida
Resistência à tracção [MPa]	2350 - 4600	2600 - 3600	2800 - 4100
Módulo de Elasticidade em tração [GPa]	73 - 88	200 - 400	70 - 190
Extensão na rotura em tração [%]	2.5 - 4.5	0.6 - 1.5	2.0 - 4.0
Densidade [g/cm ³]	2.6	1.7 - 1.9	1,4
Coefficiente de dilatação térmica [10 ⁻⁶ /K]	5.0 - 6.0	Axial: -1.3 a -0.1 Radial: 18.0	-3.5
Diâmetro das fibras [µm]	3 - 13	6 - 7	12
Estrutura das fibras	isotrópica	anisotrópica	anisotrópica

Tabela 5 - Propriedades das várias fibras (Figueira, 2016)

Mais tarde será analisado o efeito do incêndio na estrutura do FRP de tal forma que será necessária um pouco mais informação sobre a deformação das fibras aquando altas temperaturas. Este ponto é importante porque a expansão ou contração das fibras envolvidas por uma resina vai gerar tensões internas que puderam levar à formação de pequenas fendas na matriz, de forma semelhante à ação das armaduras em relação ao betão. Assim a tabela seguinte vai ter em consideração a deformação de cada tipo de fibra, tendo em conta os coeficientes de expansão longitudinais e

transversais (necessário porque as fibras têm um comportamento diferente em direções diferentes).

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 6 - Valores mais comuns das várias fibras (Carvalho, 2021)

É de notar que alguns valores apresentam o símbolo negativo. Isto indica que o material contrai com o aumento da temperatura. Também é bom frisar, como referência, que o aço tem um coeficiente igual a $11,7 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$ (isotrópico – característica iguais em todas as direções), como comparação.

3.2.2 MATRIZ

A segunda componente muito importante é a matriz que tem como função proteger as fibras de elementos exteriores agressivos, danos mecânicos, garantir que as fibras se mantêm na posição pretendida, garantir a distribuição de forças pelas fibras de forma a melhorar a eficácia das mesmas e evitar a encurvadura das fibras quando solicitadas à compressão. Desta forma é compreensível que as suas propriedades vão influenciar muito os parâmetros de resistência mecânica dos sistemas porque é este componente que vai permitir que as fibras possam resistir como pretendido.

O sucesso do adesivo vai depender da preparação e da aplicação da mistura, tendo como base as especificações do fornecedor, tornando-se muito importante ter em consideração o material a utilizar para a matriz e o material para as resinas de colagem, porque este é bastante difícil de colar (em superfícies não tratadas), porque não apresenta qualquer polaridade, não é poroso e é inerte quimicamente [STRENGTH PREDICTION AND EXPERIMENTAL VALIDATION OF ADHESIVE JOINTS INCLUDING POLYETHYLENE, CARBON-EPOXY AND ALUMINIUM ADHERENDS].

No que diz respeito aos adesivos são utilizados dois tipos de resinas com maior frequência:

- Resinas termoendurecíveis;
- Resinas termoplásticas.

As resinas termoendurecíveis (incluem o poliéster, o vinil éster, as epoxídicas e poliuretano) após a cura são infusíveis, ou seja, não podem ser reprocessadas ou soldadas, sendo necessário processos mecânicos para ser retirada. À temperatura ambiente estão no estado líquido, antes da cura, e a reação química de cura ocorre durante o aquecimento.

As vantagens destas resinas são:

- Boa capacidade de impregnação das fibras;
- Propriedades adesivas muito elevadas:
 - Quando a superfície é devidamente preparada.
- Reduzida viscosidade:
 - Boa trabalhabilidade;
 - Boa velocidade de processamento, garantindo ao mesmo tempo uma boa adesão entre os materiais e o suporte;
- Boa estabilidade aquando ações térmicas;
- Capacidade resistente a ataques químicos.

As resinas termoplásticas apresentam uma viscosidade elevada (difícil processamento), maior dificuldade de impregnação e adesão e são sólidas à temperatura ambiente. Para fundir é necessário aquecer e pressurizar para garantir a impregnação das fibras e é arrefecido sob pressão. Comparativamente com as termoendurecíveis o processo nas termoplásticas é reversível.

3.2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Este pequeno ponto apresenta uma forma de estimar as propriedades mecânicas básicas dos FRP tendo em consideração algumas propriedades constituintes dos materiais que constituem o FRP e a fração do volume de cada um. Para realizar a estimativa utiliza-se uma simplificação da regra das misturas, assim:

$$E_f = E_{fib}V_{fib} + E_mV_m \quad (1)$$

$$f_f \approx f_{fib}V_{fib} + f_mV_m \quad (2)$$

Onde:

$$V_{fib} + V_m = 1 \quad (3)$$

A regra das misturas é uma aproximação relacionada com o comportamento micromecânico (estrutura a nível microscópico) das fibras, servindo apenas para ter uma “ideia” do comportamento. Para ter uma noção mais detalhada será necessária experimentação, como ensaios à tração das fibras.

3.2.4 RESINAS

Existem alguns tipos de resinas utilizados para realizar vários pontos. Estes pontos estão relacionados com a matriz, como os primários, resinas de impregnação e massas de enchimento. Estes produtos necessitam de garantir alguns pontos importantes para o bom funcionamento dos sistemas FRP:

- Compatibilidade e adesão ao betão e aos sistemas de reforço FRP;
- Necessitam de viscosidades que permitam uma boa trabalhabilidade e que garantam o máximo de impregnação das fibras (menos viscosidade garante um “acesso facilitado” do fluído a todos os contornos dos elementos, mas garantir que apresente alguma viscosidade para que não impossibilite a adesão);
- Necessária resistência aos efeitos ambientais. Estes efeitos incluem a humidade, temperaturas elevadas e ataques químicos (cloretos, sulfatos, entre outros);
- Apresentarem uma capacidade mecânica e química adequada para garantir uma eficiente distribuição das forças;
- Evitar a encurvadura das fibras quando sujeitas a compressão.

As várias resinas podem ser utilizadas para realizar vários processos:

- **Primários** – penetrar a superfície do betão, por capilaridade, para melhor a capacidade de adesão da superfície;
- **Resina de impregnação** – resina utilizada para impregnar as fibras, que vai garantir que estas apresentem o sentido e direção pretendidos e que se mantenham nessa posição, permitindo também uma boa adesão entre elas. Normalmente estas resinas são epoxídicas utilizadas normalmente em sistemas curados “in situ”. Internacionalmente atribui-se o termo “Saturating Resin”, de forma a diferenciar a designação mais corrente de adesivos para laminados pré-esforçados (a resina é normalmente epoxídica em ambos os casos, mas é feita esta diferença devido à forma com é aplicada);
- **Massa de enchimento** - Tem como função preencher algumas anomalias com fissuras, para garantir uma superfície mais suave e isenta de problemas. Também tem uma função importante quando preenche os vazios, que implica a expulsão do ar desses mesmos espaços. Não considerando a do ar expulsão, poderia haver formação de bolhas de ar que iam diminuir significativamente a

coesão entre os materiais e consequentemente a capacidade resistente do sistema.

Estas resinas podem ser de vários materiais diferentes, no entanto na construção civil são muito utilizados quatro tipos de resinas. Estes materiais diferentes apresentam capacidades distintas que permitem ser utilizados em vários tipos de ambientes com condições diferentes (ambientais e mecânicas).

- **Poliéster** – fáceis de utilizar e apresentam o menor custo de todas as resinas, no entanto são bastante sensíveis a degradação por radiação UV e têm características mecânicas moderadas;
- **Vinil éster** – apresentam resistência a ações ambientais e químicas elevada e apresentam boas capacidades mecânicas (ambos os casos superiores ao poliéster), no entanto são mais sensíveis a temperaturas elevadas e apresentam um custo superior ao anterior;
- **Poliuretano** – muita resistência contra ações químicas e ambientais, apresenta melhores propriedades mecânicas, incluindo capacidade resistente e flexibilidade, superiores ao anterior. São, no entanto, mais caras que o vinil éster;
- **Epóxi** (mais comum) – apresentam uma boa resistência mecânica e térmica, apresenta uma boa capacidade resistente contra a humidade, tem uma durabilidade elevada, são mais caras que as anteriores, necessitam que seja garantida uma boa consistência (muito importante para garantir o bom funcionamento do produto) e apresentam alguma degradação se expostas a UV por longos períodos de tempo.

Na tabela seguinte são comparadas algumas características de duas das mais utilizadas na aplicação de reforços FRP. Na segunda tabela vão estar algumas características da resina epoxídica como título informativo (apresenta maior informação sobre o produto, de forma geral).

Resina	Módulo de elasticidade à tracção [GPa]	Resistência à tracção [MPa]	Extensão na rotura [%]	Densidade [Kg/m ³]
Polyester	2.1-4.1	20-100	1.0-6.5	1000-1450
Epoxi	2.5-4.1	55-130	1.5-9.0	1100-1300

Tabela 7 - Tabela resumo das propriedades das resinas (Barros, 2004)

Pela tabela anterior é possível observar que a resina epóxi apresenta uma maior resistência à tração e uma extensão de rutura mais elevada (mínimo e máximo), o que significa que podem ser utilizadas em projetos mais exigentes. De certa forma as propriedades da resina epóxi são superiores tendo em conta densidades menores.

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 Vitrea (°C)	45 – 80

Tabela 8 - Propriedades de resina epóxi (Carvalho, 2021)

3.3 REVESTIMENTOS

É necessário proteger os sistemas de reforço de vários fatores ambientais (temperatura, radiação e humidade, por exemplo) e acidentes como impactos e vandalismo. Desta forma foram testadas ao longo do tempo algumas formas de minimizar estes problemas.

Estes revestimentos são aplicados na superfície exterior do sistema FRP após a cura da resina.

São utilizados alguns tipos de revestimentos:

- **Proteção UV** – revestimentos acrílicos, revestimentos de poliuretanos, superfícies revestidas com materiais cimentícios, entre outros. É de apontar que algumas resinas de vinil éster são mais resistentes contra radiação UV que resinas epóxi;
- **Proteção ao fogo** – Podem ser utilizados revestimentos intumescentes (base polimérica) que são uteis para controlar a propagação das chamas e a formação de fumo. Mais à frente vão ser detalhado um pouco mais sobre este ponto devido à sua grande importância.
- **Impactos e vandalismo** – Para ambos os casos são necessários materiais resistentes e bastante duráveis, como revestimentos de poliuretano ou argamassas cimentícias. É também bom garantir que os materiais sejam duráveis.
- **Resistência química** – a exposição a químicos agressivos, como ácidos fortes e cloretos vai desgastar os compósitos. Para os casos podem ser utilizados produtos com grande resistência, como uretanos e epóxi (existem alguns tipos de epóxi muito resistentes contra desgaste químico);

- **Estética** – este ponto pode ser complementado com qualquer um dos anteriores, visto que o reforço e as proteções extra podem ser disfarçadas de forma a garantir uma apresentação mais interessante;
- **Submersão em água** – os sistemas FRP podem libertar compostos potencialmente prejudiciais para águas de abastecimento para o ambiente. Desta forma são necessários revestimentos que não lixiviam, como argamassas cimentícias com aditivos específicos para evitar ou melhorar a situação.

3.4 PROCESSOS DE FABRICO

Na construção são utilizados essencialmente dois processos de produção dos materiais de FRP, tendo um terceiro que é menos comum, mas também funciona muito bem:

- **Pultrusão:**
 - Os produtos FRP são produzidos e transportados para a obra;
- **Moldagem manual (hand layup ou wet layup):**
 - Os produtos FRP são produzidos, aplicados e curados em obra;
- **Infusão em Vácuo (Vacuum Infusion, VIP).**

A **pultrusão** é um processo de fabrico em contínuo que consiste em puxar as fibras embebidas na resina (saturação pode ser por banho [submersão] ou por injeção) através de um molde pré-aquecido (provoca o endurecimento / cura da resina pelo processo de polimerização, conferindo elevada resistência química) utilizando um dispositivo de tração contínuo.

O endurecimento causado pela temperatura e a geometria do molde garante a sua forma definitiva (largura e espessura definidas em projeto). O processo é utilizado para fabricar varões, laminados e perfis estruturais.

A imagem seguinte apresenta, de uma forma muito simplificada, o processo descrito.

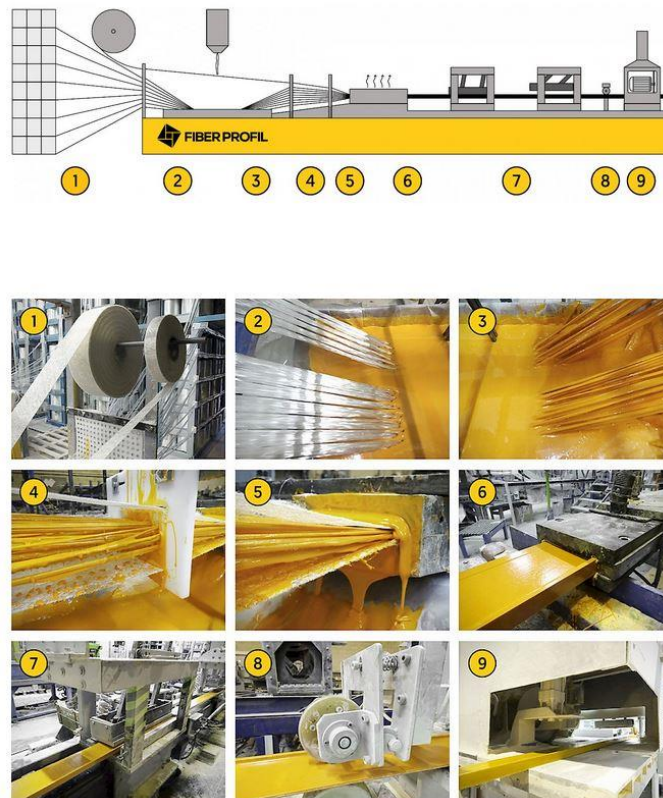


Figura 3.4.1 - Processo de pultrusão (fiberprofil)

No **processo de moldagem manual** as fibras são agrupadas, alinhadas e esticadas. Ao mesmo tempo são introduzidas numa prensa com uma tela impregnada com quantidades mínimas de resina epóxi para garantir a ligação fibras/resina. O compósito final é formado quando for feita a adição da resina durante a aplicação do compósito. Este método é essencialmente utilizado para a aplicação de mantas de reforço (reforço de pilares por confinamento ou reforço ao esforço transversal).

O próximo método funciona através da **injeção de resina sob pressão**, num molde fechado. É necessário colocar o material de reforço no interior de um molde seco, com introdução de resina que vai impregnar as fibras, por ação do vácuo. A utilização do vácuo (no interior de um plástico hermético ou de um saco de borracha) permite minimizar o desperdício de resina e minimizar os excessos no produto final.

- Permite desenvolver laminados multicamadas complexos (com fibras orientadas em várias direções) que podem ser concluídos numa única etapa;
- Permite obter reforços com relações resistência/peso muito boas;
- O custo de ferramentas é mais elevado;

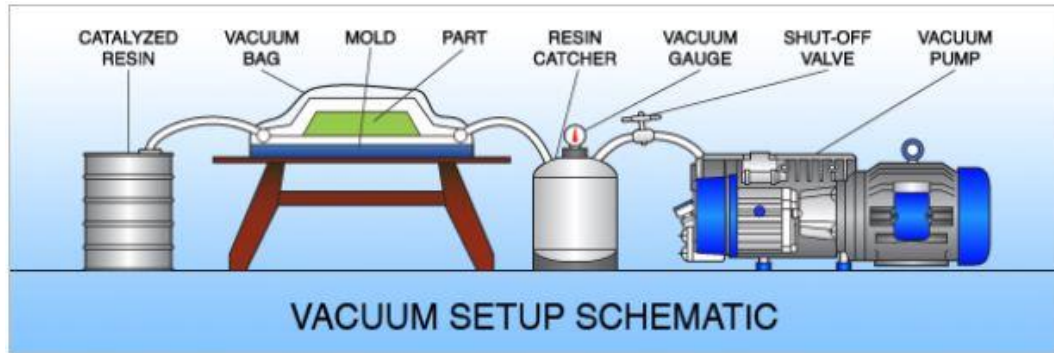


Figura 3.4.2 - Processo de injeção em vácuo (Mcdaniel et al, 2014)



Figura 3.4.3 - Exemplo da disposição das fibras (Mcdaniel et al, 2014)

3.5 TIPOS DE SISTEMAS

Uma das vantagens do sistema é o facto de não ser necessário a utilização de ancoragens mecânicas, visto que os adesivos utilizados são bastante resistentes e aderem muito bem às superfícies (se forem bem tratadas).

Existem opções de utilização de ancoragens para casos mais especiais ou se a capacidade de adesão não é suficiente.

Na tabela abaixo estão representados os sistemas e as suas funções, considerando que os mais comuns são as mantas e os laminados colados externamente:

	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 9 - Sistemas e suas utilizações (Carvalho, 2021)

3.5.1 SISTEMAS CURADOS “IN SITU” (HAND LAY-UP) – MANTAS E TECIDOS FLEXÍVEIS

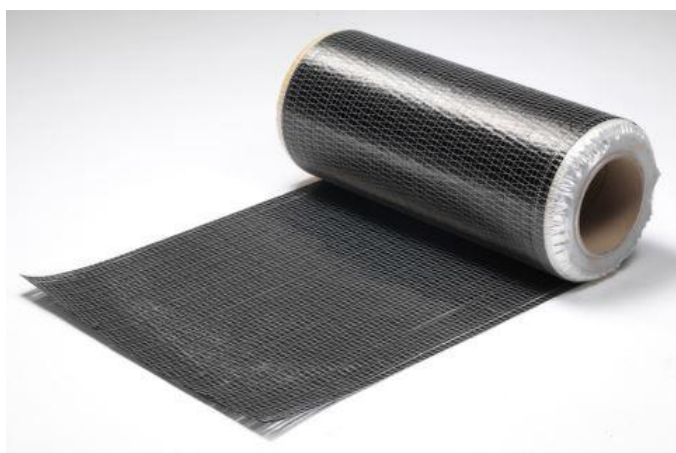


Figura 3.5.1 - Sistema curado “in situ” – manta (S&P C-Sheet 240)

Os sistemas curados “in situ” são impregnados no local de trabalho, que têm como finalidade ligar as fibras de FRP à superfície do betão. Estes incluem os fios, as mantas e os tecidos de fibras.

As mantas e tecidos (mais comuns) são feixes bem ordenados de fibras de carbono contínuas, unidireccionais (mantas) e bidireccionais (tecidos) com alto módulo de elasticidade e grande resistência mecânica, que estão num estado seco ou pré-impregnado (baixa utilização de resina).

O processo de fabrico muito comum é a moldagem manual descrita atrás no caso das mantas. Nos tecidos a diferença é o facto de ser necessário entrelaçar as fibras devido à natureza multidireccional.

São muito utilizados para cintagem de pilares (melhorar o confinamento) e paredes para garantir um aumento a ductilidade e da sua resistência mecânica (incluindo um reforço relacionada com esforço transversal).

Um bom exemplo da versatilidade destes materiais está representado nas imagens abaixo, que representa o reforço das pernas das estátuas decorativas do Edifício Palladium no Porto.

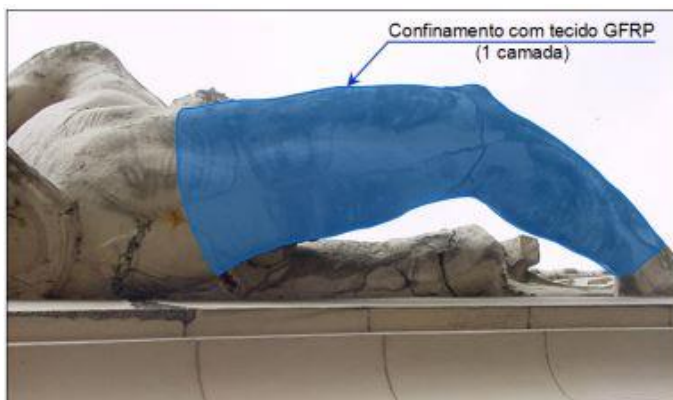


Figura 3.5.2 - Reforço da estátua do Edifício Palladium no Porto (Juvandes, 2011)

É de notar que a geometria demonstrada na figura é bastante complexa, demonstrando a viabilidade das mantas e tecidos. Para finalizar será necessário tratar a superfície exterior da manta ou tecido utilizando epóxi com agregados ou outros materiais, como areia de quartzo, que aumentem o atrito da manta, permitindo a aplicação de um revestimento.

Na tabela seguinte são apresentadas as mantas e tecidos utilizados nos sistemas FRP curados “in situ”.

Designação	Descrição	Orientação das Fibras	Estado
Mantas “sheets”	Disposição de faixas contínuas e paralelas de fibras sobre uma rede de proteção (200 – 300 g/m ²)	Unidirecionais	secas
			Pré-impregnadas [i]
“Woven roving” [ii]	Entrelaçamento direcionado de dois fios ou faixas de fibras (600 – 800 g/m ²)	Bidirecionais	secos
Tecidos	“Mat” [ii]	Multidirecionais	Pré-impregnados [i]
	“Cloth” [ii]		Pré-impregnados

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

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

Tabela 10 - Resumo dos diferentes tipos de sistemas curados “in situ” (Figueira, 2016)

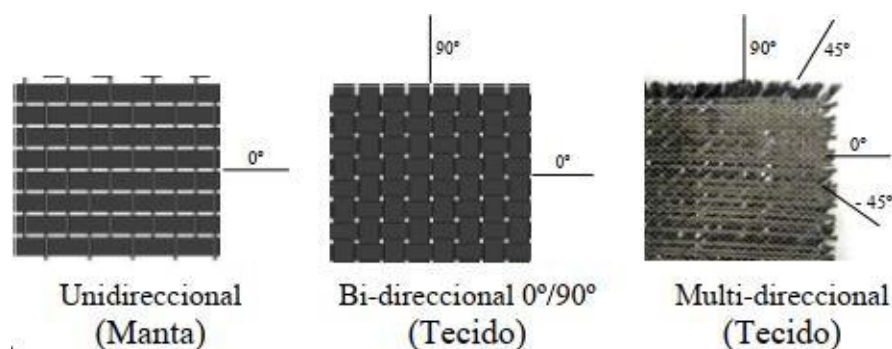


Figura 3.5.3 - Demonstração visual das várias direções (Juvandes, 2011)

Os métodos de aplicação são iguais para mantas e tecidos. Pela análise da tabela uma das diferenças principais é o facto de as mantas serem apenas unidireccionais (fibras apenas numa direção), quando comparados com os tecidos que apresentam um maior número de iterações possível.

Na prática, se não houver, por alguma razão, acesso a tecidos, podem ser aplicadas mantas sobrepostas, em cima umas das outras, para garantir um sistema bidireccional, sendo necessário que a superfície da manta seja tratada para garantir maior adesão (utilizando areia de quartzo, por exemplo), visto que estes materiais não apresentam boa adesão na “superfície exposta”.

3.5.1.1 MANTAS DE CFRP NO CONFINAMENTO DE ELEMENTOS DE BETÃO SUBMETIDOS À COMPRESSÃO

Quando o pilar é sujeito a esforços axiais de compressão, deforma, como representado na figura:

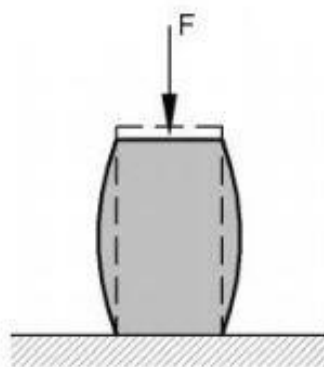


Figura 3.5.4 - Exemplo da deformação do pilar (Figueira, 2016)

A aplicação do sistema de confinamento vai permitir aumentar significativamente o desempenho estrutural à compressão, à flexão e ao esforço transversal. O aumento

da resistência do pilar vai ocorrer porque o sistema vai impedir que o pilar se deforme da maneira apresentada na imagem acima.

Os efeitos do confinamento apresentados nos diagramas tensão/extensão do betão à compressão, são:

- Aumento da resistência máxima à compressão;
- Aumento da ductilidade do betão;
- O segundo troço da curva não é tão decrescente como o betão não confinado.

Formas de confinamento:

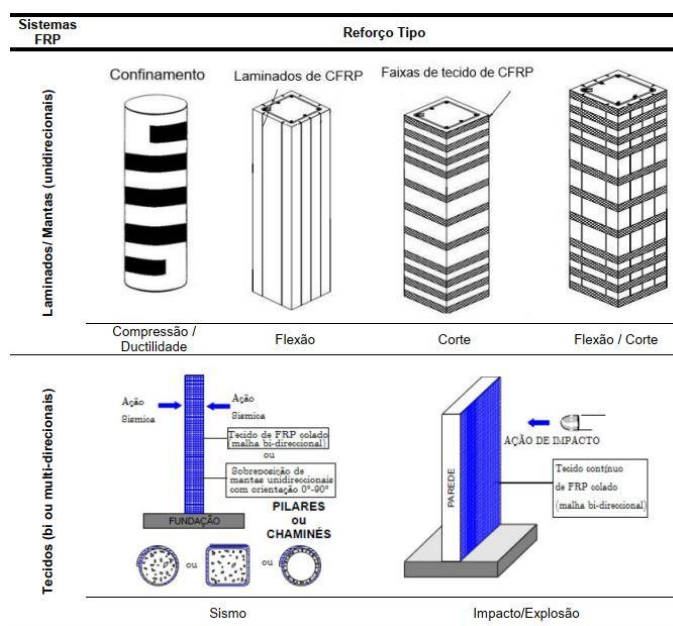


Figura 3.5.5 - Várias formas de reforço de pilares (Figueira, 2016)



Figura 3.5.6 - Diagrama tensão/extensão (Figueira, 2016)

Pelo diagrama anterior é possível verificar que a situação confinada e não confinada na fase elástica não apresenta grandes diferenças entre si. Isto ocorre porque o betão nesta fase deforma pouco. Desta forma o reforço não vai ativar eficazmente. O diagrama demonstra uma zona de transição que significa a passagem de um estado elástico a um regime plástico (origem de micro-fendas). É a partir deste ponto que o betão, originalmente, tinha tendência para entrar em rutura porque não apresenta patamar plástico (existe, no entanto, sempre alguma deformação), como se nota na linha do betão não confinado (macro-fendas e rutura). Neste ponto da evolução é onde os reforços começam a fazer o seu efeito, porque o betão está em uma fase de deformação mais acentuada.

O betão confinado vai tentar deformar-se, mas devido à aplicação de um determinado reforço, não vai conseguir, como demonstra a linha do betão bem confinado, que apresenta um patamar plástico que vai aumentar significativamente a resistência total da peça. A inclinação do patamar plástico observado vai estar relacionado com a rigidez do material de reforço e com o módulo de elasticidade do betão.

O diagrama indica muito claramente que a aplicação correta dos produtos de reforço, como qualquer outro, tem de ser feita de forma correta ou o resultado vai ser pouco satisfatório (o reforço vai sofrer grandes deformações). O caso pode estar relacionado com algumas razões:

- A adesão betão/reforço não foi analisada de forma correta. O reforço aquando a deformação do betão na zona de transição, solta-se na totalidade ou, pelo menos, parte dele, porque adesão do reforço não consegue compensar a deformação excessiva do betão, levando ao destacamento do reforço;
- A qualidade dos materiais tem de ser muito bem inspecionada. Este ponto incluiu as fibras e os adesivos utilizados. Está também relacionado com as características mecânicas e químicas dos materiais, como a resistência mecânica, módulo de elasticidade e a resistência a ataques químicos;
- Erros na produção dos materiais ou transporte incorreto dos mesmos;
- Falta de cuidado por parte dos trabalhadores (se não apresentarem treino e conhecimento suficientes para garantir um bom desempenho);
- Não ter em conta certos eventos como o fogo, que destrói completamente a estrutura da matriz, especialmente quando a sua espessura não é significativa (maioria dos casos);
- Pormenorização errada dos sistemas de confinamento;
- Geometria da secção transversal mal considerada.

3.5.2 SISTEMAS PRÉ-FABRICADOS LAMINADOS E VARÕES CFRP



Figura 3.5.7 - Sistema pré-fabricado – laminado (Catálogo S&P C-Laminate)



Figura 3.5.8 - Sistema pré-fabricado - varões CFRP (Juvandes, 2011)

Os sistemas pré-fabricados resultam da impregnação com resina de camadas ou feixes de fibras contínuas, com orientação unidirecional, através de processos de fabrico analisados anteriormente para obter a geometria pretendida. Normalmente os laminados pré-curados são produzidos pelo processo de pultrusão.

A sua aplicação é geralmente mediante a colagem sobre a superfície a reforçar utilizando resinas, normalmente epoxídicas, podendo haver em certos casos necessidade de reforçar a ligação utilizando ancoragens mecânicas e sistemas de pré-esforço.

3.5.2.1 LAMINADOS

A escolha da secção do laminado depende do dimensionamento efetuado e da relação entre o seu custo e os seus benefícios. Este sistema é muito utilizado para aumentar a resistência à flexão das peças. Os laminados apresentam uma capacidade de adaptação bastante elevada, pelo que pode ser utilizada para reforçar vários tipos de estruturas, em várias condições:

- Estruturas com diâmetros de armaduras mais reduzidos, devido à corrosão do aço;
- Utilização em situações onde existe um envelhecimento dos materiais ou em situações mais extremas como anomalias originadas por impactos ou incêndios;
- Como é um sistema relativamente flexível, pode ser utilizado para reforçar estruturas curvas ou superfícies inclinadas;
- Estabilização de vibrações e oscilações;
- Melhorar a resistência a sismos;
- Aumentar a capacidade resistente à compressão, à tração, à flexão e à torção;
- Diminuir as deformações.

Para o caso que vai ser estudado mais à frente sobre os pilares, os laminados podem ser utilizados para melhorar a capacidade resistente do pilar à flexão, muito importante na análise estrutural por flexão composta e desviada.



Figura 3.5.9 - Laminados num pilar pela técnica NSM (S&P C-Laminate (slot-applied))

Em situações onde a colagem com adesivo não é suficiente, devido, por exemplo, à fraca qualidade da superfície do betão, necessidades estruturais mais intensas ou porque o espaço necessário para garantir o comprimento de amarração necessário para transferir as tensões eficazmente pelo sistema não é suficiente, poderá ser efetuado o sistema apresentado na imagem acima ou também são muito utilizados sistemas de ancoragens específicas para laminados com o objetivo de potenciar a tensão de aderência dos laminados CFRP aplicados à superfície

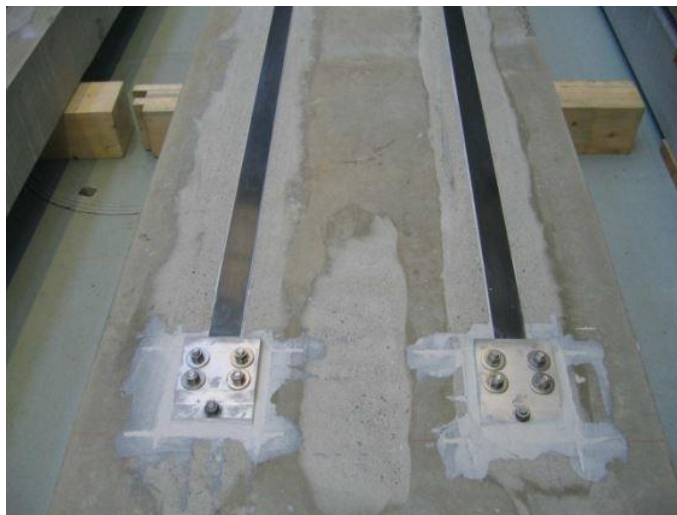


Figura 3.5.10 - Utilização de ancoragens com laminados pela técnica EBR (S&P C-Laminate (End-Anchor))

Uma outra forma de aplicar os laminados é a utilização de um sistema de pré-esforço que permite melhorar algumas características, tais como a diminuição das deformações excessivas, melhorar a resistência à tração (aliviando as armaduras) e a resistência à compressão (aliviar a compressão). Tem as vantagens semelhantes ao pré-esforço comum.

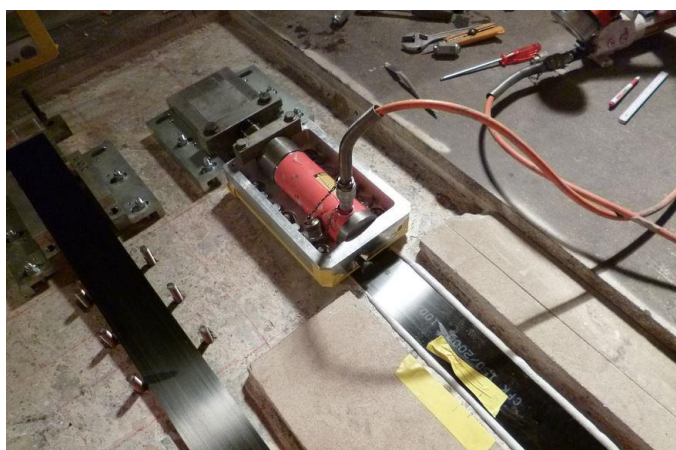


Figura 3.5.11 - Utilização do pré-esforço (Reinforcement – Underground Garage, Coop, Kasparstrasse – Bern, Switzerland)

O pré-esforço apresenta algumas vantagens interessantes, como por exemplo:

- Melhora a durabilidade devido à redução das fendas;
- Maior capacidade resistente para uma menor área de reforço;
- Os eixos neutros mantêm-se mais abaixo quando comparado com um sistema sem pré-esforço, aumentando a eficiência estrutural:

- Tal acontece devido ao efeito de compressão nas fibras superiores garantido pela contra flecha. Desta forma o diagrama de tensões vai ter o eixo neutro mais abaixo.
- Sistema mais caro e apresenta a necessidade de pessoal qualificado;

A tabela seguinte apresenta os materiais constituintes dos sistemas pré-fabricados e curado “in situ” com vista a facilitar a compreensão das diferenças de cada uma:

Sistema Comercial	Primário	Argamassa de Regularização	Adesivo	Resina de Impregnação	Compósito FRP	Fibras contínuas secas ou pré-impreg.
Pré-Fabricado	Opcional	Opcional	Sim	–	Sim	–
Curado “in situ”	Sim	Opcional	–	Sim	–	Sim

Tabela 11 - Materiais que constituem os sistemas FRP mais comuns (Juvandes, 2011)

3.5.2.2 UTILIZAÇÃO DOS LAMINADOS PARA REFORÇAR O PILAR À FLEXÃO

Neste ponto é necessário aplicar os laminados aplicados exteriormente ou introduzidos na estrutura realizando o que está apresentado na figura **3.5.9**.

Infelizmente, para a proteção de pilares considerando os momentos fletores, não existe muita informação específica, sendo necessário olhar para o pilar como se uma viga na vertical se tratasse.

3.5.3 SISTEMAS ESPECIAIS

Um dos sistemas especiais para utilizar em pilares caracteriza-se pela colagem de laminados pré-esforçados e a aplicação automática na superfície a reforçar. Este sistema de aplicação dedica-se quase exclusivamente a reforço de pilares.

O sistema consiste num dispositivo que gira em torno do perímetro dos pilares (pode ser utilizado em pilares retangulares se as arestas forem convenientemente boleadas) e enrola as fibras de uma forma contínua ao longo da sua altura, aplicando a resina ao mesmo tempo que as fibras (tendo em consideração que foram pré-impregnadas, para melhor adesão e transferências de esforços).

As vantagens mais interessantes deste sistema é o facto de reduzir significativamente o tempo de aplicação do reforço e permitir um bom controlo da qualidade. A desvantagem é o preço de utilização mais elevado.

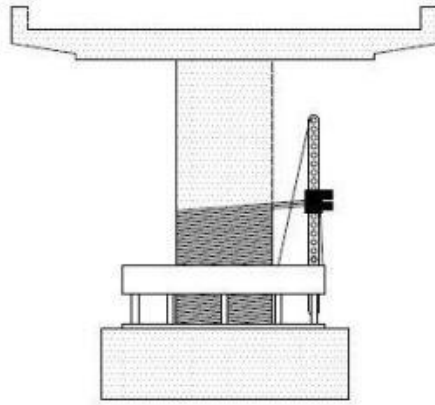


Figura 3.5.12 - Sistema especial de aplicação automática em pilares (Figueira, 2016)



Figura 3.5.13 - Aplicação prática do sistema acima (fib 14.2)

Um outro sistema, ainda em desenvolvimento, denominado enrolamento filamental é um processo onde se enrola as fibras (tracionadas) embebidas em resina à volta de um mandril com a forma da peça que necessita de reforço. O processo permite realizar peças com boas características mecânicas aliadas ao peso mais baixo.

Uma outra característica é o facto de ser possível modificar os ângulos de enrolamento, alterando assim as características mecânicas do sistema (maior adaptabilidade porque é possível modificar as características com relativa facilidade).

A imagem abaixo representa a aplicação das fibras em uma viga:

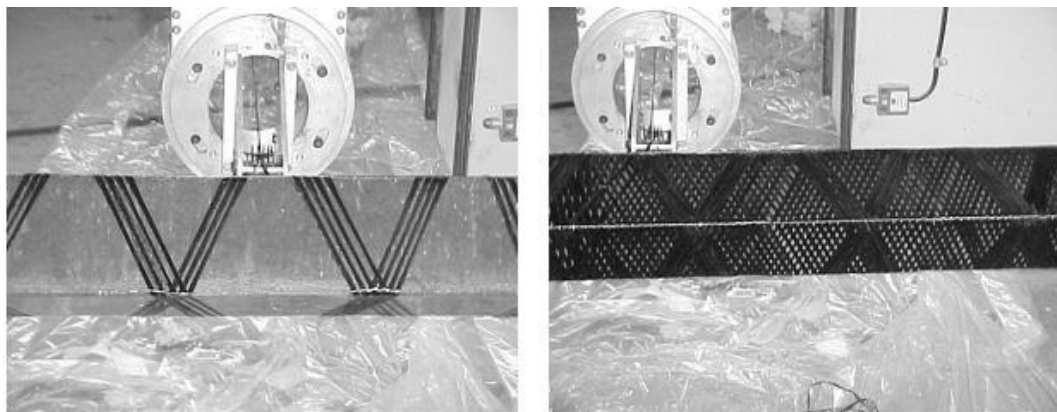


Figura 3.5.14 - Aplicação do método em um pilar (Esteves, 2003)

Este método está a ser estudado na utilização em pilares para verificar se a aplicação das fibras em vários padrões poderá melhorar as capacidades mecânicas.

Existem duas novas técnicas, em desenvolvimento, interessantes para melhorar a capacidade do sistema. A primeira está relacionada à utilização de camadas não laminares formadas por fitas finas e contínuas formadas por fibras embebidas numa matriz termoplástica. As fitas são coladas através de um processo de colagem por fusão.

Esta técnica permite o deslocamento das camadas em relação umas às outras, diminuindo tensões internas. A imagem seguinte representa, de uma forma geral, o sistema:

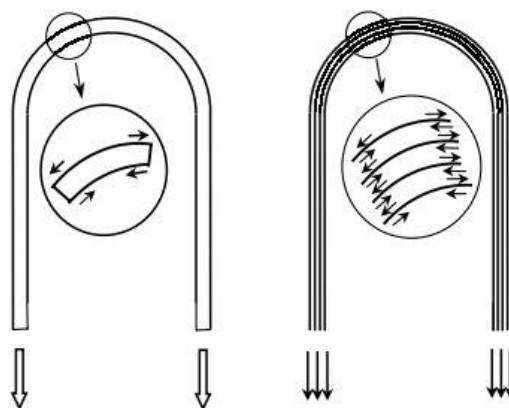


Figura 3.5.15 - Exemplificação da nova técnica de deslocamento (fib 14.2)

O último ponto está relacionado com o aumento da velocidade da cura da resina de colagem. Normalmente as resinas curam à temperatura ambiente, normalmente designada como “cold curing”.

Um dos problemas com estes sistemas é o facto de ser necessário uma temperatura ambiente relativamente alta e estável para uma cura bem-sucedida, significando que, em regiões com temperaturas menores ou durante o inverno, não é garantido que o sistema funcione como previsto. Desta forma foram desenvolvidos alguns sistemas como aquecedores elétricos, sistemas de aquecimento por infravermelhos e cobertores de aquecimento. A imagem seguinte apresenta um sistema que é muito interessante para os compósitos CFRP utilizando correntes elétricas.

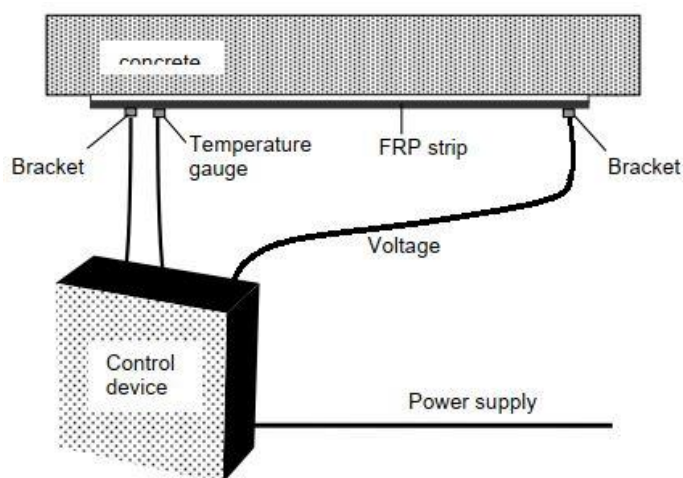


Figura 3.5.16 - Sistema de aquecimento para cura rápida (fib 14.2)



Figura 3.5.17 - Sistema de aquecimento para cura rápida na prática (fib 14.2)

O sistema utiliza um sistema especial, demonstrado acima, onde induzem uma corrente elétrica nas fibras de carbono (boa condutibilidade elétrica) durante o processo de cura (aumento de resistência). A corrente elétrica induzida aumenta a temperatura das fibras e, desta forma, permite acelerar o processo de cura.

Uma outra vantagem está na unidade de controlo porque permite controlar a temperatura de cura através do controlo dos impulsos elétricos.

3.6 TÉCNICAS DE APLICAÇÃO

Existem dois tipos mais comuns de compósitos utilizados na engenharia civil, apresentados atrás: os laminados e mantas. Para cada uma das técnicas é necessário garantir alguns requisitos que permitam aplicar os sistemas de forma segura e eficaz.

3.6.1 REQUISITOS GERAIS

É necessário ter em conta que alguns requisitos não são fáceis ou não podem ser alcançados devido a situações ambientais, pelo que é necessário arranjar soluções alternativas ou diferentes tipos de revestimentos para permitir a segura aplicação dos mesmos., assim:

- É necessário, em todas as circunstâncias, respeitar as recomendações dos fornecedores dos produtos para garantir a sua correta utilização:
 - Respeitar todas as particularidades dos materiais utilizados.
- Necessário avaliar a qualidade do betão recorrendo a ensaios de tração direta “pull-off”:
 - Para sistemas curados “in situ” é recomendado uma resistência à tração superficial superior a 1,0 MPa;
 - Para sistemas pré-fabricados é recomendado um valor superior a 1,5 MPa.
- As superfícies de aplicação dos compósitos necessitam de estar isentas de irregularidades e anomalias (betão maltratado), tais como:
 - Partículas soltas;
 - Superfícies irregulares;
 - Betão degradado;
 - Fissuras com dimensões superiores a 2 mm.
 - Armaduras corroídas:
 - Para reparar este ponto poderá ser utilizado um produto própria como S&P Resicem HP (resina epóxi de alta resistência).
- Após a remoção é necessário fazer um outro processamento para posterior aplicação do sistema, incluindo:
 - Arredondamento de arestas:
 - Essencial para diminuir as tensões exercidas nas mantas e tecidos nas arestas das peças a reforçar;
 - Limpeza da superfície de sujidades, partículas soltas que ficaram dos processos de melhoria da peça, gorduras e óleos.

- Se necessário poderá ser efetuado um reperfilamento da superfície para corrigir desníveis [desníveis máximos recomendados]:
 - 5 mm em 2 metros;
 - 1 mm em 30 centímetros.
- A rugosidade ótima recomendada será entre 0,5 mm e 1,0 mm, inclusive.
- O teor de humidade à superfície do betão não deve exceder os 4%;
- A temperatura do ar deve ser superior a 8°C e ficar pelo menos 3°C acima do ponto de orvalho:
 - É importante (relacionado com o teor de humidade) para diminuir a formação de condensação aquando da aplicação. A condensação poderá diminuir significativamente a adesão entre os materiais devido à presença de bolhas que dificultem as colagens.
- No caso das mantas deve ser garantido o alinhamento das fibras para evitar a formação de bolhas de ar;
- Após a aplicação dos laminados é recomendado verificar se existem vazios entre o adesivo e o laminado através de pancadas suaves.

3.6.2 TÉCNICAS

Existem três formas de aplicação dos FRP, nos quais a primeira é a mais divulgada internacionalmente e a última é algo inovadora.

A primeira técnica é denominada como EXTERNALLY BONDED REINFORCEMENT (EBR) onde os sistemas FRP, como mantas e laminados são colados nas faces dos elementos estruturais a reforçar através da injeção de adesivo, normalmente epoxídico (com e sem pré-esforço), funcionando como uma armadura à tração.

Estes sistemas podem ser previamente impregnados com algum adesivo para garantir melhor coesão interna entre os constituintes, com a posterior aplicação de adesivo para a colagem no elemento a reforçar.

De seguida são apresentadas algumas imagens que permitem a demonstração da aplicação real dos sistemas:



Figura 3.6.1 - Aplicação de laminados unidirecionais pela técnica EBR (S&P C-Laminate surface applied)

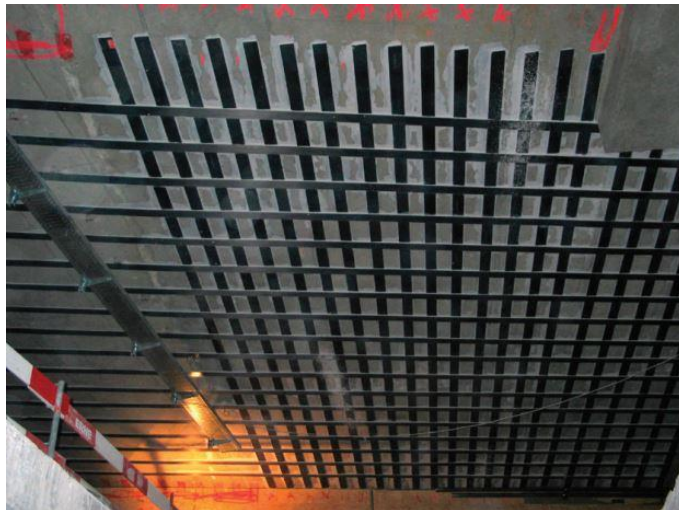


Figura 3.6.2 - Aplicação de laminados bidirecionais pela técnica EBR (S&P C-Laminate surface applied)



Figura 3.6.3 - Aplicação da manta pela técnica EBR (S&P C-Sheet 240)

A aplicação de mantas é sempre feita utilizando a técnica EBR. A informação atual sobre a aplicação NSM de mantas é praticamente inexistente. De certa forma é compreensível porque as mantas não apresentam tantos problemas relacionados com a adesão (adesão é um dos principais fatores para utilizar o NSM) como os laminados devido à enorme área de contacto com o elemento.

É de notar que o cruzamento dos laminados na segunda imagem funciona de forma semelhante a lajes com armaduras nos dois sentidos. É necessário realizar assim porque as fibras vão resistir apenas na direção no qual são aplicados, o que poderá não ser suficiente para determinados reforços.

A segunda técnica, que tem vindo a aumentar de utilização, é NEAR-SURFACE MOUNTED (NSM), que consiste na aplicação dos reforços em aberturas que foram feitas previamente na camada de recobrimento do betão.

A técnica NSM apresenta vantagens quando comparada com a EBR:

- Menor probabilidade de deslocamentos do reforço porque está “inserido” na peça;
- Como é necessário abrir um rasgo na peça (se for feito devidamente), não haverá necessidade de muito tratamento extra da superfície do betão, facilitando o trabalho;
- Melhor aderência ao betão;
- Maior proteção contra incêndio, vandalismo e impactos.



Figura 3.6.4 - Aplicação de laminados em uma parede pela técnica NSM (S&P C-Laminate (slot-applied))

A terceira técnica denominada por Embedded Through-Section (ETS) consiste na perfuração de aberturas que atravessam a secção do elemento a reforçar com posterior introdução de varões FRP e a respetiva selagem. Este sistema é especialmente bom para reforçar vigas a esforços de corte.

3.7 COMPORTAMENTO AO FOGO

A questão do fogo é muito importante considerar em qualquer estrutura, mesmo que o material apresente um comportamento satisfatório a temperaturas elevadas e não seja inflamável (Franke,1981; Schwartz, 1992), como é o caso da maioria dos compósitos (incluindo o CFRP), no entanto a resina que compõe a matriz do produto pode comprometer a capacidade resistente do sistema quando sujeita a incêndios durante um longo espaço de tempo.

O comportamento está muito relacionado com o método de aplicação dos compósitos. No caso de serem inseridos no elemento (ETS), com varões ou grelhas, o risco será semelhante a situações de betão armado com pré-esforço porque está protegido no interior do betão. Desta forma é necessário ter em atenção a espessura de recobrimento e a matriz constituinte (a resina epóxi poderá ser criada para garantir um pouco mais resistência a altas temperaturas).

No caso de sistemas colados de laminados e mantas, o reforço estrutural vai ser comprometido, sendo necessário verificar alguns fatores:

- Temperatura de transição vítrea, T_g ;
- Combustibilidade dos materiais;

- Toxicidade e desenvolvimento de fumos;
- Desempenho estrutural (também associado ao T_g);
- Propagação das chamas.

EMPA (Laboratórios Federais Suíços de Ciência e Tecnologia de Materiais) em 1994 foram feitos ensaios do comportamento ao fogo em vigas de betão armado. Foram feitas vigas com reforços colados de chapas metálicas, outras com laminados de CFRP e uma delas não tinha qualquer reforço para servir como referência. Foram aquecidos até uma temperatura de 651,85 °C, de acordo com as normas ISO 834, durante uma hora.

No caso das chapas de alumínio o adesivo cedeu após 8 minutos. No laminado houve uma redução gradual da secção útil e consequentemente a diminuição da rigidez do compósito. Ao fim de uma hora o laminado acabou por destacar-se do betão. Segundo o autor do artigo (Meir, 1997-b) a vantagem estava no compósito CFRP quando comparado com o metálico porque apresenta uma condutividade térmica transversal baixa.

Quando o compósito é exposto ao fogo ocorre pirólise (rutura da estrutura molecular original do composto) da matriz junto à superfície exposta. A camada que se vai formar por ação do fogo vai servir como uma camada protetora. O problema está relacionado com o aumento da espessura da camada devido ao tempo de exposição, diminuindo a secção resistente do compósito ao longo do tempo até o sistema não ser capaz de resistir. Este fenómeno ocorre até restarem apenas as fibras, ficando a matriz completamente destruída.

Na maioria dos sistemas, especialmente segundo a técnica EBR, a espessura da matriz é muito baixa, não garantindo que a camada protetora se desenvolva. Assim, ao invés de resistir por algum tempo a ligação matriz/betão é perdida nos primeiros instantes do fogo (para temperaturas que excedam a temperatura de transição vítrea $[T_g]$ da matriz ou do adesivo) [ACI 440.XR, 2006]. Um dos fatores mais importante para não haver a rutura instantânea é a condutibilidade do carbono, que permite prolongar um pouco mais o sistema.

O parâmetro T_g indica a temperatura no qual os polímeros (entre outros materiais amorfos) resistentes e com comportamento frágil ficam mais deformáveis (a rigidez diminui [estado viscoelástico]) e, desta forma, menos resistentes (semelhante ao que ocorre com o betume aquando altas temperaturas, fica muito deformável e inutilizável de um ponto de vista resistente). O valor da temperatura vítrea depende do tipo de resina e, quando na presença de fibras, tende a aumentar devido às características químicas do material das fibras. Para avaliar esta característica realiza-se o ensaio de DSC (Differential Scanning Calometry) em laboratório.

Uma preocupação muito grande, especialmente para garantir a segurança das pessoas, é a formação de fumo e a toxicidade do mesmo. Devido aos vários experimentos efetuados ao longo do tempo pode concluir-se que as resinas

termoendurecíveis produzem elevadas quantidades de fumo (combustão destes materiais liberta gases nocivos, como por exemplo monóxido de carbono) e apresentam fraca capacidade de propagação das chamas.

Para tentar proteger estes sistemas, ou retardar o efeito das chamas, foram testadas algumas formas de proteção utilizando gesso [placas de gesso resistentes ao fogo, por exemplo] ou argamassas.

3.8 COMPORTAMENTO A LONGO PRAZO

Para garantir um bom comportamento a longo prazo dos sistemas FRP, é recomendado a execução de revestimentos de proteção sobre o sistema, caracterizado por duas fases.

A primeira diz respeito à proteção temporária (período no qual está a ser feito o reforço), que deve incluir medidas de proteção ambiental na zona de intervenção quando a resina está a curar para evitar contacto direto com a humidade, poeiras, luz solar e temperaturas excessivas.

A segunda está relacionada a um carácter permanente, como medida de controlo das temperaturas. É necessário garantir que o sistema está protegido de impactos e de vandalismo, agressões ambientais e proteção ao fogo. Se estas variáveis forem tidas em conta os sistemas vão ter “vidas” úteis bastante elevadas.

Um outro ponto muito importante para garantir uma utilização duradoura é a proteção do adesivo para evitar degradação acelerada. Desta forma é necessário ter em conta alguns critérios:

- Avaliação do gradiente higrométrico e térmico que se espera na envolvente da obra no período de “vida” útil quando exposto ao ambiente;
- Desenvolvimento de adesivos/resinas com valores de T_g (temperatura de transição vítrea) superior às condicionantes ambientais esperadas no local;
- No caso de temperaturas mais baixas, a matriz fica menos flexível e com maior tendência para decorrerem danos por fadiga (a resistência e a rigidez mantêm-se inalteradas);
- Se não for possível realizar nenhum dos critérios acima, será necessário implementar ações que evitem exposição direta dos reforços ao ambiente. Isto pode ser realizado por meio de pinturas ou a aplicação de placas de revestimento, por exemplo;
- Efeitos da radiação UV;

Existem dois fenómenos muito importantes relacionados com o desempenho do material ao longo do tempo sobre ações constantes no tempo. Os fenómenos são a fluência e a relaxação. De forma geral, a fluência está relacionada com a deformação

constante do material sob cargas constantes, ao longo do tempo e a relaxação está relacionada com a perda de tensão nas fibras do compósito ao longo do tempo.

As variações de tensão e deformação são oriundas essencialmente de mecanismos de alteração ao nível da matriz, relacionada com as forças internas na ligação, dependendo de fatores como a cura da resina, a orientação das fibras, o processo de fabrico e efeitos ambientais como a temperatura e a humidade.

Durante alguns anos foram feitas pesquisas semelhantes à publicação de Rostásy, (1998) sobre o comportamento de laminados CFRP que, de forma geral, concluiu que os laminados colados (mais comuns) com resina epóxi não são afetados de forma significativa pelo fenómeno de fluência ou relaxação (necessário ter em consideração, mas não é algo preocupante).

3.9 MODOS DE RUTURA (ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS)

Neste ponto serão tidas em consideração alguns tipos de ruturas, de forma generalizada, de estruturas à flexão (algumas formas de rutura de pilares foram apresentadas, de uma forma geral, no **capítulo 2, ponto 2.1**). O capítulo tem em consideração informação obtida do documento fib Bulletin 14.4 (documento relacionado com a flexão).

Os modos de rutura apresentados estão relacionados com colagem externa do compósito.

Os modos de rutura para elementos de betão sujeitos à flexão estão divididos em duas classes:

- Os que mantêm a resistência do sistema compósito/betão até à rutura do betão ou pela falha do FRP em tensão;
- Os que perdem a ação resistente do FRP antes da rutura total anterior (ponto anterior), devido à descolagem do FRP do elemento de suporte.

3.9.1 AÇÃO COMPLETA DO COMPÓSITO

- Cedência das armaduras seguida de esmagamento do betão:
 - Percentagem de armadura baixa;
 - Rutura à tração das armaduras e à compressão no betão.
- Cedência das armaduras seguida da falha do material FRP:
 - Rácios baixos de aço e FRP;
- Esmagamento do betão:

- Para um reforço alto (alta percentagem de armaduras e reforço FRP), poderá haver esmagamento do betão nas zonas comprimidas antes da rutura do aço à tração;
- Necessário aumentar a capacidade resistente à compressão do betão, com confinamento, por exemplo.

3.9.2 PERDA DE AÇÃO POR PARTE DO COMPÓSITO

A imagem seguinte identifica as interfaces mais comuns onde poderá haver rutura do sistema compósito/betão, seguida de uma breve descrição de cada ocorrência:

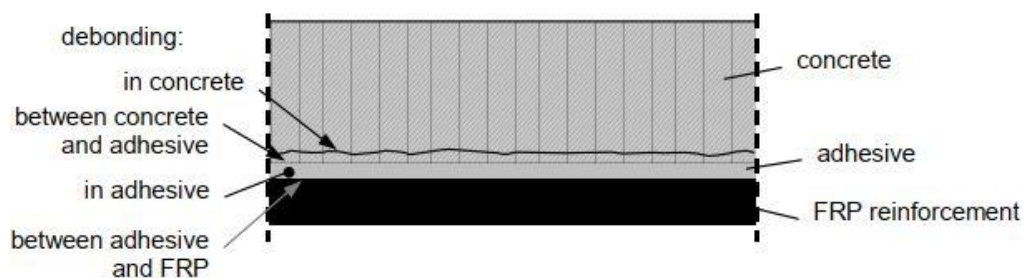


Figura 3.9.1 - Interfaces mais comuns de rutura (fib bulletin 14)

- Rutura do betão junta da superfície ou ao longo de uma camada mais fraca, como por exemplo, imediatamente abaixo das armaduras:
 - Este facto poderá ocorrer se as tensões no betão circundante às armaduras são mais elevadas, por exemplo devido a uma extensão muito elevada do aço ou pela dilatação do mesmo aquando altas temperaturas;
 - Na imagem seguinte estão apresentadas as duas formas mais comuns deste ponto:

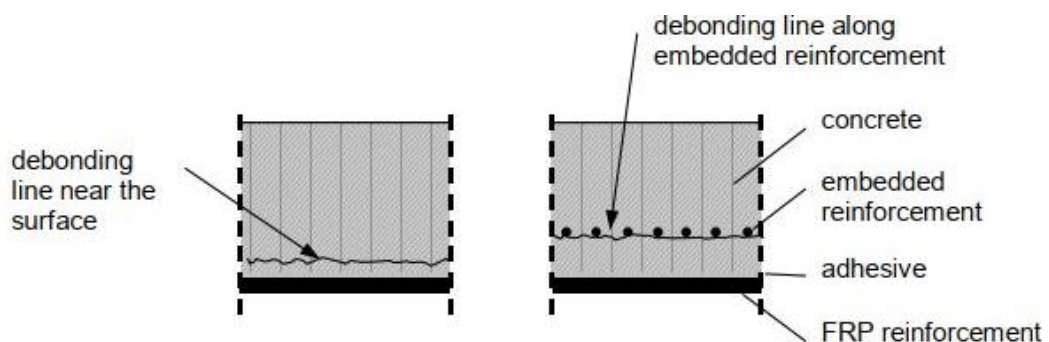


Figura 3.9.2 - Exemplos da rutura do betão junto à superfície e abaixo das armaduras (fib bulletin 14)

- Rutura pelo adesivo:
 - Este ponto ocorre apenas se a resistência ao corte e a resistência à tração da resina forem inferiores às do betão (são superiores por definição) devido ao efeito de altas temperaturas ou se o betão apresentar uma resistência bastante superior ao normal (betão de alta resistência);
 - Desta forma o que ocorre normalmente é a rutura no betão, implicando que ao ocorrer o destacamento do sistema compósito, haverá uma camada de espessura reduzida de betão colada ao sistema compósito;
 - De facto, a figura anterior é uma demonstração da rutura do betão, tendo em atenção que a espessura da camada de betão seria menor.

- Rutura do FRP:
 - Este ponto está relacionado com a rutura da ligação entre as fibras pela resina ou a rutura das fibras (incomum):
 - Poderá ocorrer, na grande maioria das vezes, se as fibras não apresentarem boa qualidade.
 - Relacionado a uma interação complexa de tensões no interior do compósito.

- Rutura na interface entre o betão e a resina ou entre a resina e o FRP:
 - Este tipo de rutura está associado ao insuficiente tratamento das superfícies durante a aplicação do sistema de reforço;
 - A capacidade resistente à coesão da resina epóxi, por exemplo, é menor que a sua resistência relacionada com a adesão.
 - Isto significa que a atração entre as moléculas da resina é inferior à atração das mesmas com as moléculas do FRP, do betão ou qualquer outro material.

4 Dimensionamento

4.1 CONSIDERAÇÕES

Os pontos adotados para o dimensionamento de reforços de CFRP são baseados nas normas utilizadas para as soluções de reforço mais comuns, como reforço com betão armado ou a utilização chapas metálicas coladas. Desta forma a informação disponível relacionada a este nicho específico é reduzida, tendo como recurso publicações, documentos e propostas de normas.

Em Portugal já existe alguma informação importante, no entanto, está bastante dispersa, quando comparado com documentos internacionais. Desta forma serão utilizadas algumas propostas internacionais que se considerem mais adequadas para os problemas em questão.

Para garantir o bom dimensionamento dos sistemas de reforço com compósitos CFRP, é necessário ter em consideração muitas das características que foram apresentadas nos pontos anteriores.

O objetivo principal é a apresentação de informação existente relacionada com o dimensionamento dos reforços para pilares ao confinamento e à flexão e de paredes e muros (extra) à flexão, de forma simples, bem estruturada e que permita melhorar a compreensão e facilitar o processo de dimensionamento, visto que alguma da informação disponível não é de fácil aplicação.

4.2 DOCUMENTAÇÃO

Os procedimentos para o correto dimensionamento de reforços com FRP está muito disperso e não apresenta informação que permita a sua utilização mais corrente. Desta forma têm sido desenvolvidos, ao longo do tempo, algumas considerações e orientações por parte de investigadores/as e organizações com o propósito de aumentar a informação existente sobre o tema.

À frente deste desenvolvimento destaca-se o Japão, que, na sua maioria, pretende utilizar estas técnicas para reforço sísmico, alguns países da europa, como a Itália, que tem um objetivo semelhante ao Japão, acrescentando a necessidade de reabilitar e preservar estruturas antigas. A América do Norte também está a fazer muitos estudos relacionados com o assunto.

Neste momento existem alguns documentos que podem ser utilizados para fazer um dimensionamento, como o Bulletin fib 14, que será utilizado para dimensionar os

reforços neste trabalho. Este documento foi produzido em julho de 2001 e é um documento que apresenta as mais variadas informações que foram obtidas ao longo do tempo.

Entre outros guias de cálculo, destacam-se os seguintes:

- CSTB Avis Technique 3/14-773 – França;
 - Derivado do boletim fib 14.
- CUR Aanbeveling 91 – Holanda;
- CNR-DT 200/2004 – Itália;
- SAI 166: 2004 – Suíça;
- DIBt Zulassung Z-36.12-62 /-67 – Alemanha;
- Concrete Society TR N° 55 – Inglaterra;
- ACI 440.2R-02 – Estados Unidos da América.

4.3 PROPOSTA DE DIMENSIONAMENTO

Os cálculos de dimensionamento baseiam-se no conceito de segurança parcial do Eurocódigo 2 e a contenção é dimensionada de acordo com o boletim fib 14 (Federação Internacional de betão, 2001) e com a análise de outros documentos. As combinações de cargas, o comportamento do aço e do betão e os coeficientes de segurança são obtidos do Eurocódigo 2.

Também vão ser analisadas formas de dimensionamento do documento ACI 440.2R-08, para dar a conhecer algumas das diferenças de cada um dos documentos.

O dimensionamento apresentado vai ser um homólogo dos processos efetuados no programa que será utilizado no caso de estudo. É de frisar que a informação presente está relacionada com a técnica de aplicação por colagem, para o caso dos laminados e das mantas (em ambos os códigos).

4.3.1 PILARES

No caso do reforço dos pilares é, na grande maioria das vezes, necessário aumentar a resistência à flexão e em alguns casos aumentar o confinamento do pilar, porque permite aumentar a capacidade resistente devido às tensões que se vão instalar, que impedem a deformação excessiva do mesmo. O impedimento da deformação transversal gera tensões que vão favorecer a resistência à compressão do pilar. No caso da flexão é muito importante devido aos efeitos relacionados com a flexão composta e a flexão desviada.

Também é muito utilizado o confinamento para reforço sísmico porque aumenta a ductilidade do pilar (análise mais complexa). A ductilidade aumenta devido à complexa interação entre as forças que são exercidas entre a matéria e ao facto de ser acrescentado um material dúctil ao sistema (nem sempre aumenta). No caso do laminados em certas ocasiões a ductilidade do sistema reforçado vai diminuir.

Os cálculos vão basear-se em alguns pressupostos:

- Pilares estão completamente encamisados com o CFRP sobre toda a sua altura;
- Todas as fibras do pilar comprimido sofrem a mesma deformação longitudinal;
- Pilares apresentam uma excentricidade mais baixa ($e \leq 2\text{cm}$);
- Não existem deslocamentos entre os reforços e o betão.

Nota:

O dimensionamento está definido tendo em conta apenas ações axiais (da mesma forma que é apresentado no programa de dimensionamento).

4.3.1.1 VERIFICAÇÃO

O primeiro processo tem como objetivo verificar se o pilar apresenta capacidade para resistir ao aumento de esforços.

Desta forma serão efetuados cálculos simples para verificar a resistência máxima do pilar $N_{Rd,0}$ e compara com o valor aplicado N_{Edf} , desta forma:

Se $N_{Rd,0} \leq N_{Edf}$, então é necessário efetuar um reforço do pilar.

Onde:

N_{Edf} é a força axial total incidente no pilar.

Nota: o modelo da fib Bulletin 14 não tem em consideração esforços transversos para o confinamento.

4.3.1.1.1 PILAR RECTANGULAR

A imagem seguinte representa a secção do pilar considerada:

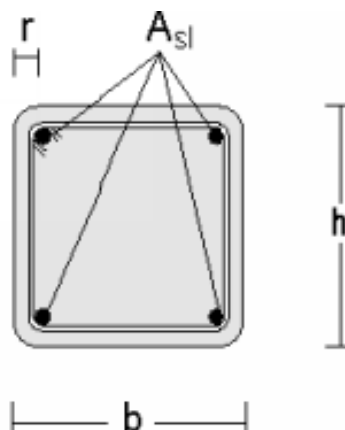


Figura 4.3.1 - Pormenor demonstrativo do pilar retangular (S&P Colonna)

Para pilares retangulares é necessário garantir que os cantos sejam boleados para diminuir a concentração de tensões nesses pontos, melhorando desta forma a sua eficácia. Se tal não for efetuado as tensões locais vão ser demasiado elevadas ao ponto de causar a rutura localizada dos tecidos ou mantas, neutralizando completamente o efeito pretendido do sistema. Uma outra razão é o facto da distribuição das tensões não ser uniforme, como seria num pilar com secção circular.

A fórmula utilizada para efetuar a verificação é:

$$N_{Rd,0} = A_c * \frac{f_{co}}{\gamma_c} + A_s * \frac{f_{so}}{\gamma_s} \quad (4)$$

Onde:

$$f_{co} = f_{ck} \quad ; \quad f_{so} = f_{yk} \quad (5)$$

$$A_c = [(\pi r^2 - 4r^2) + hb] - A_s \quad (6)$$

No caso dos pilares retangulares vão desenvolver-se zonas onde o betão não vai estar confinado, porque as forças vão distribuir-se das zonas boleadas para o interior, seguindo uma trajetória que forma parábolas, como mostra a secção seguinte:

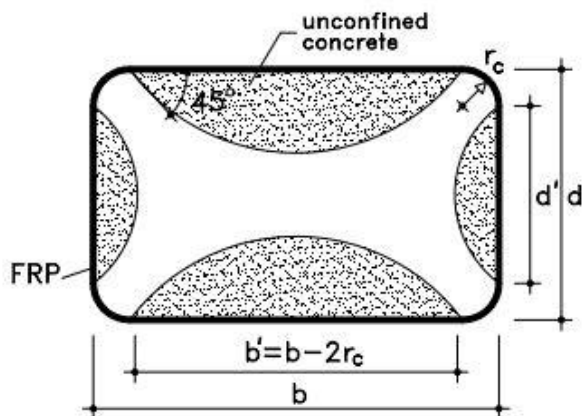


Figura 4.3.2 - Representação do confinamento em secções não circulares (fib bulletin 14)

Dessa forma é utilizado um coeficiente de eficácia do confinamento (k_e), que tem em conta as zonas não confinadas e que tem em conta a área das armaduras longitudinais.

Assim seria de esperar que o valor k_e seja igual a um para secções circulares e $0 < k_e \leq 1$ para secções retangulares.

A fórmula seguinte permite determinar k_e (tendo em consideração a figura anterior):

$$k_e = 1 - \frac{b'^2 + d'^2}{3 * A_g \left(1 - \frac{A_s}{A_g}\right)} \quad (7)$$

Onde:

$$d'^2 = d - 2 * r \quad (8)$$

$$A_g = A_c + A_s \quad (9)$$

É também importante saber qual a tensão que o reforço necessita de resistir, que é calculado com base na diferença entre o valor resistente $N_{Rd,0}$ e o valor aplicado N_{edf} , dividido pela área da secção do pilar, assim a tensão inicial requerida pode ser calculada da seguinte forma:

$$\sigma_i = \frac{N_{Edf} - N_{Rd,o}}{A_g - A_u} \quad (10)$$

Onde:

A_u representa a soma das diferentes parábolas, ou seja, representa a área total de betão não confinado:

$$A_u = \frac{b'^2 + d'^2}{3} \quad (11)$$

É necessário ter em consideração a diferença de áreas para servir como um fator de segurança que têm em conta as áreas não confinadas.

4.3.1.1.2 PILAR CIRCULAR

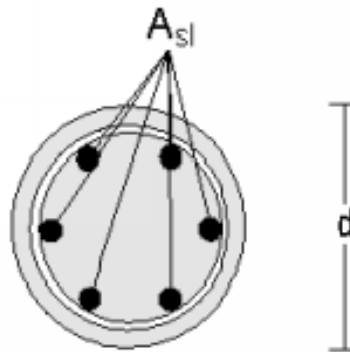


Figura 4.3.3 - Pormenor demonstrativo do pilar circular (S&P Colonna)

A verificação necessária será muito parecida, fazendo apenas uma mudança na determinação da área bruta de betão, assim:

$$N_{Rd,0} = A_c * \frac{f_{co}}{\gamma_c} + A_s * \frac{f_{so}}{\gamma_s} \quad (12)$$

Onde:

$$A_c = \pi r^2 - A_s \quad (13)$$

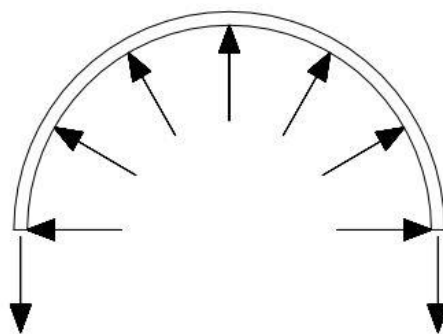


Figura 4.3.4 - Representação das tensões de confinamento laterais originadas pelo confinamento (fib bulletin 14)

Como se pode observar as tensões distribuem-se de forma uniforme devido à natureza circular da secção. Este facto permite uma maior eficácia do sistema de reforço. Para a obtenção do valor da tensão inicial aplicada é necessário dividir a força resultante da conta apresentada no ponto anterior pela área total, pela razão acima.

Assim:

$$\sigma_i = \frac{N_{Edf} - N_{Rd,o}}{A_g} \quad (14)$$

4.3.1.2 DIMENSIONAMENTO (CONFINADO EM TODA A SUA ALTURA) - [FIB 14.4]

Para efetuar o dimensionamento será utilizado um processo iterativo que tem por base o modelo de cálculo desenvolvido por Spoelstra e Monti. Existem dois modelos muito interessantes que necessitam de maior verificação experimental. O modelo de Samaan et al. (1998) que é considerado um modelo mais simples e prático (muito atrativo por ser um modelo de engenharia, mais prático) mas que depende muito da calibração experimental conduzida pelo autor. O segundo foi desenvolvido por Saafi et al. (1999) e, tal como o anterior, será necessário maior trabalho experimental para verificar a utilização segura em aplicações mais complexas.

O processo baseia-se num fluxograma apresentado no Bulletin 14.6, que será apresentado de seguida:

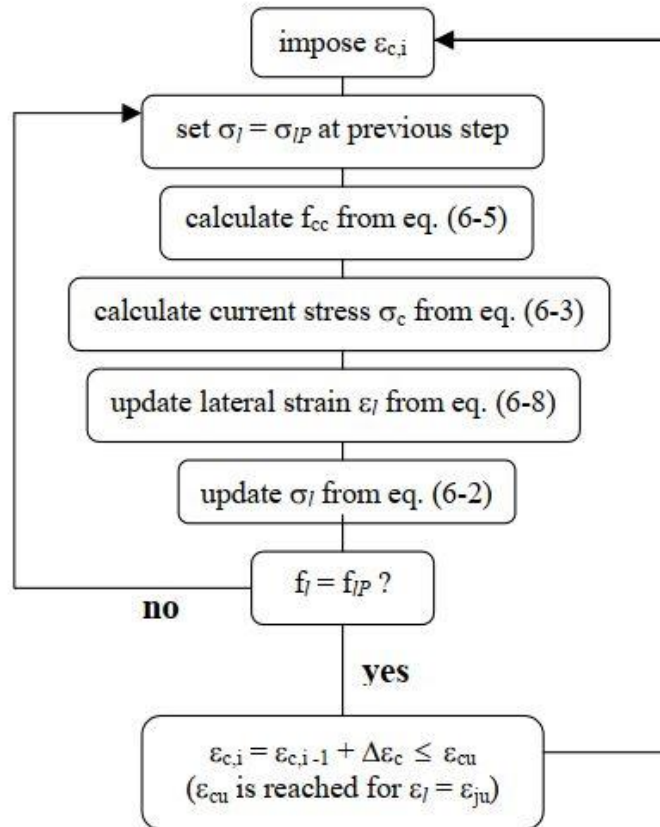


Figura 4.3.5 - Fluxograma do procedimento iterativo (fib bulletin 14)

4.3.1.2.1 PONTO 1 – IMPOSIÇÃO DE $\varepsilon_{c,i}$

O primeiro passo está relacionado com a imposição de um valor da extensão do betão ($\varepsilon_{c,i}$), necessário para calcular os restantes componentes do processo.

Exemplo:

$$\varepsilon_{c,i} = 1.0 \text{ ppm (partes por milhão)} \quad (15)$$

4.3.1.2.2 PONTO 2 – TENSÃO LATERAL (σ_l)

Neste ponto é necessário considerar uma tensão lateral σ_l para fazer o cálculo do valor da resistência máxima de confinamento f_{cc} . **No processo inicial** (primeira iteração) o valor da tensão lateral será importante apenas para diminuir o número de iterações, visto que vai acabar por convergir para o valor correto. Assim o **valor recomendado** será igual a **zero**.

O processo de cálculo da tensão será apresentado mais à frente quando for requerida uma nova iteração do valor.

4.3.1.2.3 PONTO 3 – RESISTÊNCIA MÁXIMA DE CONFINAMENTO (f_{cc})

4.3.1.2.3.1 CIRCULAR

$$f_{cc} = f_{co} \left(2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{\sigma_l}{f_{co}}} - 2 \frac{\sigma_l}{f_{co}} - 1.254 \right) \quad (16)$$

Onde:

$$f_{co} = f_{ck} \quad (17)$$

A imagem seguinte representa o diagrama tensão/extensão considerado nos cálculos:

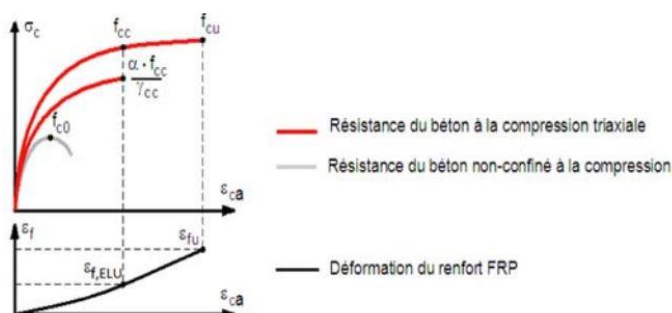


Figura 4.3.6 - Gráfico tensão/extensão (Avis Technique 3/14-773)

4.3.1.2.3.2 RETANGULAR

$$f_{cc} = f_{co} \left(2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{\sigma_l}{f_{co}}} - 2 \frac{\sigma_l}{f_{co}} - 1.254 \right) \left(1.4 \frac{h}{b} - 0.6 \left(\frac{h}{b} \right)^2 - 0.8 \sqrt{\frac{\sigma_l}{f_{co}}} + 1 \right) \quad (18)$$

Como se verifica, a fórmula acima tem em consideração a diferença entre a geometria circular e a retangular, permitindo um cálculo mais preciso do valor de f_{cc} .

4.3.1.2.4 PONTO 4 – CALCULAR O VALOR DA TENSÃO CORRENTE NO BETÃO (σ_c)

Este ponto permite determinar a tensão no betão. O modelo em estudo é baseado na fórmula que se segue:

$$\sigma_c = \frac{f_{cc} x^r}{r - 1 + x^r} \quad (19)$$

Onde:

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right) \right] \quad (20)$$

$$E_{sec} = \frac{f_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad (21)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (22)$$

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \quad (23)$$

O valor $\varepsilon_c = \varepsilon_{c,i}$ imposto inicialmente.

O valor da tensão no betão é muito importante porque vai permitir o cálculo da extensão lateral ε_l que, para secções circulares, será igual à extensão do compósito ε_j .

4.3.1.2.5 PONTO 5 – CALCULAR O VALOR DA EXTENSÃO LATERAL (ε_l)

Para ter em consideração a peculiaridade do comportamento do FRP, foram desenvolvidas duas equações que permitem calcular o valor de ε_l . As duas equações foram fundidas na equação apresentada de seguida:

$$\varepsilon_l = \frac{E_c \varepsilon_c - \sigma_c}{2\beta \sigma_c} \quad (24)$$

Onde:

$$\beta = \frac{5700}{\sqrt{|f_{co}|}} - 500 \quad (25)$$

A constante β é uma propriedade do betão.

4.3.1.2.6 PONTO 6 – CALCULAR A TENSÃO LATERAL CORRENTE (σ_l)

É necessário ter em atenção que, devido à geometria da secção, o valor do σ_l é calculado de forma diferente para pilares circulares e retangulares, assim:

4.3.1.2.6.1 CIRCULAR

Para os pilares circulares é mais simples devido à distribuição uniforme das tensões pela sua área, demonstrado na figura 4.3.3 do subcapítulo da verificação, a tensão lateral é calculada da seguinte forma:

$$\sigma_l = \frac{1}{2} \rho_j \sigma_j = \frac{1}{2} \rho_j E_{jd} \varepsilon_{j=l} \quad (26)$$

Onde:

$$\rho_j = 4 \frac{t_j}{d_j} \quad (27)$$

$$k_e = 1 \quad (28)$$

Devido ao facto de k_e ser igual a um em secções circulares, é suprimido da fórmula. É, no entanto, necessário ter sempre em atenção esse facto.

4.3.1.2.6.2 RETANGULAR

Para os pilares retangulares é necessário ter em consideração dois fatores fundamentais. O valor do k_e , que será calculado pela fórmula apresentada acima e a necessidade de verificação da tensão na direção x e y, visto que a secção não é igual nas duas direções. Dessa forma, para secções quadradas, não haverá necessidade de proceder ao processo em ambas as direções.

As tensões podem ser calculadas de seguinte forma:

$$\sigma_{l,x} = \rho_{jx} k_e E_j \varepsilon_{ju} \quad (29)$$

$$\sigma_{l,y} = \rho_{jy} k_e E_j \varepsilon_{ju} \quad (30)$$

Onde:

$$\rho_{jx} = 2 \frac{t_j}{d} \quad (31)$$

$$\rho_{jy} = 2 \frac{t_j}{b} \quad (32)$$

4.3.1.2.7 PONTO 7 – VERIFICAÇÃO DOS VALORES

Quando for realizado o cálculo da tensão lateral, o valor obtido não será o real, pelo que é necessário realizar uma nova iteração. Desta forma o novo valor da tensão será substituído pelo valor considerado inicialmente, no caso foi a tensão inicial (σ_i), fazendo-se os cálculos na mesma sequência exemplificada acima, até o valor σ_i convergir para o real (tornar-se constante).

Quando tal acontecer o valor $\varepsilon_{c,i}$ será substituído, utilizando a seguinte fórmula:

$$\varepsilon_{c,i} = \varepsilon_{c,i-1} + \Delta \varepsilon_{c,i} \leq \varepsilon_{cu} \quad (33)$$

Onde:

O valor ε_{cu} é alcançado quando $\varepsilon_l = \varepsilon_{ju}$.

O valor ε_{ju} é a extensão máxima do FRP.

~

4.3.1.3 DIMENSIONAMENTO CONSIDERANDO OS MOMENTOS FLECTORES - [FIB 14.4]

Para resolução deste ponto será necessário aplicar o procedimento de dimensionamento descrito na **secção 4.3.2** (o processo é igual, considerando os pontos abaixo).

Na prática o pilar será considerado como uma viga na vertical e, dessa forma, poderá ser efetuado o dimensionamento descrito nessa secção considerando as todas as informações com se uma viga se tratasse.

No caso do confinamento serão utilizadas mantas ou tecidos e no caso da flexão serão utilizados os laminados porque apresentam uma maior eficiência para este tipo de reforço.

4.3.1.4 DIMENSIONAMENTO - [ACI 440.2R-08] – ESFORÇO AXIAL – CONFINAMENTO

O documento do instituto americano do betão apresenta uma forma de dimensionamento um pouco mais simplificada, o que torna interessante a sua divulgação.

4.3.1.4.1 PONTO 1 – COMPUTAR AS PROPRIEDADES DO FRP

Este ponto é importante porque vai permitir estimar duas propriedades importantes no instante antes da rutura: a extensão de rutura (ε_{fu}) e a resistência à tração última (f_{fu}). Estes valores são multiplicados por um coeficiente que tem em consideração o local onde o pilar está inserido e a agressividade do ambiente.

As propriedades apresentadas podem ser calculadas segundo a seguinte formulação:

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (34)$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* \quad (35)$$

Onde:

C_E – É um coeficiente de redução ambiental que tem em conta a localização, a agressividade ambiental e o tipo de fibra.

Os valores com (*) representam as informações que são fornecidas pelos fabricantes do FRP.

Exposure conditions	Fiber type	Environmental reduction factor C_E
Interior exposure	Carbon	0.95
	Glass	0.75
	Aramid	0.85
Exterior exposure (bridges, piers, and unenclosed parking garages)	Carbon	0.85
	Glass	0.65
	Aramid	0.75
Aggressive environment (chemical plants and wastewater treatment plants)	Carbon	0.85
	Glass	0.50
	Aramid	0.70

Tabela 12 - Coeficiente de Redução Ambiental (ACI 440.2R-08)

4.3.1.4.2 PONTO 2 – DETERMINAR A RESISTÊNCIA MÁXIMA DE CONFINAMENTO DO BETÃO

O valor f'_{cc} representa o valor resistente máximo obtido quando o betão estiver confinado. É possível calcular o valor utilizando a seguinte fórmula:

$$f'_{cc} = \frac{1}{0.85(A_g - A_{st})} \left(\frac{\phi P_{n.req}}{0.80\phi} - f_y A_{st} \right) \quad (36)$$

Onde:

Os valores A_g e A_{st} são respetivamente a área total da secção e a área de aço.

O valor $\phi P_{n.req}$ representa o valor do esforço axial total após a intervenção, que pilar terá de resistir.

O valor f_y representa o f_{yk} apresentado no Eurocódigo 2.

O valor ϕ é um fator de redução da resistência, que visa ter em consideração a perda de ductilidade originada pelos compósitos inseridos na peça. O valor pode ser igual a 0.90 para secções dúcteis ou 0.65 para secções frágeis. É considerada uma secção dúctil se o aço, no momento de rutura do betão, é $\varepsilon_t \geq 0.005$.

4.3.1.4.3 PONTO 3 – DETERMINAR A PRESSÃO MÁXIMA DE CONFINAMENTO

A pressão de confinamento é a força distribuída pela área útil da secção que o a peça vai “sofrer” devido à ação do compósito. A figura 4.3.3 representa bem o conceito, tendo em conta a 3ª Lei de Newton.

Para calcular o valor da pressão é utilizada a seguinte fórmula:

$$f_l = \frac{f'_{cc} - f'_c}{3.3k_a} \quad (37)$$

Onde:

$$k_a = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{b}{h} \right)^2, \text{ para secções circulares o valor } k_a = 1.0 \quad (38)$$

$$\frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - \frac{\left[\left(\frac{b}{h} \right) (h - 2r_c)^2 + \left(\frac{h}{b} \right) (b - 2r_c)^2 \right]}{3A_g} - \rho_g}{1 - \rho_g} \quad (39)$$

$$\rho_g = \frac{A_s}{bh}, \text{ onde } A_s = A_{st} \quad (40)$$

r_c – Representa o raio do boleamento efetuado nos cantos (necessário para evitar tensões muito elevadas nessas zonas, podendo levar ao colapso da estrutura das mantas e tecidos)

f'_c – Representa a resistência do betão igual a f_{ck} apresentado no Eurocódigo 2

4.3.1.4.4 PONTO 4 – DETERMINAR O NÚMERO DE CAMADAS

Para calcular o número de camadas necessárias utiliza-se a seguinte fórmula:

$$n = \frac{f_l \sqrt{b^2 + h^2}}{2\psi_f E_f t_f \varepsilon_{fe}} \quad (41)$$

Onde:

$$\varepsilon_{fe} = k_\varepsilon \varepsilon_{fu} \quad (42)$$

Se o valor não for fornecido, poderá ser calculado utilizando a seguinte fórmula:

$$E_f = \frac{f_{fu}}{\varepsilon_{fu}} \quad (43)$$

O valor k_ε é um fator de eficiência que tem em consideração a falha prematura do FRP. Durante anos de estudo foram obtidos alguns valores como 0.57 (Lam and Teng, 2003), 0.58 (Harries and Carey, 2003), no entanto o documento [ACI 440.2R-08] recomenda o valor 0.55.

O componente ψ_f é obtido pela análise da tabela seguinte:

$\psi_f = 0.95$	Completely wrapped members
$\psi_f = 0.85$	Three-side and two-opposite-sides schemes

Tabela 13 - Factor de redução adicional recomendado que tem em conta o reforço a esforço transversal (ACI 440.2R-08)

O t_f é a espessura do tecido do compósito.

É necessário fazer uma pequena verificação do rácio mínimo de confinamento (se não verificar o valor f_l terá de ser recalculado), assim:

$$\frac{f_l}{f'_c} \geq 0.08 \quad (44)$$

4.3.1.4.5 PONTO 5 – VERIFICAÇÃO DA EXTENSÃO AXIAL ÚLTIMA DO BETÃO CONFINADO

Para calcular o valor da extensão última do betão (ε_{ccu}) utiliza-se a seguinte fórmula:

$$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon'_c \left(1.5 + 12k_b \frac{f_l}{f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon'_c} \right)^{0.45} \right) \quad (45)$$

Onde:

$$k_b = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{h}{b} \right)^2 \quad (46)$$

$$\varepsilon'_c = 1.7 \frac{f'_c}{E_c}, \text{ poderá ser considerado igual a } 0.002 \quad (47)$$

Se $\varepsilon_{ccu} > 0.01$, o valor f'_{cc} terá de ser recalculado.

4.3.1.5 DIMENSIONAMENTO - [ACI 440.2R-08] – ESFORÇO TRANSVERSO

Este ponto permite melhorar a resistência ao esforço tansverso do pilar de forma semelhante ao dimensionamento anterior.

4.3.1.5.1 PONTO 1 – VERIFICAÇÃO DA NECESSIDADE DE REFORÇO

Inicialmente é necessário averiguar se é necessário o reforço da secção. Desta forma serão utilizadas duas fórmulas do Eurocódigo 2 para efetuar essa verificação, assim:

$$V_{Rd} = V_{Rd,s} + V_{ccd} + V_{td} \quad (48)$$

$$V_{Rd} \geq V_{Ed} \quad (49)$$

Onde:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{ywd} \cot \theta \quad (50)$$

$$f_{ywd} = 0.8 f_{ywk} \quad (51)$$

$$\theta = 45^\circ \quad (52)$$

$$z = 0.9d = 0.9 * (h - r - \phi_{trans.} - \frac{1}{2} \phi_{long.}) \quad (53)$$

$$\begin{aligned} V_{ccd} &= V_{td} \\ &= 0 \text{ [valores adicionais para elementos de altura variável]} \end{aligned} \quad (54)$$

Para verificar qual será o valor a resistir basta subtrair o valor aplicado após a intervenção com o valor resistente.

4.3.1.5.2 PONTO 2 – COMPUTAR AS PROPRIEDADES DO FRP

Este ponto será obtido da mesma forma o ponto 1 do processo anterior tendo em consideração as fórmulas e a tabela apresentada. Assim a formulação será:

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (55)$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* \quad (56)$$

Onde:

C_E – É um coeficiente de redução ambiental que tem em conta a localização, a agressividade ambiental e o tipo de fibra.

Os valores com (*) representam as informações que são fornecidas pelos fabricantes do FRP.

Exposure conditions	Fiber type	Environmental reduction factor C_E
Interior exposure	Carbon	0.95
	Glass	0.75
	Aramid	0.85
Exterior exposure (bridges, piers, and unenclosed parking garages)	Carbon	0.85
	Glass	0.65
	Aramid	0.75
Aggressive environment (chemical plants and wastewater treatment plants)	Carbon	0.85
	Glass	0.50
	Aramid	0.70

Tabela 14 - Coeficiente de Redução Ambiental (ACI 440.2R-08)

4.3.1.5.3 PONTO 3 – CALCULAR O VALOR EFETIVO DA EXTENSÃO AO NÍVEL DO FRP PARA REFORÇO A ESFORÇO TRANSVERSO

Para pilares completamente envolvidos por FRP o valor da extensão para dimensionamento deverá ser limitado a 0,4% se:

$$\varepsilon_{fe} = 0.004 \leq 0.75\varepsilon_{fu} \quad (57)$$

Se a inequação acima não é verdadeira, poderá ser utilizada a fórmula do processo acima:

$$\varepsilon_{fe} = k_{\varepsilon}\varepsilon_{fu} \quad (58)$$

4.3.1.5.4 PONTO 4 – DETERMINAR A ÁREA DE FRP REQUERIDA

Inicialmente para calcular a área é necessário majorar o esforço transversal, servindo para garantir uma maior segurança, assim:

$$V_{f,reqd} = \frac{\Delta V_u}{\phi(\psi_f)} \quad (59)$$

Onde:

$$\Delta V_u = V_{final} - V_{Rd} \quad (60)$$

O valor a utilizar para secção completamente embrulhada será:

$$\psi_f = 0.95 \quad (61)$$

O valor ϕ recomendado pelo ACI para uma secção totalmente embrulhada será:

$$\phi = 0.85 \quad (62)$$

Tendo em consideração o valor majorado do esforço transversal, será possível calcular a área de FRP em função de um espaçamento, assim:

$$A_{fv,reqd} = \frac{V_{f,reqd}s_f}{\varepsilon_{fe}E_f(\sin \alpha + \cos \alpha)d_f} = \dots (s_f) \quad (63)$$

Onde:

$$\alpha = 90^\circ - \text{ângulo da manta} \quad (64)$$

$$d_f = \min(h; b) - \text{garantir segurança} \quad (65)$$

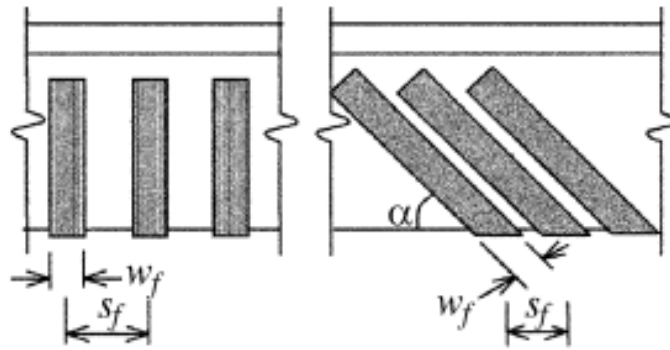


Figura 4.3.7 - Representação dos valores s_f e α (ACI 440.2R-08)

A figura anterior demonstra o espaçamento entre as faixas (s_f), o ângulo (semelhante ao que ocorre com as armaduras transversais, α) e a largura do tecido (w_f).

4.3.1.5.5 PONTO 5 – DETERMINAR O NÚMERO DE CAMADAS

O número de camadas pode ser calculado utilizando a seguinte fórmula:

$$n = \frac{A_{fv, reqd}}{2t_f w_f} = \dots \left(\frac{s_f}{w_f} \right) \quad (66)$$

O valor é dependente dos vários componentes da figura anterior, isto se for utilizado o sistema por faixas espaçadas. Para o caso de ser aplicado em toda a altura do pilar, então:

$$s_f = w_f \quad (67)$$

4.3.2 MUROS E PAREDES

Para realizar o reforço das paredes e muros (este método pode ser utilizado para reforçar qualquer elemento à flexão, necessitando apenas de pequenas considerações) é necessário ter em consideração a flexão como principal fator porque o sistema funciona de forma semelhante a uma laje, com as cargas constantes a provocar o efeito de flexão. Desta forma serão apresentados métodos para dimensionar o reforço para flexão utilizados para vigas.

O dimensionamento será semelhante às lajes de betão armado, considerando que os cálculos serão por metro de parede. É necessário considerar o sistema desta forma porque não existe informação suficiente que permita analisar especificamente este tipo de elementos.

O dimensionamento será realizado segundo a seguinte secção:

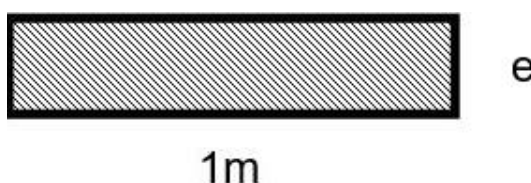


Figura 4.3.8 - Secção da parede

O procedimento de cálculo será baseado em um procedimento de dimensionamento proposto pelo documento fib Bulletin 14.4.

4.3.2.1 DIMENSIONAMENTO

4.3.2.1.1 ESTADO INICIAL

Antes de se proceder ao estudo da situação confinada é necessário ter em consideração os esforços existentes antes do reforço. Um dos pontos importantes é o momento resistente da peça, que pode ser calculado através de um binário de forças.

Também é importante avaliar o estado inicial do sistema porque os efeitos presentes antes de qualquer ação são essenciais para o bom dimensionamento do reforço. Como o momento de serviço (M_o) é, normalmente, maior que o momento de fendilhação (M_{cr}), o cálculo será baseado na secção fendilhada.

O estado inicial está representado na figura seguinte:

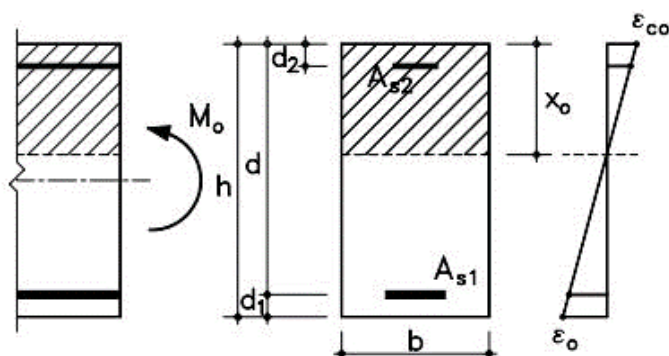


Figura 4.3.9 - Estado Inicial (fib bulletin 14)

Inicialmente é importante saber qual será o valor x_o (posição do eixo neutro) para determinar o momento de inércia da secção fendilhada, tal como a extensão das fibras superiores (ϵ_{co}) e a extensão das fibras inferiores (ϵ_o).

$$\frac{1}{2} b x_o^2 + (\alpha_s - 1) A_{s2} (x_o - d_2) = \alpha_s A_{s1} (d - x_o) \quad (68)$$

$$x_o = \frac{-[\alpha_s (A_{s1} + A_{s2}) - A_{s2}] + \sqrt{[\alpha_s (A_{s1} + A_{s2}) - A_{s2}]^2 - 2 * b * [A_{s2} d_2 - (\alpha_s (A_{s1} * d + A_{s2} * d_2))]} }{b} \quad (69)$$

Onde:

$$\alpha_s = \frac{E_s}{E_c} \quad (70)$$

$$d = (h - r - \phi_{trans.} - \frac{1}{2} \phi_{long.}) \quad (71)$$

$$d_2 = \left(r + \phi_{trans.} + \frac{1}{2} \phi_{long.} \right) \quad (72)$$

Para o cálculo do M_{rd} faz-se o seguinte processo, tendo em conta um diagrama de tensões retangular, ou seja:

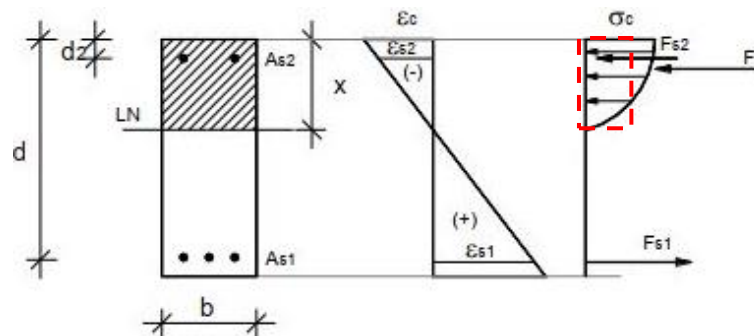


Figura 4.3.10 - Diagrama de Tensões (Estruturas de Betão I - Técnico de Lisboa)

O quadrado a tracejado tem uma altura igual a $0.8x_o$, onde a força f_c está a $0.4x_o$ e a largura será considerada como $0.85x_o$. Analisando a figura:

$$M_{rd,o} = A_{s1}f_{yd}(d - 0.4x_o) + A_{s2}f_{yd}(0.4x_o - d_2) \quad (73)$$

Se o valor do $M_{rd,o} > M_{Ed,f}$ (momento após a intervenção), então não haverá necessidade de intervenção.

Se o valor do $M_{rd,o} < M_{Ed,f}$, então será necessário continuar com o processo.

Nota:

O valor do $M_{Ed,f}$ será obtido analisando o diagrama de momentos da estrutura tendo em conta os esforços extra impostos na mesma.

A extensão ϵ_{co} pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$\epsilon_{co} = \frac{M_o x_o}{E_c I_{co}} \quad (74)$$

Onde:

M_o será o valor máximo do diagrama de momentos no estado limite último (M_{Ed}) que está inicialmente na estrutura antes da intervenção.

Também será necessário saber o momento máximo para situações no estado limite de serviço (M_{Ekf}).

O momento de inércia da secção fendilhada pode ser calculado de seguinte forma:

$$I_{co} = \frac{bx_o^3}{3} + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_o - d_2)^2 + \alpha_s A_{s1}(d - x_o)^2 \quad (75)$$

A extensão ϵ_o é calculado segundo a fórmula seguinte:

$$\epsilon_o = \epsilon_{co} \frac{h - x_o}{x_o} \quad (76)$$

A extensão apresentada acima é igual à extensão axial ao nível do FRP.

4.3.2.1.2 DETERMINAÇÃO DA ÁREA NECESSÁRIA (ESTADO LIMITE ÚLTIMO)

Para resolver este ponto é necessário ter em consideração um aspeto importante:

- O valor da extensão das fibras superior no betão (ϵ_c) será igual ao valor máximo considerado para a extensão (ϵ_{cu}), assim:

$$\epsilon_c = \epsilon_{cu} = 3.5 \text{ ‰} = \frac{3.5}{1000} \quad (77)$$

Este valor será considerado porque representa a máxima extensão do betão, apresentada no diagrama seguinte:

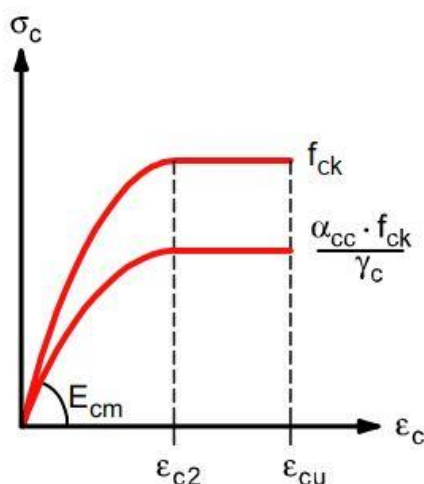


Figura 4.3.11 - Diagrama tensão extensão do betão (Manual do FRP Lamella)

É necessário ter em consideração o rácio de reforço entre o momento final a considerar e o momento resistente para ter uma noção da necessidade de reforço:

$$\eta_M = \frac{M_{Ed}}{M_{Rd,0}} \quad (78)$$

Para o próximo passo é necessário realizar um sistema de equações tendo em conta o valor do momento final $M_{Ed,f}$ (após a intervenção), para obter a área mínima necessária e o eixo neutro da peça.

Os próximos processos vão ser analisados tendo em consideração as informações apresentadas na seção abaixo.

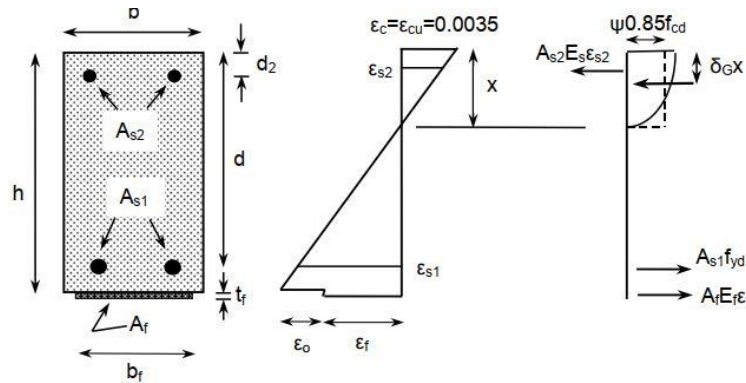


Figura 4.3.12 - Análise da secção no estado limite último com os respetivos diagramas de extensões e tensões (fib 14.4)

O sistema de equações é composto pelas seguintes expressões:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0.85\psi f_{cd}bx + A_{s2}E_s\varepsilon_{s2} = A_{s1}f_{yd} + A_fE_f\varepsilon_f \\ M_{Rd} = A_{s1}f_{yd}(d - \delta_Gx) + A_fE_f\varepsilon_f(h - \delta_Gx) + A_{s2}E_s\varepsilon_{s2}(\delta_Gx - d_2) \end{array} \right. \quad (79)$$

$$(80)$$

Onde $\Psi = 0.8$, $\delta_G = 0.4$, $M_{Rd} = M_{Ed,f}$ e:

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu} \frac{d - x}{x} \geq \frac{f_{yd}}{E_s} \quad (81)$$

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu} \frac{x - d_2}{x}, \text{ se } E_s \varepsilon_{s2} \leq f_{yd} \quad (82)$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \frac{h - x}{x} - \varepsilon_o \leq \varepsilon_{fud} \quad (83)$$

Através da resolução do sistema das equações (processo numérico) é possível obter o valor x (eixo neutro) e $A_{f,req}$ (área de FRP necessária para o momento imposto).

4.3.2.1.3 ESCOLHER A ÁREA FRP

Tendo em conta o valor $A_{f,req}$ obtido no ponto anterior, é possível escolher o tipo de laminados, número de laminados e a seção transversal do FRP.

- Como exemplo:
 - Imaginando que o valor $A_{f,req} = 160 \text{ mm}^2$;
 - Temos **um** laminado do tipo **CFK 150/2000 ($n_f = 1$) [No máximo dois sobrepostos]**;
 - Um conjunto de laminados (**$m_f = 2$) [Um ao lado do outro]**
 - Com uma seção transversal:
 - $b_f = 80 \text{ mm}$ (largura);
 - $t_f = 1.2 \text{ mm}$ (espessura).
 - Desta forma:

$$A_{f,escolhido} = (80 * 1.2) * 1 * 2 = 192 \text{ mm}^2 \quad (84)$$

$$A_{f,escolhido} = 192 \text{ mm}^2 > A_{f,req} = 160 \text{ mm}^2 \quad (85)$$

4.3.2.2 VERIFICAÇÕES

Para cada verificação, se o resultado não for satisfatório terá de ser efetuada uma nova escolha de FRP (repetição do subponto anterior) de forma a que todas as verificações cumpram os requisitos.

Dada a natureza dos muros não será avaliado o esforço transversal, dado que o principal fator de rutura é a flexão.

4.3.2.2.1 LIMITAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES

O reforço CFRP apresenta uma grande capacidade resistente, ou seja, melhora significativamente o comportamento das estruturas, não havendo necessidade de aplicação de uma grande percentagem de FRP.

Sabendo que os módulos de elasticidade destes compósitos são relativamente pequenos, o que resulta na incapacidade de limitar curvaturas e deformações da estrutura quando sujeita aos esforços extra, ou seja, a quantidade de reforço que satisfaz os estados limites últimos pode não satisfazer as condições relacionadas com os estados limites de utilização.

O método de avaliação das deformações tem sido bastante utilizado porque apresenta resultados interessantes, em particular para as vigas reforçadas com FRP, denominado método bi-linear.

O método bi-linear é analisado da seguinte forma:

$$a = a_1(1 - \zeta_b) + a_2\zeta_b \quad (86)$$

Onde:

$$\zeta_b = 0, \text{ se } M_k < M_{cr} \quad (87)$$

$$\zeta_b = 1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{M_{cr}}{M_k} \right)^{\frac{n}{2}} \text{ se } M_k > M_{cr} \quad (88)$$

$$\beta_1 = 0.5 \text{ ou } 1 \text{ (aço não deformado e deformado, respetivamente)} \quad (89)$$

$$\beta_2 = 0.5 \text{ e } 1 \text{ (carregamento de longo prazo ou curto prazo, respetivamente)} \quad (90)$$

Os fatores β_1 e β_2 são coeficientes que têm em conta as propriedades de aderência das armaduras e o tipo de carga atuante, respetivamente. O valor ξ_b contabiliza o efeito de tension-stiffening na secção.

$$M_{cr} \approx f_{ctm} \frac{bh^2}{6} \quad (91)$$

$$M_k = \text{momento actuante de serviço} \quad (92)$$

O valor a_1 e a_2 representam a deformação no estado não fendilhado e do estado completamente fendilhado, respetivamente. Estes valores podem ser calculados através da análise elástica, utilizando o momento M_o , antes do carregamento, assim:

$$a_1 = k_M l^2 \frac{M_k}{E_c I_1} \quad (93)$$

$$a_2 = k_M l^2 \left(\frac{M_o}{E_c I_{o2}} + \frac{M_k - M_o}{E_c I_2} \right), \text{ se } M_k > M_o \quad (94)$$

Onde:

$$k_M = \frac{1}{12} \text{ (vigas apoiadas sujeitas a cargas concentradas a meio vão)} \quad (95)$$

$$k_M = \frac{40}{384} \text{ (vigas apoiadas sujeitas a cargas uniformemente distribuídas)} \quad (96)$$

O I_{o2} é o momento de inércia do estado fendilhado antes do reforço, o l é o comprimento da viga, o I_1 é o momento de inércia da secção não fendilhada antes do reforço e o I_2 é o momento de inércia da secção fendilhada após o reforço.

4.3.2.2.2 LIMITAÇÃO DAS TENSÕES

Nas condições de serviço é requerido que sejam estudadas as tensões limite no betão, aço e FRP, para prevenir danos nos materiais, como, problemas relacionados com a fluência, cedência das armaduras bem como prevenir fendilhação excessiva. Para tal é tomado em consideração as recomendações presentes no Eurocódigo 2, assim:

$$\sigma_c \leq 0.60 f_{ck}, \text{ para combinações de ações raras} \quad (97)$$

$$\sigma_c \leq 0.45 f_{ck}, \text{ para combinações de ações quase – permanentes} \quad (98)$$

Onde:

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c \quad (99)$$

A tensão no aço deve ser limitada para combinação rara de ações:

$$\sigma_s = E_s \cdot \varepsilon_c \cdot \frac{d - x}{x} \leq 0.8 f_{yk} \quad (100)$$

Quando a tensão no aço é imposta por uma deformação, a tensão deverá estar limitada:

$$\sigma_s \leq f_{yk} \quad (101)$$

De forma semelhante, para combinações quase-permanente de ações, é proposto uma limitação da tensão para o FRP para evitar rutura, tendo em consideração um coeficiente de limitação η , que varia com o tipo de FRP utilizado, assim:

$$\sigma_f = E_f \left(\varepsilon_c \frac{h - x}{x} - \varepsilon_0 \right) \leq \eta f_{fk} \quad (102)$$

Onde:

O valor η deve ser obtido por experimentação e, segundo alguns testes (e.g. Yamaguchi et al. 1998), os valores sugeridos são:

$$\eta = 0.8 \text{ (CFRP)} \quad (103)$$

$$\eta = 0.5 \text{ (AFRP)} \quad (104)$$

$$\eta = 0.3 \text{ (GFRP)} \quad (105)$$

Como resultado das limitações do aço, e tendo em consideração a compatibilidade de tensões, a tensão limite para o FRP em condições de ações raras é:

$$\sigma_f \leq 0.8 f_{yk} \frac{E_f}{E_s} \quad (106)$$

Para o caso de tensões causadas por deformações impostas:

$$\sigma_f \leq f_{yk} \frac{E_f}{E_s} \quad (107)$$

4.3.2.2.3 LIMITAÇÃO DA ABERTURA DE FENDAS

Este ponto é muito importante para proteger o aço interno e garantir a funcionalidade da peça (potencialização da corrosão das armaduras), ou seja, tem de ser limitar a largura das fendas.

Para vigas reforçadas com EBR, as novas fendas vão aparecer entre as fendas existente, aumentando a densidade de fendas com larguras menores, não havendo necessidade de verificação das larguras das fendas. Assumindo, no entanto, que o fendilhamento estabilizou, a largura das fendas pode ser calculada através da seguinte expressão do Eurocódigo 2:

$$w_k = \beta s_{rm} \varepsilon_{rm,r} = \beta s_{rm} \zeta \varepsilon_2 \quad (108)$$

Onde:

- $\beta = 1.7$ - Representa um coeficiente de correlação entre o valor médio e o valor característico da abertura da fenda.

O s_{rm} representa o valor médio do espaço (distancia) entre fendas, $\varepsilon_{rm,r}$ é o valor médio da extensão ao nível das armaduras longitudinais, ζ é a tension-stiffening, que é calculada de forma semelhante ao demonstrado anteriormente, assim:

$$\zeta = 0, \text{ se } M_k < M_{cr} \quad (109)$$

$$\zeta = 1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{M_{cr}}{M_k} \right)^n \text{ se } M_k < M_{cr} \quad (110)$$

O valor ε_2 representa a extensão das armaduras longitudinais no estado de fendilhação, assim:

$$\varepsilon_2 = \frac{N_{rk} + E_f A_f \varepsilon_o}{E_s A_s + E_f A_f} \quad (111)$$

Onde:

$$\varepsilon_2 \approx \varepsilon_{s1} \approx \varepsilon_f + \varepsilon_o \quad (112)$$

$$N_{rk} = N_{s1} + N_f \quad (113)$$

O valor médio do espaçamento entre fendas (s_{rm}), tendo em conta o efeito do reforço interno e externo, pode ser calculado utilizando a seguinte fórmula (Rostásy et al. 1996):

$$S_{rm} = \frac{2f_{ctm} A_{c,eff}}{\tau_{sm} u_s} \frac{E_s A_s}{E_s A_s + \xi_b E_f A_f} = \frac{2f_{ctm} A_{a,eff}}{\tau_{fm} u_f} \frac{\xi_b E_f A_f}{E_s A_s + \xi_b E_f A_f} \quad (114)$$

Onde:

O valor $A_{c,eff}$ representa a área efetiva de tração na secção e, segundo o Eurocódigo 2, pode ser calculado da seguinte fórmula:

$$A_{c,eff} = \text{mínimo} \left[2.5(h - d)b; \frac{b(h - x)}{3} \right] \quad (115)$$

$$\tau_{sm} = 1,8f_{ctm} - \text{valor médio da tensão de aderência das armaduras} \quad (116)$$

$$\tau_{fm} = 1,25f_{ctm} - \text{valor médio da tensão de aderência do laminado} \quad (117)$$

$$\xi_b = \frac{\tau_{fm} E_s A_s u_f}{\tau_{sm} E_f A_f u_s} = \frac{\tau_{fm} E_s d_s}{\tau_{sm} E_f 4t_f} \quad (118)$$

u_s e u_f – Representam o perímetro de aderência das armaduras e do laminado, respetivamente

4.3.2.2.4 LIMITAÇÃO DA FENDILHAÇÃO NAS INTERFACES

As concentrações de tensões estão localizadas especialmente na extremidade do FRP e na localização das fendas existentes. No estado de serviço, o aparecimento de

fendas na interface de ligação FRP/suporte deve ser evitado, porque vai reduzir a integridade do reforço a longo prazo na zona de ancoragem sob. Carregamento cíclico e sobre a ação congelar/descongelar da água.

Para fazer a verificação (combinação quase-permanente) é necessário analisar a tensão máxima de corte τ_{f1} na extremidade do FRP, fazendo uma análise linear elástica, assim:

$$\tau_{f1} = \left[V_{x=0} + \left(\frac{G_a}{E_f t_f t_a} \right)^{\frac{1}{2}} M_{x=0} \right] \frac{t_f (h - x)}{I_c} \quad (119)$$

Onde:

$$\tau_{f1} < f_{ctk} \text{ (resistência de tração característica do betão)} \quad (120)$$

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

4.3.2.2.5 DUCTILIDADE

Devido à natureza dos compósitos, é importante perceber a influência da possível perda de ductilidade aquando aplicação dos mesmos, para evitar ruturas frágeis em elementos reforçados à flexão. O método analisa as limitações de curvatura presentes no Eurocódigo 2, tendo em conta a presença dos compósitos. Desta forma, aquando rutura, devem ser verificadas as seguintes condições:

$$\varepsilon_{su,c} \geq 0,0043 - \varepsilon_0 \text{ (betões de classe igual ou inferior a C35/45)} \quad (121)$$

$$\varepsilon_{su,c} \geq 0,0065 - \varepsilon_0 \text{ (betões de classe superior a C35/45)} \quad (122)$$

Onde:

O $\varepsilon_{su,c}$ representa a extensão do FRP na secção crítica no instante de colapso.

4.3.2.2.6 VERIFICAÇÃO DA ADESÃO DO FRP

O documento Avis Technique 3/14-773 propõe uma pequena série de equações que permitem o cálculo da força de rutura da adesão dos laminados e tecidos e permitem determinar o comprimento de ancoragem máximo.

Assim a força de rutura de aderência máxima pode ser determinada tendo em conta as propriedades dos materiais FRP e a resistência da superfície do suporte (ensaio pull-off), assim:

$$F_{bd,max} = 0.225m_f b_f \sqrt{E_{fk} n_f t_f \sqrt{f_{csd} f_{cd,cube}}} \quad (123)$$

Onde:

O valor m_f representa o número de tiras de FRP (número de tiras ao lado umas das outras), o b_f representa a largura do FRP, n_f é o número de camadas e o t_f é a espessura das camadas.

$$f_{csd} = \frac{f_{csm}}{\gamma_c} [MPa] \quad (124)$$

$$f_{cd,cube} = \frac{f_{ck,cube}}{\gamma_c} [MPa] \quad (125)$$

O valor f_{csm} é determinado por ensaios de aderência para tração direta. Os valores mínimos são:

$$f_{csm} = 1.5 [MPa] - \text{Tecidos} \quad (126)$$

$$f_{csm} = 1.5 [MPa] - \text{Laminados} \quad (127)$$

$$f_{csm} = 3.0 [MPa] - \text{Tecido} + \text{Laminado} \quad (128)$$

O comprimento de ancoragem pode ser determinado pelas seguintes expressões:

$$l_{b,max} = 1.46 \sqrt{\frac{E_f n_f t_f}{\sqrt{f_{csm} f_{ck,cube}}}} [mm] \quad (129)$$

$$l_{b,max} = 1.44 \sqrt{\frac{E_f t_f}{\sqrt{f_{ck} f_{ctm}}}} [mm] \quad (130)$$

$$l_{b,max} = \sqrt{\frac{E_f t_f}{1.44 f_{ctm}}} [mm] \quad (131)$$

$$l_{b,max} = \max(eq. anteriores) [mm] \quad (132)$$

Segundo o documento CNR-DT 200/2004 é possível estimar um comprimento de amarração ótimo (l_e) que, se for excedido, não haverá qualquer aumento das forças transferidas entre o betão e o FRP, assim:

$$l_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{2 f_{ctm}}} [mm] \quad (133)$$

Para o caso de paredes de alvenaria (tijolo) utiliza-se o valor f_{mtm} no lugar do f_{ctm} , que representa a resistência à tração média. Se não for especificado um valor $f_{mtm} = 0.10 f_{mk}$.

A próxima imagem permite visualizar este conceito de uma melhor forma:

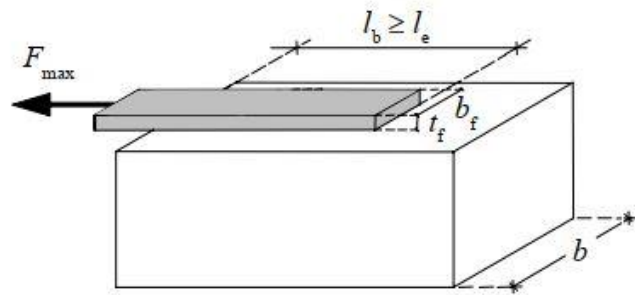


Figura 4.3.13 - Força máxima transferida entre o FRP e o betão (CNR-DT 200/2004)

Tendo em consideração o valor ótimo estimado, poderá ser calculada a força de rutura de aderência correspondente para esse comprimento, desta forma:

$$F_{bd} = F_{bd,max} \frac{l_b}{l_{b,max}} \left(2 - \frac{l_b}{l_{b,max}} \right) \quad (134)$$

Onde:

$$l_b \geq l_e \quad (135)$$

4.3.2.3 ESFORÇO TRANSVERSO

Este esforço é muito importante especialmente na zona de transição pilar/viga, onde os esforços de corte são elevados. O esforço transversal será verificado tendo em consideração um conjunto de fórmulas indicadas pelo documento fib.14.5.

As mantas e tecidos serão aplicados de forma semelhante à imagem seguinte:



Figura 4.3.14 - Reforço transverso do pilar (fib 14.5)

A aplicação das mantas e tecidos será feita após a aplicação dos laminados como demonstra a figura.

4.3.2.3.1 PONTO 1 – VERIFICAÇÃO DA NECESSIDADE DE REFORÇO

Este ponto é igual ao apresentado na verificação do esforço transversal do documento ACI apresentado atrás. Dessa forma são utilizadas as fórmulas (48) a (54).

4.3.2.3.2 PONTO 2 – DETERMINAR A RESISTÊNCIA DO REFORÇO

Para começar, é necessário fazer escolhas relacionadas com algumas características do reforço, tais como a espessura do FRP (t_w), a largura das faixas de FRP (b_w) e o tipo de manta ou tecido utilizado.

A próxima fórmula vai permitir calcular a capacidade resistente da peça com o reforço, de uma forma semelhante à obtenção da capacidade resistente obtida no ponto anterior, assim:

$$V_{Rd} = \min(V_{cd} + V_{wd} + V_{fd}, V_{Rd2}) \quad (136)$$

Tendo em consideração o documento, o valor resistente será:

$$V_{Rd} = V_{fd} \quad (137)$$

Sendo V_{fd} [secções retangulares, T ou duplo T] calculado pela seguinte expressão:

$$V_{fd} = 0.9 \varepsilon_{fd,e} E_{fu} \rho_f b_w d (\cos \theta + \cos \alpha) \sin \alpha \quad (138)$$

Onde:

$$\rho_f = \frac{2t_f}{b_w} \sin \alpha \quad (139)$$

$$\varepsilon_{fd,e} = \frac{\varepsilon_{fk,e}}{\gamma_f}, \text{ onde } \gamma_{fb} = 1.30 \quad (140)$$

$$\varepsilon_{fk,e} = k \varepsilon_{f,e}, \text{ onde } k = 0.80 \quad (141)$$

$$d = (h - r - \phi_{trans.} - \frac{1}{2} \phi_{long.}) \quad (142)$$

$$\theta = 45^\circ \quad (143)$$

$$\alpha = 90^\circ \quad (144)$$

Para situações completamente embrulhadas pelo FRP, ou ancorado devidamente (recomendado sempre que possível):

$$\varepsilon_{f,e} = 0.17 \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0.30} \varepsilon_{fu} \quad (145)$$

Nota:

O valor do f_{cm} está em Mpa e E_{fu} em Gpa.

Para [secções circulares] o valor V_{fd} será:

$$V_{fd} = \frac{\varepsilon_{max}}{\gamma_f} E_{fu} \rho_f \frac{1}{2} \frac{\pi D^2}{4} \cos \theta \quad (146)$$

Onde:

$$\varepsilon_{max} \cong 0.006 \quad (147)$$

4.3.2.3.3 PONTO 3 – OUTRA FORMA DE ANALISAR

Este ponto lida, de forma simplificada, com o processo tido em conta no desenvolvimento do programa lamella, utilizado à frente no caso de estudo. Tendo também a consideração do documento alemão.

O reforço ao esforço transversal é feito tendo em consideração a variação deste esforço ou seja:

$$\Delta V_{wd} = V_{Ed} - V_{Rd,s} \quad (148)$$

O documento alemão considera que existe uma variação mínima para o qual o valor anterior terá de ser superior. O valor mínimo é calculado pela seguinte expressão:

$$\Delta V_{w,min} = \frac{\eta - 1}{\eta} V_{Ed} \quad (149)$$

Onde:

$$\eta = 1.11 \quad (150)$$

Assim:

$$\Delta V_{wd} \geq \Delta V_{w,min} \quad (151)$$

Tendo em consideração que a extensão da secção está limitada (neste caso) a $\varepsilon_{limit} = 0.2\%$ para assegurar uma deformação uniforme da secção:

$$\sigma_{fw} = \varepsilon_{limit} E_{fd} \quad (152)$$

Onde:

$$E_{fd} = \frac{E_{fk}}{\gamma_E}, \text{ onde } \gamma_E = 1.20 \quad (153)$$

O próximo passo será a indicação das características geométricas e de aplicação do FRP a utilizar, para posteriormente calcular o valor resistente total:

$$A_w = 2n_w t_w b_w \quad (154)$$

Tendo como espaçamento máximo:

$$s_{w,max} = 0.80h \quad (155)$$

A variação de cálculo resultante será:

$$\Delta V_{wd} = \frac{A_w}{s_w} \sigma_{fw} z_f (\cos \theta + \cos \alpha) \sin \alpha \quad (156)$$

Assim:

$$V_{Rd} = V_{Rd,s} + \Delta V_{wd}, \text{ onde } V_{Rd} > V_{Ed} \quad (157)$$

5 CASO DE ESTUDO

5.1 CONSIDERAÇÕES

Este capítulo vai apresentar as várias fases do dimensionamento de reforços dos pilares de uma estrutura que, hipoteticamente, vai sofrer a ação de um incêndio. Considerando o incêndio, foram realizados ensaios que demonstraram a diminuição da capacidade resistente dos materiais, levando há necessidade de reforço.

O objetivo desta secção é tentar garantir que a estrutura possa voltar a ser utilizada com segurança, dando mais um exemplo da viabilidade deste tipo de soluções e da eficácia dos processos utilizados pelos programas. Serão analisados quatro pilares com seis pisos (excluindo a cobertura), do projeto de um edifício na Lousã e quatro pilares com cinco pisos, do projeto da disciplina PEC da licenciatura.

Para o dimensionamento serão utilizados dois programas desenvolvidos pela empresa S&P Reinforcement. O **FRP Colonna (versão 1.6)** para os pilares (confinamento), **FRP Lamella (versão 5.6)** para a flexão dos pilares.

No caso do programa Colonna, a única norma presente relacionada com as várias questões do betão armado é o Eurocódigo 2, tendo três modelos disponíveis para o dimensionamento:

- fib Bulletin 14;
- CSTB Avis Technique 3/14-773 – Inspirado no Bulletin 14;
- Modelo de dimensionamento de Wang.

Como não existem normas ou regulamentos específicos devido ao facto de ser um sistema recente, não é apontado um modelo preferencial em relação aos outros, sendo possível a escolha de qualquer um.

Para o caso do programa FRP Lamella são utilizados alguns dos documentos apresentados na secção Normas, no capítulo do dimensionamento, dos quais os mais utilizados:

- CSTB Avis Technique 3/14;
- CNR-DT 200/2004;
- DIBt Zulassung Z-36.12-62 /-67 [**Considerado**].

5.2 PROJETO DE REFORÇO

O caso de estudo incide no reforço hipotético de oito pilares. Os primeiros quatro analisados são pertencentes ao projeto de PEC (análise ao confinamento) e os últimos quatro são referentes ao projeto de um edifício na Lousã (análise à flexão).

Inicialmente foi considerado a utilização de um único projeto, o edifício na Lousã. Com o decorrer da análise das características do mesmo, foi observado que não havia um único pilar que tivesse necessidade de reforço ao confinamento, devido essencialmente à grande percentagem de armaduras (considerando as reduções demonstradas abaixo. Dessa forma foi ponderado a utilização do projeto da disciplina PEC que, dada as suas características, ia certamente permitir a exemplificação do dimensionamento para o confinamento de alguns dos seus pilares (considerando as reduções).

É considerado que os edifícios sofreram um incêndio que diminuiu significativamente a capacidade estrutural dos elementos estruturais. Considerou-se que a resistência do betão e do aço tenha diminuído para os valores indicados abaixo:

- C25/30 → Redução considerada igual a **44%** → C14/16,8;
- A500 → Considerado uma redução das propriedades igual a **60%**.

É de frisar que o programa Lamella considera os esforços existentes antes da intervenção e os esforços após a intervenção (normalmente por aumento dos requisitos). O edifício da Lousã é constituído por seis pisos, excluindo a cobertura, tendo um acima do piso 0 e os restantes abaixo. As imagens seguintes representam a planta do edifício e um dos seus cortes transversais.

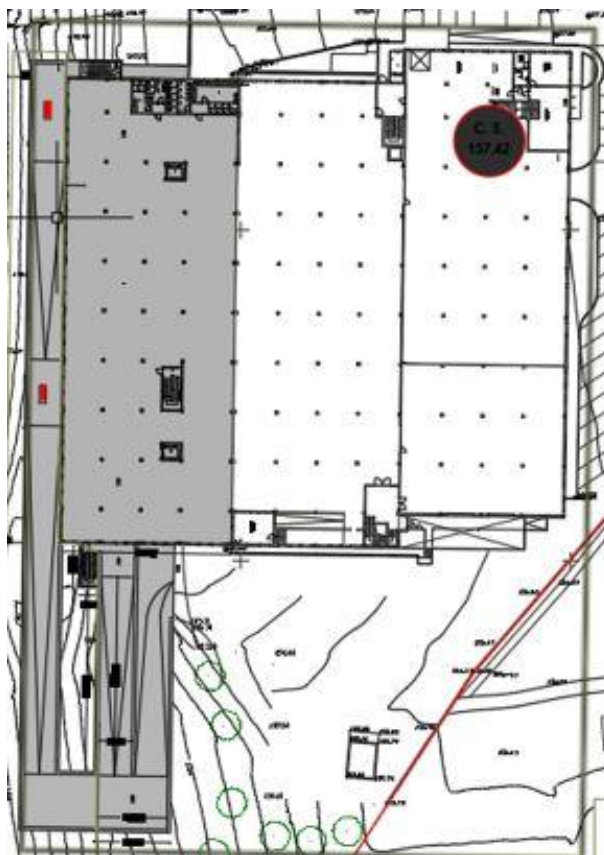


Figura 5.2.1 - Planta do Edifício na Lousã

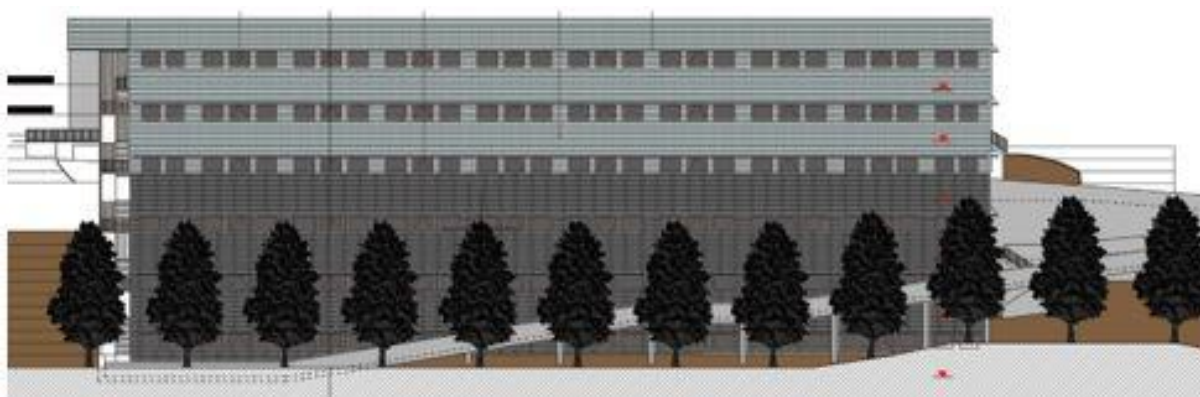


Figura 5.2.2 - Corte Transversal do Edifício na Lousã

O edifício do projeto de PEC é constituído por cinco pisos. As imagens abaixo representam o edifício de PEC em planta e um dos cortes transversais, respetivamente:

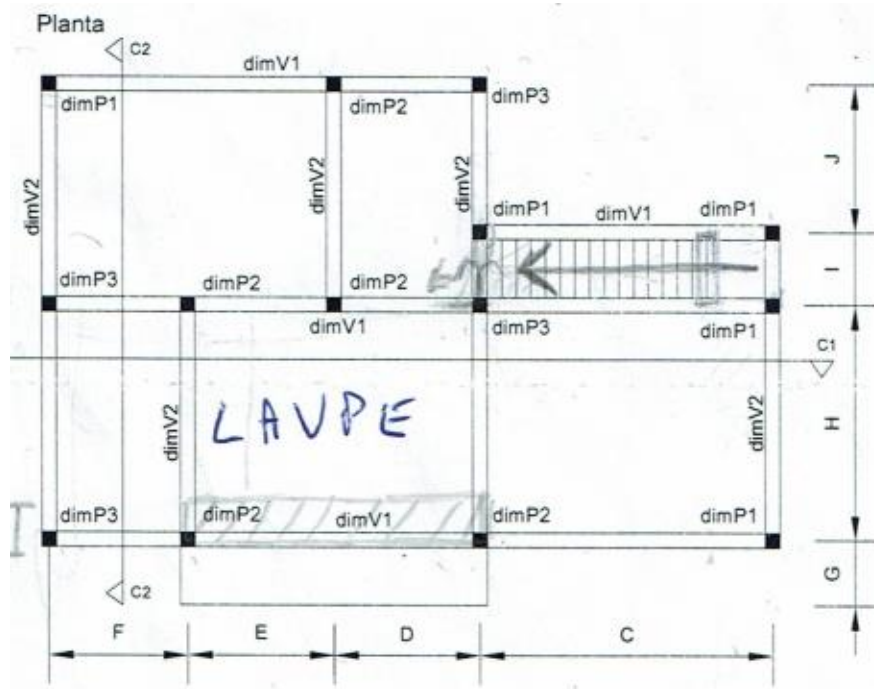


Figura 5.2.3 - Planta do edifício de PEC

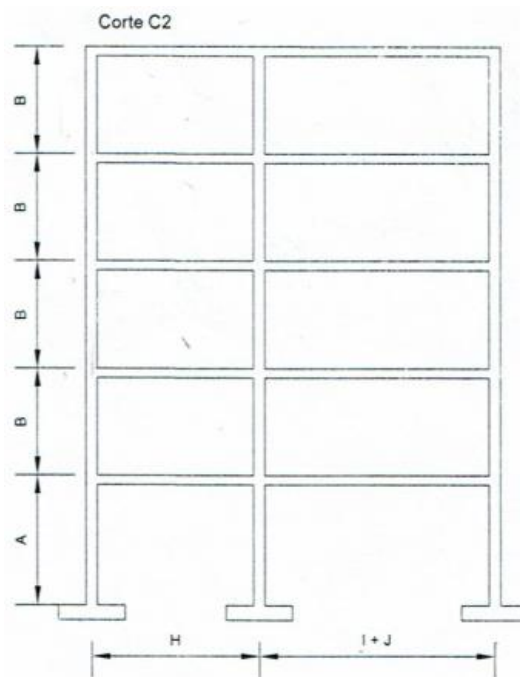


Figura 5.2.4 - Corte Transversal de PEC

É importante informar que os exemplos e as imagens da utilização dos programas são relativos a apenas um dos exemplos, como por exemplo: um pilar para confinamento e um outro para flexão (pilares retirados de projetos diferentes). Será feito desta forma porque os processos serão repetitivos, ponderando-se, se necessário, a menção de

situações importantes que possam ter ocorrido nos reforços que não foram demonstrados.

Após a exemplificação de cada processo com um exemplar, será apresentada uma tabela com o dimensionamento dos outros elementos. Os desenhos dos elementos reforçados e as tabelas resumo dos esforços e das armaduras dos pilares serão apresentados em anexo.

É necessário referir que os resultados de todos os outros reforços (resultados dos programas, excluindo os apresentados como exemplo) também serão apresentados em anexo.

São também apresentadas imagens, em anexo, referentes a um excel que permite dimensionar reforços considerando alguns dos métodos de cálculo apresentados atrás (no caso referentes aos métodos do documento ACI).

5.2.1 PILARES

A primeira demonstração será o reforço ao confinamento (projeto de PEC) dos quatro pilares assinalados na imagem seguinte:

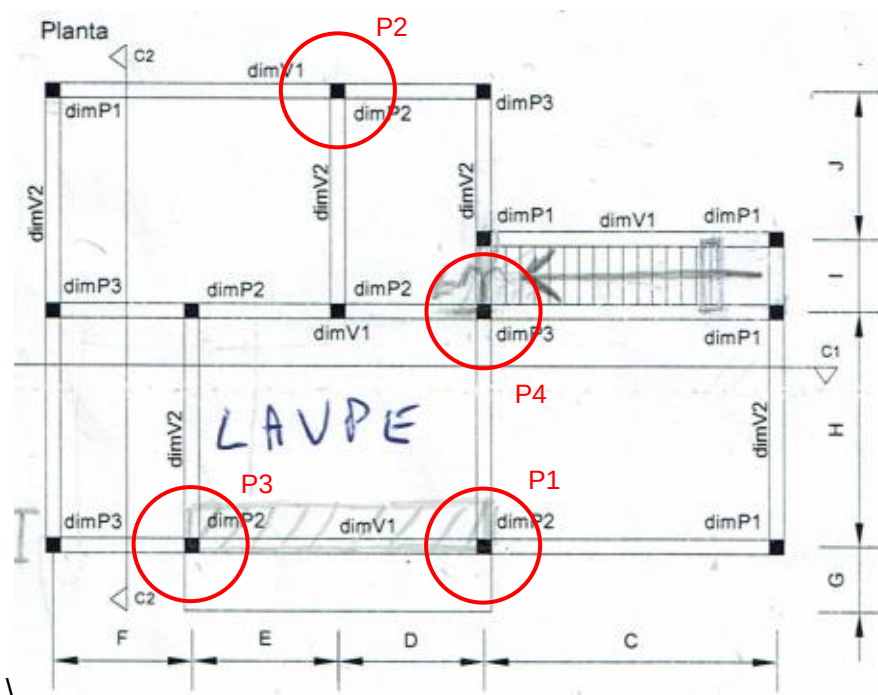


Figura 5.2.5 - Planta considerada para o confinamento (PEC-2019/2020)

A próxima imagem representa a planta do edifício da Lousã com os pilares a reforçar:

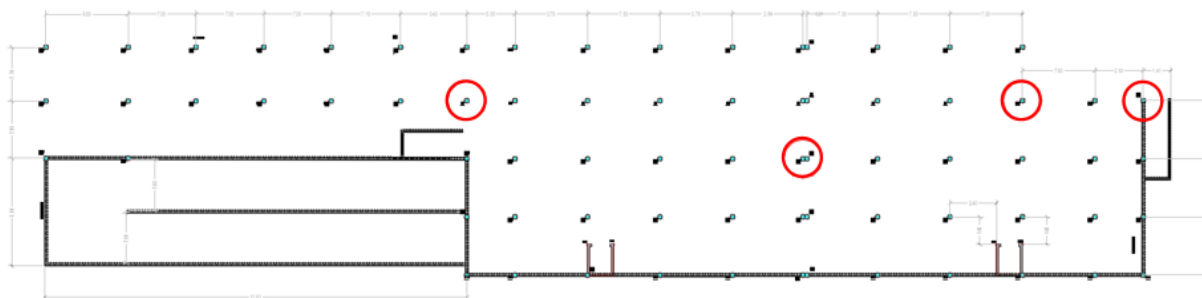


Figura 5.2.6 - Implantação dos pilares em planta no edifício da Lousã

Todos os pilares no projeto da Lousã apresentam uma secção quadrada de **40x40 (cm)**.

É importante frisar que a escolha dos pilares está puramente relacionada com a necessidade, visto que a grande maioria não necessita de reforço, ou seja, de todos os pilares de ambos os projetos, os escolhidos apresentam a maior necessidade de reforço.

5.2.1.1 CONFINAMENTO - COLONNA

Esta secção tem em vista apresentar de forma detalhada os vários passos necessários para o cálculo correto dos pilares utilizando o programa mencionado.

Foi analisado o projeto inicial e foi descoberto que todos os pilares do edifício nestas condições não necessitam de confinamento (apresentam uma percentagem de armadura muito elevada). Desta forma serão analisados quatro pilares oriundos do projeto de PEC da licenciatura, que, nas mesmas condições, necessitam de algum reforço.

O pilar **P1** foi o escolhido para a demonstração prática da simulação simplesmente por ter sido o pilar dimensionado na disciplina. Como o trabalho da disciplina de PEC necessitava apenas da análise de um pilar, tiveram de ser feitas as simulações de uma forma semelhante à efetuada na disciplina.

5.2.1.1.1 NOME DO PROJETO

Quando o programa é aberto, o primeiro passo é a indicação do nome do projeto e a posição (na posição pode ser aplicado, por exemplo, Coluna Retangular).

A imagem seguinte demonstra o caso:



Figura 5.2.7 - Nome do projeto (Colonna)

5.2.1.1.2 ESCOLHER MODELOS

O único Regulamento de referência para o betão é o Eurocódigo 2, pelo que será esse a utilizar.

No ponto inferior esquerdo estão os modelos de cálculo disponíveis. Como ainda não existe documentação oficial (não há recomendações sobre qual utilizar), a escolha do modelo será inteiramente da decisão do utilizador, sem qualquer restrição. No caso concreto foi escolhido o modelo da fib 14 porque é o mais utilizado, porque o modelo de cálculo apresentado atrás é da fib e porque apresenta bons resultados.

O canto superior direito dá para escolher o país. Este ponto será importante apenas devido a certos valores, como por exemplo:

- Para Portugal o aço A500 não está disponível, existindo o equivalente do A500 para a França.

Isto não é muito importante porque o programa permite aplicar valores que não estão normalizados (utilizada para a análise do pilar) [Escolhido Portugal].

Por fim estão as unidades utilizadas no quanto inferior direito.

A imagem abaixo demonstra o menu do programa:

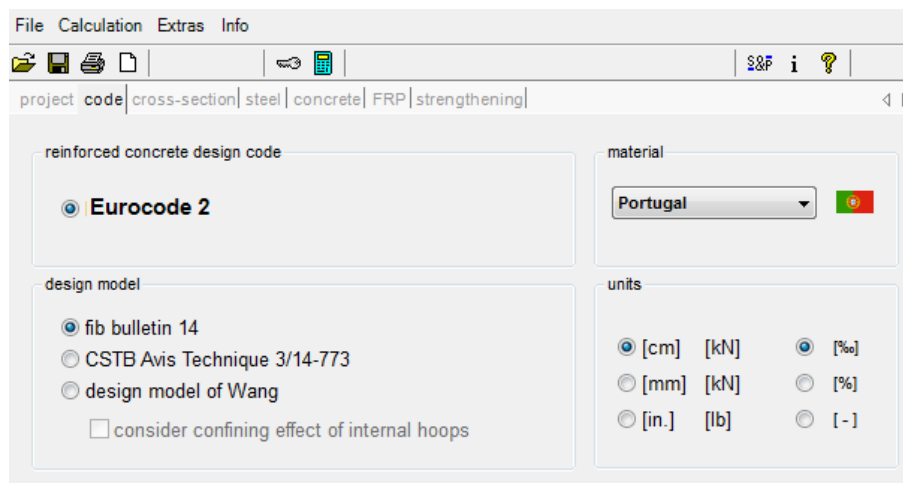


Figura 5.2.8 - Escolha dos modelos (Colonna)

É interessante que o modelo de Wang necessita de informações sobre as armaduras transversais, no entanto os resultados são muito semelhantes aos outros modelos.

5.2.1.1.3 SECÇÃO TRANSVERSAL

Este menu vai permitir aplicar as informações geométricas do pilar, incluindo a informação relativa à área de armadura. Á a possibilidade de escolher o tipo de secção do pilar [no caso é quadrado **40x40 (cm)**].

O valor **r** representa o raio do boleamento dos cantos, que é no mínimo **2,5 cm**, recomendado pela S&P. Será, no entanto, utilizado o valor de **3 cm** para assegurar um pouco mais pela segurança, porque um valor maior vai melhorar a eficiência das mantas.

A imagem seguinte representa a aplicação dos valores no programa.

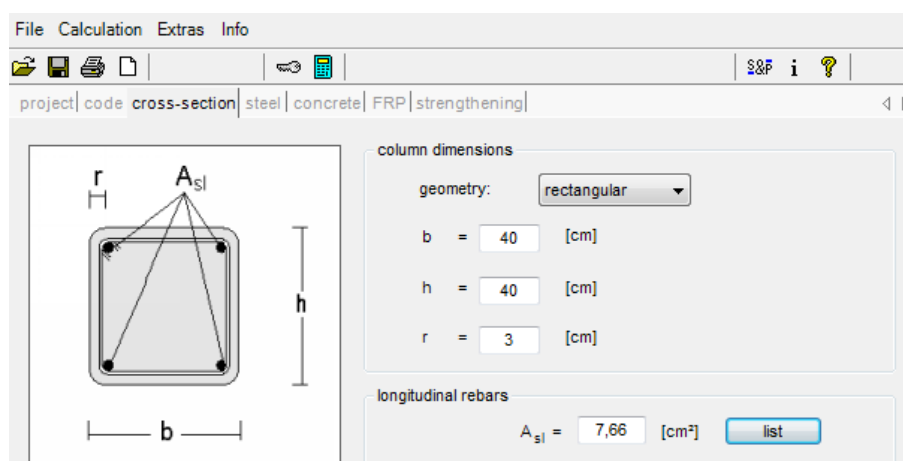


Figura 5.2.9 - Escolha da secção (Colonna)

Para a escolha das armaduras apresentadas clicou-se no botão “list”, ao lado da área total de armaduras, que abre o submenu apresentado abaixo, permitindo a aplicação de várias configurações diferentes de armaduras, apresentando no final o somatório das áreas de armadura escolhidas, assim:

rebar diameter	number of bars									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ø 6	0,28	0,57	0,85	1,13	1,41	1,7	1,98	2,26	2,54	2,83
Ø 8	0,5	1,01	1,51	2,01	2,51	3,02	3,52	4,02	4,52	5,03
Ø 10	0,79	1,57	2,36	3,14	3,93	4,71	5,5	6,28	7,07	7,85
Ø 12	1,13	2,26	3,39	4,52	5,65	6,79	7,92	9,05	10,18	11,31
Ø 14	1,54	3,08	4,62	6,16	7,7	9,24	10,78	12,32	13,85	15,39
Ø 16	2,01	4,02	6,03	8,04	10,05	12,06	14,07	16,08	18,1	20,11
Ø 18	2,54	5,09	7,63	10,18	12,72	15,27	17,81	20,36	22,9	25,45
Ø 20	3,14	6,28	9,42	12,57	15,71	18,85	21,99	25,13	28,27	31,42
Ø 22	3,8	7,6	11,4	15,21	19,01	22,81	26,61	30,41	34,21	38,01
Ø 25	4,91	9,82	14,73	19,63	24,54	29,45	34,36	39,27	44,18	49,09
Ø 26	5,31	10,62	15,93	21,24	26,55	31,86	37,17	42,47	47,78	53,09
Ø 28	6,16	12,32	18,47	24,63	30,79	36,95	43,1	49,26	55,42	61,58
Ø 30	7,07	14,14	21,21	28,27	35,34	42,41	49,48	56,55	63,62	70,69

total area: $A_s = 7,66$ [cm²] choice: 4 Ø 12
4 Ø 10

Figura 5.2.10 - Escolha das armaduras (Colonna)

Para o pilar de demonstração do trabalho de PEC a percentagem de armadura não foi superior para o caso que dava um maior esforço axial porque considerou-se os efeitos compostos relativos aos momentos. Desta forma será escolhida a armadura relativa à hipótese que tinha um valor axial final superior (porque não é considerado momento), sendo, neste caso, a hipótese **1,35CP + 1,5Sob** para o piso do rés-do-chão [**2528.1 kN**].

5.2.1.1.4 ESCOLHA DO AÇO

Este menu vai permitir escolher a classe de aço das armaduras longitudinais, apresentando automaticamente as várias características do mesmo:

- E_s – Módulo de elasticidade;
- γ_s – Fator parcial de segurança igual a 1.15 (recomendado pelo EC2);
- f_{yk} – Tensão de cedência.

O programa permite algumas opções normalizados e uma opção de escolha não normalizada, que será utilizada para este caso devido à diminuição das propriedades.

A imagem apresenta as opções apresentadas no submenu:

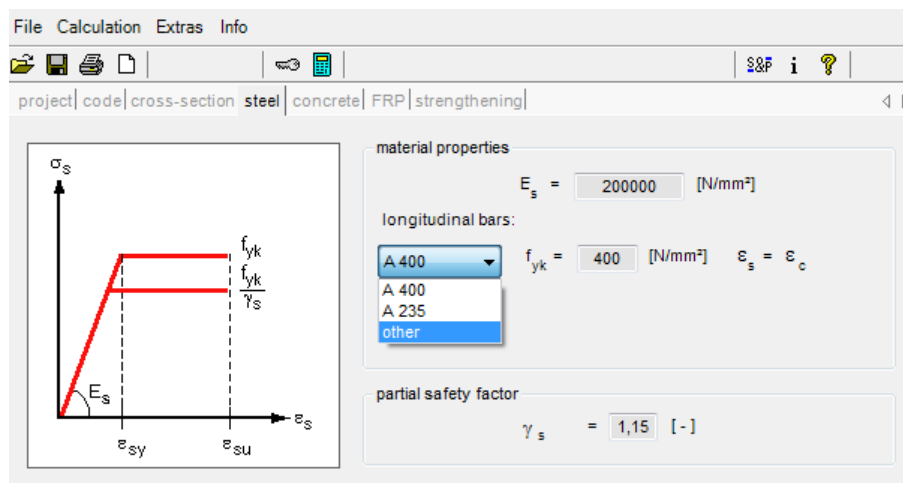


Figura 5.2.11 - Submenu de escolha (Colonna)

A opção escolhida para o caso será o “other” que vai permitir a aplicação de um valor não normalizado que, neste caso será o **200 MPa** (a percentagem de redução é igual a **60%**).

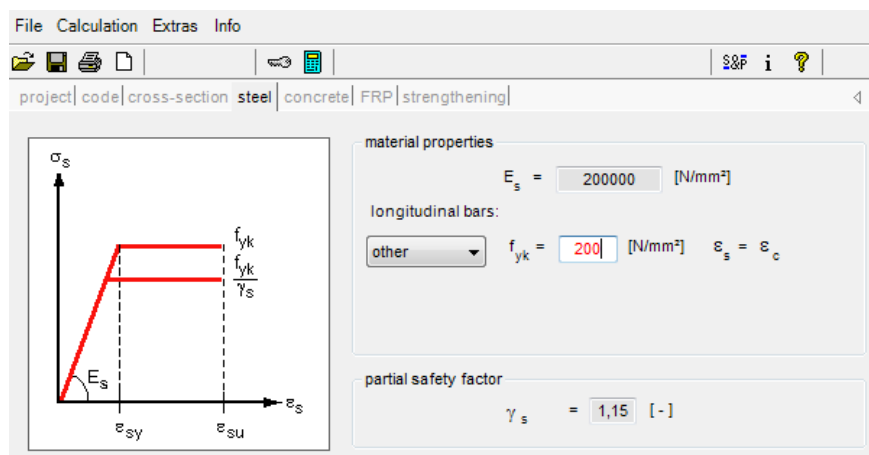


Figura 5.2.12 - Introdução da resistência do aço (colonna)

Os valores ϵ_s e ϵ_c são respetivamente a extensão do aço e a extensão do betão na fibra mais comprimida.

5.2.1.1.5 ESCOLHA DO BETÃO

Este ponto é semelhante ao anterior onde será necessário apenas a escolha do tipo de betão. Neste caso como o anterior será a opção “other” para conseguir aplicar a resistência minorada, que é neste caso **14 MPa** (a percentagem de redução é igual a **44%**).

A imagem seguinte representa o submenu:

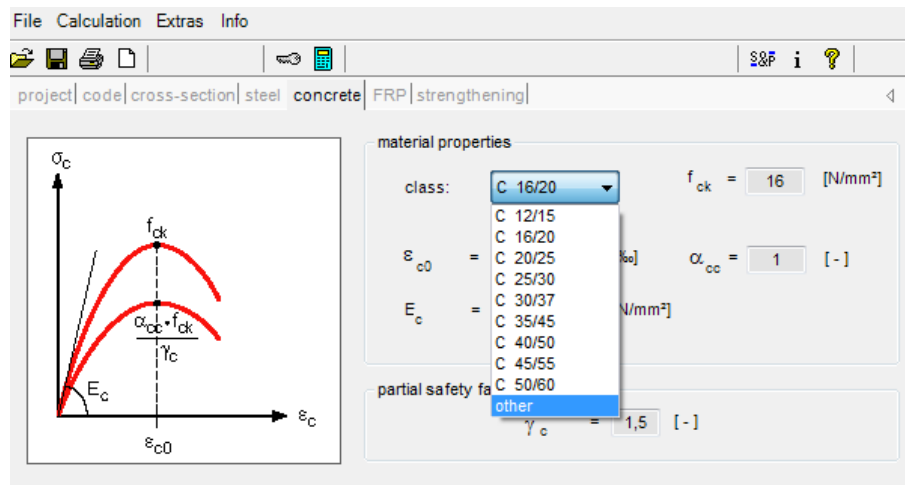


Figura 5.2.13 – Submenu de escolha (Colonna)

A próxima imagem representa a aplicação do valor utilizado, assim:

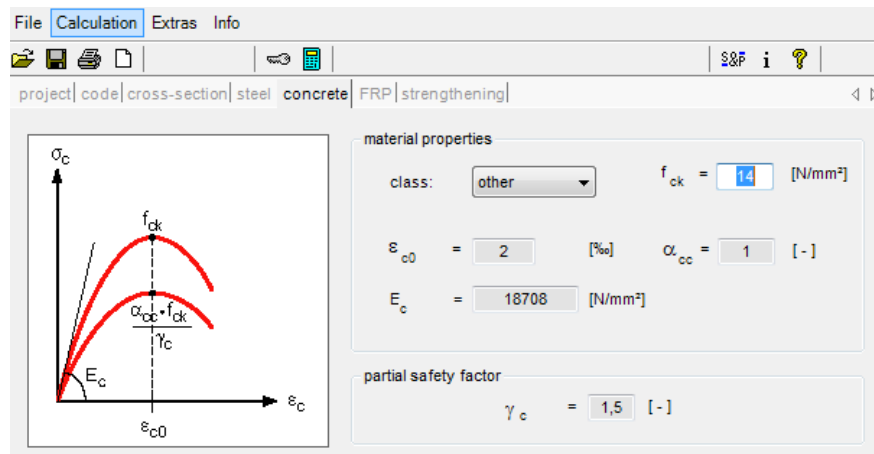


Figura 5.2.14 – Aplicação do valor correto da resistência (Colonna)

As características apresentadas são:

- f_{ck} – Tensão de cedência;
- $f_{ck,cyl}$ – Resistência característica (calculado segundo as seguintes equações):

$$f_{ck,cyl} = 0.77f_{ck,cube} \quad \text{para } f_{ck,cube} \leq 15 \text{ MPa} \quad (158)$$

$$f_{ck,cyl} = 0.82f_{ck,cube} \quad \text{para } f_{ck,cube} > 15 \text{ MPa} \quad (159)$$

- α_{cc} – Fator de redução que tem em conta efeitos de longo prazo na resistência à compressão (EC2 recomenda o valor 1);
- γ_c – Fator parcial de segurança (Eurocódigo 2 [EC2] recomenda 1.5);
- E_c – Módulo de elasticidade do betão (pode ser calculado considerando a seguinte fórmula):
 - Este valor descreve o declive da tangente intercetando a origem.

$$E_c = 5000\sqrt{f_{ck}} \quad (160)$$

- E_{co} – Extensão de cedência do betão não confinado.

5.2.1.1.6 ESCOLHA DO FRP

Este ponto é também muito semelhante aos anteriores, dando a possibilidade de escolha do tipo de FRP e da resina a utilizar.

As imagens seguintes representam os submenus com as opções a escolher:

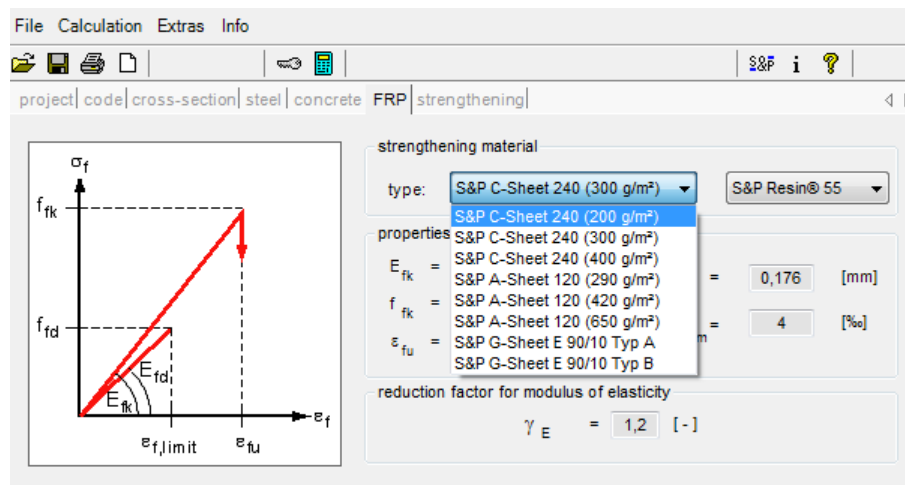


Figura 5.2.15 - Submenu de escolha do FRP (Colonna)

Em todas as iterações é costume fazer a verificação com a opção mais económica, a mais barata e conseqüentemente a menos resistente, e determinar se é viável ou não essa opção. Neste caso a escolhida foi a que aparece a azul.

~

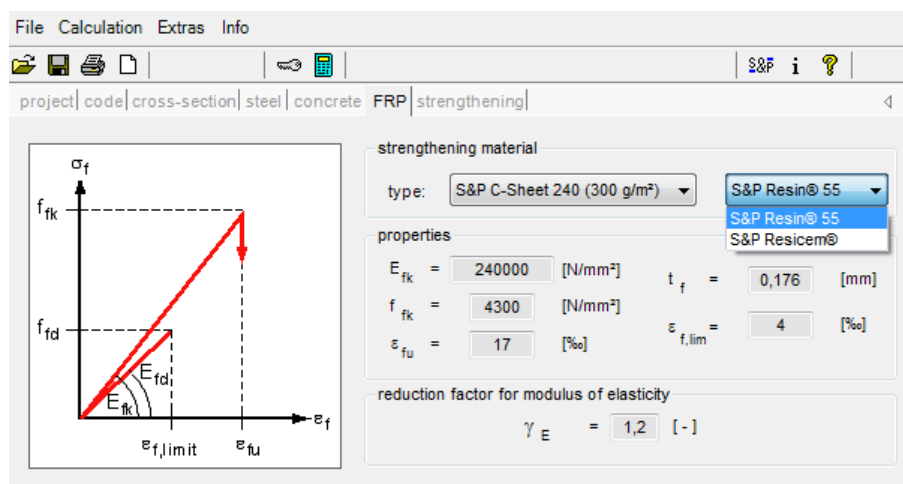


Figura 5.2.16 - Submenu para a escolha da resina (Colonna)

No caso das resinas, ambas apresentam capacidades semelhantes, pelo que não é considerável a diferença entre elas (ambas são igualmente válidas). Neste caso foi utilizada a que está assinalada. O valor da S&P Resin poderá ser utilizado para preencher ranhuras e para corrigir pequenas imperfeições no elemento a reforçar.

As várias características:

- E_{fk} – Módulo de elasticidade;
- f_{fk} – Resistência à tração característica;
- t_f – Espessura teórica de cálculo;
- ε_{fu} – Extensão de rutura;
- $\varepsilon_{f,lim}$ – Extensão limite.
- γ_E – Fator de redução do módulo de elasticidade (pré-selecionado segundo as recomendações da S&P):
 - Dependendo do material o valor pode variar entre 1.2 e 1.4.

5.2.1.1.7 APLICAÇÃO DO ESFORÇO AXIAL

Neste ponto será apenas aplicado o valor do esforço axial total que o pilar terá de resistir (N_{Edf}) e verificar se é necessário o reforço.

A imagem seguinte apresenta a aplicação do valor correto, assim:

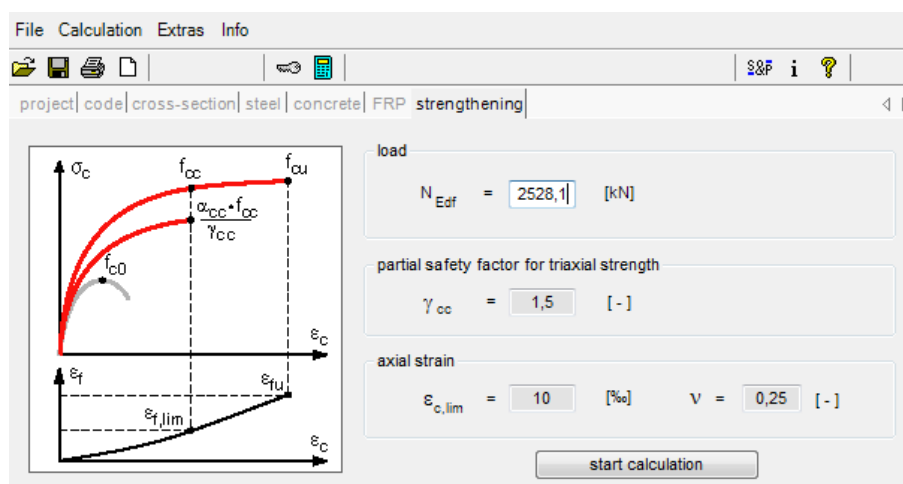


Figura 5.2.17 - Aplicação do esforço axial (Colonna)

Características apresentadas:

- γ_{cc} – Fator de segurança parcial para a resistência triaxial do pilar utilizado para o betão não reforçado;
- $\epsilon_{c,lim}$ – Limite para a extensão axial do pilar (recomendado um valor igual a valor do modelo de Wang, 10 ‰);
- ν – Coeficiente de Poisson igual a 0.25 (recomendado pelo EC2).

O diagrama apresentado é importante para dar a conhecer de uma forma intuitiva a relação entre as várias resistências e as extensões correspondentes. O valor f_{cc} apresentado, por exemplo, é a resistência do betão confinado calculado no processo iterativo tendo em conta a tensão lateral $\sigma_l = j$ que corresponde à extensão $\epsilon_{f,lim}$ (extensão limite do FRP considerado para o f_{cc}).

5.2.1.1.8 RESULTADOS

Inicialmente serão apresentados os resultados obtidos pela simulação do programa, seguida da apresentação da tabela resumo dos reforços para os quatro pilares.

A primeira imagem representa o resultado da simulação utilizando todos os valores apresentados nas imagens acima:

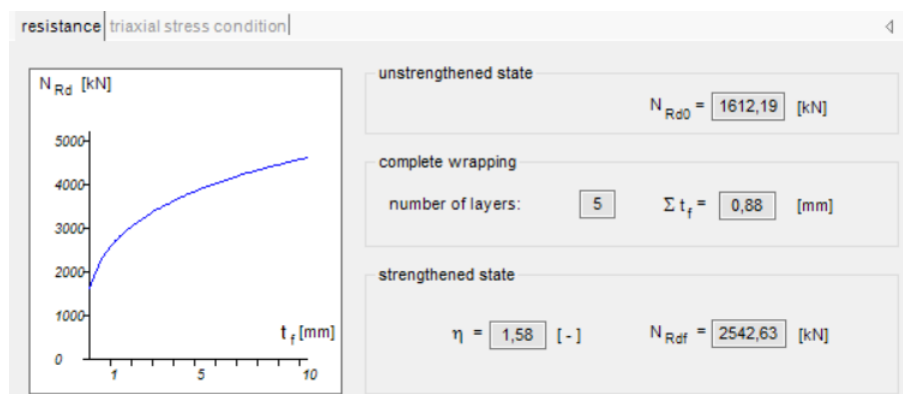


Figura 5.2.18 - Primeira simulação (Colonna)

Como se pode observar o valor do número de camadas é igual cinco. Este valor representa o número de camadas máximo para garantir a adesão correta do reforço. Assim foi decidido que seria prudente privilegiar a segurança, escolhendo um tipo de manta acima do apresentado nas imagens **5-15** e **5-16**, que no caso foi o S&P C-Sheet 240 (300 g/cm²). As seguintes imagens representam os resultados do cálculo considerando a mudança do tipo de manta (400 g/cm²):

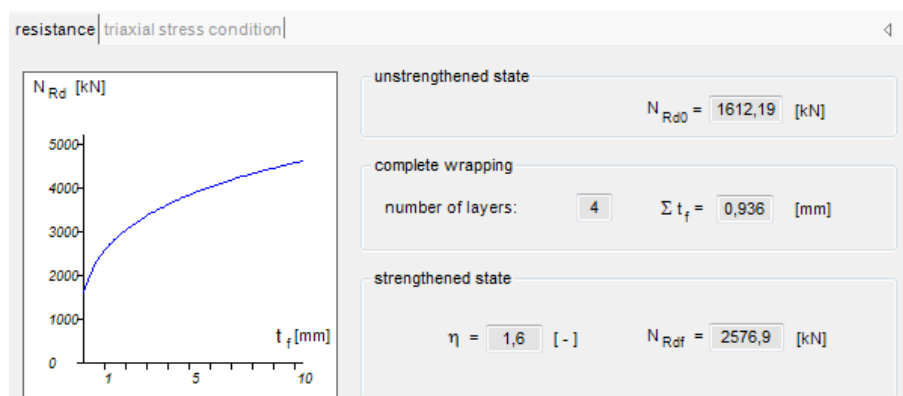


Figura 5.2.19 – Segunda simulação [utilizada] (Colonna)

Como se pode ver, o pilar vai necessitar de quatro camadas (4 x t_f) e apresenta uma capacidade resistente igual 1612,19 kN (sem reforço). O valor η representa o rácio entre o valor axial total e o resistente (serve para ter uma noção de qual será o reforço necessário). O valor N_{Rdf} representa o valor resistente após o reforço.

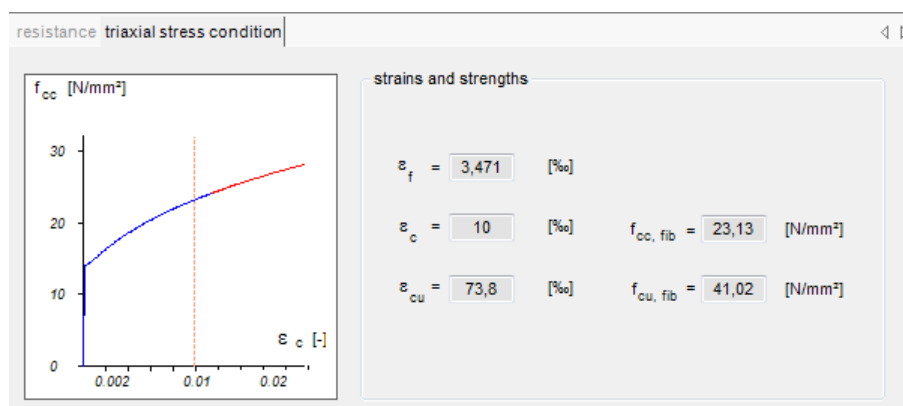


Figura 5.2.20 - Extensões e resistências triaxiais (Colonna)

Os valores da esquerda representam a extensão na manta ε_f , a extensão no betão ε_c e a extensão última do betão respetivamente ε_{cu} . À direita está representada a resistência do betão confinado $f_{cc, fib}$ (considerando a extensão do betão) e a resistência última do betão confinado $f_{cu, fib}$ (considerando a extensão última do betão).

A tabela seguinte apresenta os reforços obtidos das várias simulações do programa para os quatro pilares. Mostra também assinado a vermelho o pilar considerado nas imagens anteriores:

	Secção	R/C	P.1	P.2	P.3	P.4	Reforço
P1		4	2				n
P2	40X40	1					
P3		3					
P4	35X50	2					...

Tabela 15 - Tabela resumo

- n – Número de camadas.

O valor marcado a vermelho representa a mudança do tipo da manta para S&P C-Sheet 240 (400 g/cm²) quando comparado com o **S&P C-Sheet 240 (300 g/cm²)** utilizado nos restantes reforços. Os restantes foram efetuados utilizando o tipo 300 g/cm² ao invés do 200 g/cm² porque, com o valor mais baixo é necessário um maior número de camadas e, tendo sempre em conta a adesão, é preferível adotar o sistema que necessite de menos camadas, considerando naturalmente o preço final da solução numa situação real e verificar qual seria o mais económico.

Na realidade também seria necessário verificar experimentalmente os vários tipos de mantas com várias camadas (poderá ser uma ideia para realizar futuramente) na situação apresentada (situação analisada é muito fora de comum) e verificar se existem problemas consideráveis de adesão. Não havendo mais informação, especialmente por ser um caso muito específico com uma diminuição muito grande das resistências dos materiais, é preferível presar pela segurança e utilizar o tipo mediano ao invés do mais barato.

5.2.1.2 FLEXÃO – LAMELLA

Esta secção tem em vista apresentar de forma intuitiva e detalhada os vários passos necessários para o cálculo correto dos pilares utilizando o programa mencionado. É necessário mencionar que o programa foi inicialmente desenvolvido para a análise de vigas, dessa forma o pilar terá de ser considerado como se uma viga na vertical se tratasse.

Para este ponto será necessário fazer as simulações nas duas direções se a armadura na zona tracionada for diferente nas duas direções. Será apenas exemplificado o processo para uma das direções, porque o que teria de mudar seria a percentagem de armadura, e o momento fletor.

Se a armadura for igual com momentos diferentes, poderá ser feita a simulação considerando o maior dos momentos (x ou y), aplicando o mesmo reforço para ambos os lados [não haverá problemas relacionados com a geometria porque todos os pilares têm 40x40 (cm)].

O pilar a ser analisado na demonstração será o **P1** no **piso 1**. No caso apresentado a distribuição das armaduras é constante, o que significa que não haverá necessidade de analisar as duas direções, considerando apenas a direção com o momento mais elevado.

5.2.1.2.1 NOME DO PROJETO E ESTRUTURA

Quando o programa é aberto, o primeiro passo é a indicação do nome do projeto.

A imagem seguinte demonstra o caso:

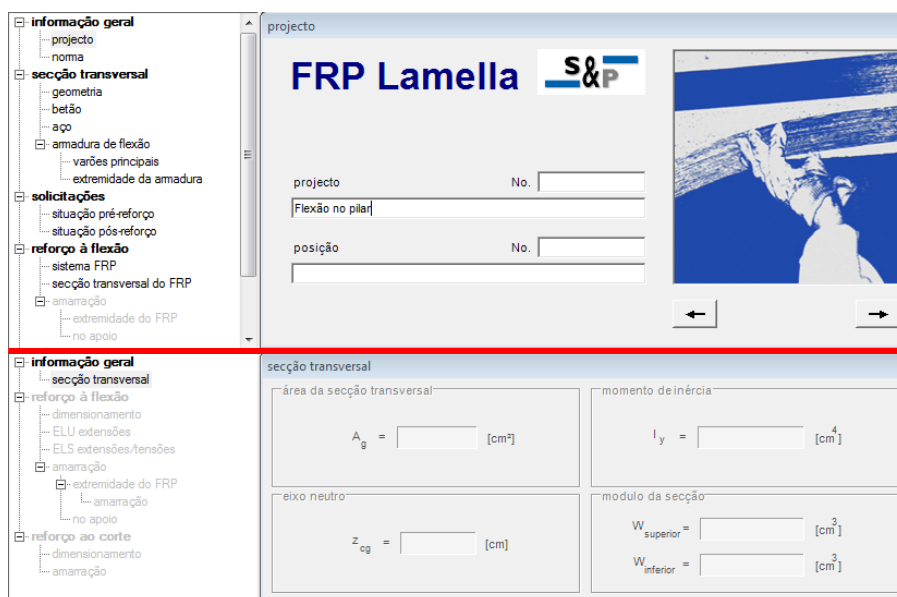


Figura 5.2.21 - Menu inicial (Lamella)

Este programa é mais complexo que o anterior, sendo necessário uma pequena explicação sobre a sua estrutura. Primeiramente é importante referir que os menus e submenus acima da linha vermelha (melhorar a compreensão) são utilizados para a introdução e escolha das mais variadas propriedades necessárias para fazer a simulação. A secção abaixo da linha tem como finalidade apresentar os resultados das simulações.

5.2.1.2.2 ESCOLHA DOS REGULAMENTOS

Esta parte é muito semelhante ao **ponto 5.2.1.1.2**, tendo como principal diferença o número de regulamentos existentes para o betão (do qual foi escolhido o Eurocódigo 2) e o número muito grande de guias de cálculo (dos quais foi escolhido o guia alemão [pré-definido pelo programa]).

Mais uma vez, como não há regras específicas relacionados com a escolha dos regulamentos, é igualmente correto a escolha de qualquer um dos apresentados.

A imagem seguinte demonstra a escolha dos vários componentes:

The 'norma' dialog box is used for selecting standards and codes. It includes the following sections:

- material:** A dropdown menu set to 'Portugal' with a small flag icon.
- unidades:** Radio buttons for units: [cm], [mm], [in] for length; [kN], [lb] for force; and [%], [%], [-] for percentage.
- regulamento:** Radio buttons for standards: Eurocode 2 (selected), DIN 1045-1, British Standard 8110, and ACI 318-99.
- guia da cálculo:** Radio buttons for calculation guides: requisitos do código alemão (selected), norma suíça, guideline italiano, requisitos do código francês, guideline inglês, guideline holandês, and guideline americano.
- em referencia a:** A list of references corresponding to the selected guide, such as DIBt Zulassung Z-36.12-62 /-67 for the German code.

Figura 5.2.22 - Escolha dos regulamentos e códigos (Lamella)

5.2.1.2.3 ESCOLHA DA SECÇÃO

Este ponto permite escolher o tipo de secção (escolhida a secção retangular) e permite a introdução das dimensões do elemento [40x 40 (cm)].

A imagem seguinte representa a introdução dos valores e a escolha da secção:

The 'geometria' dialog box is used for defining the cross-section geometry. It includes the following elements:

- Section Type:** A dropdown menu set to 'rectangular'.
- Dimensions:** Input fields for b_0 , b_1 , b_2 , h_0 , h_1 , and h_2 . The values for b_0 and h_0 are set to 40 [cm].
- Span:** A field for 'vão' (span) l in [m], with a note 'para máximo espaçamento das faixas de FRP'.
- Diagram:** A schematic of a rectangular cross-section with width 40 and height 40. A horizontal dashed line represents the center of gravity, labeled z_{cg} .

Figura 5.2.23 - Escolha da secção (Lamella)

Os valores geométricos aplicados permitem a obtenção de resultados apresentados abaixo:

Figura 5.2.24 - Informações da secção (Lamella)

As várias características calculadas através dos valores aplicados significam:

- A_g – área de da secção transversal;
- z_{cg} – Posição do eixo neutro da peça (considerado desde o topo da peça);
- I_y – Momento de inércia da secção;
- $W_{superior}$ & $W_{inferior}$ – Módulos da secção aplicados no topo e na base da secção respetivamente.

5.2.1.2.4 ESCOLHA DO BETÃO

Este ponto apresenta o mesmo tipo de submenu que permite a escolha de valores padronizados e permite a aplicação de valores extra (será aplicado o valor **14 MPa**). É também apresentado o diagrama tensão/deformação tido em consideração nas simulações.

As imagens seguintes permitem visualizar o processo:

Figura 5.2.25 - Escolha da classe de betão (Lamella)

O valor mínimo da resistência que o programa permite aplicar é 12,5 MPa.

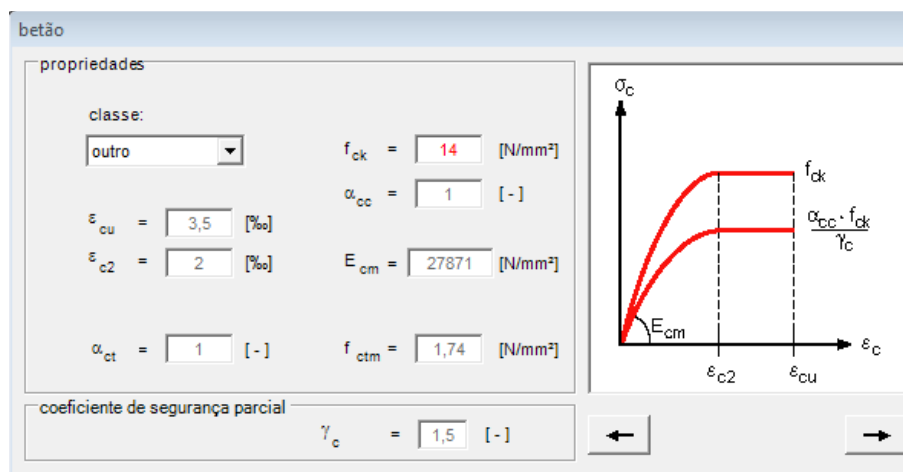


Figura 5.2.26 - Valores considerados para o betão (Lamella)

Os valores característicos apresentados representam:

- f_{ck} – Resistência característica do betão;
- α_{cc} – Fator de redução igual ao apresentado no programa Colonna;
- ϵ_{cu} – Extensão última do betão igual a 3,5 [‰] (recomendado pelo EC2);
- ϵ_{c2} – Extensão no eixo da curva parabólica é igual a 2,0[‰] (recomendado pelo EC2);
- E_{cm} – Módulo de elasticidade médio do betão:
 - Necessário para o cálculo da peça estrutural no estado não fissurado.
- α_{ct} – Fator de redução que tem em conta os efeitos a longo prazo na resistência à tração. Valor recomendado pelo EC2 igual a 1;
- f_{ctm} – Resistência média à tração do betão:
 - Define a transição entre a fase não fissurada e o estado fissurado da secção transversal.
- γ_c – Fator parcial de segurança igual a 1.5 (igual ao apresentado no colonna).

5.2.1.2.5 ESCOLHA DO AÇO

Neste caso é possível escolher o tipo de aço utilizado para armaduras ordinárias e, se necessário, escolher as armaduras pré-esforçadas. Permite também escolher a opção para aplicar valores extra, como as anteriores e os vários tipos de secções para ambos os tipos de armaduras. É também apresentado o diagrama tensão/deformação tido em consideração nas contas.

As imagens seguintes apresentam os menus e submenus:

aço

aço normal				
classe do aço	f_{yk} [N/mm ²]	secção	E_s [N/mm ²]	ε_{su} [‰]
A 500	500	nervura	200000	25
A 500	500	nervura	200000	25
A 400				
A 235				
outro				

aço de pré-esforço				
classe do aço	$f_{p0,1k}$ [N/mm ²]	secção	E_p [N/mm ²]	ε_{pu} [‰]
St 900/1100	900	cordão	195000	25
St 900/1100	900	cordão	195000	25

coeficiente de segurança parcial $\gamma_s = 1,15$ [-]

Figura 5.2.27 - Escolha da classe do aço (Lamella)

Comparativamente com o ponto anterior, os valores da resistência do aço podem ir mais baixo que o mínimo normalizado (A235), o que torna algo bom porque foi necessário um valor mais baixo para garantir que funciona-se bem nas características desejadas.

aço

aço normal				
classe do aço	f_{yk} [N/mm ²]	secção	E_s [N/mm ²]	ε_{su} [‰]
outro	200	nervura	200000	25
outro	200	nervura	200000	25

aço de pré-esforço				
classe do aço	$f_{p0,1k}$ [N/mm ²]	secção	E_p [N/mm ²]	ε_{pu} [‰]
St 900/1100	900	cordão	195000	25
St 900/1100	900	cordão	195000	25

coeficiente de segurança parcial $\gamma_s = 1,15$ [-]

Figura 5.2.28 - Valores considerados para o aço (Lamella)

O programa permite a consideração de dois tipos de aço ordinário e pré-esforçado. Se for necessário apenas um tipo de aço basta aplicar os dois valores iguais. Mais à frente vai ser possível informar o programa da necessidade de utilizar o pré-esforço. Dessa forma, se não for requerido pelo projeto, os valores pré-definidos para o pré-esforço apresentados acima podem ser deixados com estão.

Relativamente aos valores característicos:

- f_{yk} – Tensão de cedência característica do aço;
- ϵ_{su} & ϵ_{pu} – Representam a extensão máxima do aço para a armadura ordinária e pré-esforçada respetivamente. O valor recomendado pelo EC2 é 20 [‰]:
 - É apenas necessário para a terminação da iteração. Antes de ser atingido o limite de extensão, utiliza-se o limite de extensão no material compósito.
- γ_s – Coeficiente parcial de segurança igual a 1.15 (recomendado pelo EC2);
- E_s & E_p – Módulos de elasticidade do aço ordinário e pré-esforçado respetivamente. O valor para o aço ordinário é assumido como 200 000 MPa de acordo com o EC2. Para o caso pré-esforçado é pré-definido dependendo da secção escolhida de acordo com o EC2.

Nota:

Se for requerido modificar os valores propostos, poderá ser realizado usando o botão chave da barra de ferramentas. O botão desbloqueia os valores definidos.

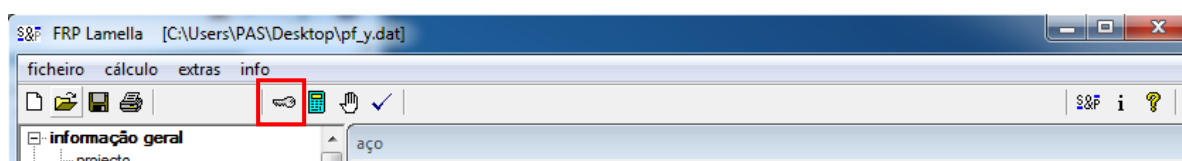


Figura 5.2.29 - Botão para mudar valores definidos (Lamella)

É recomendada sempre a utilização de aços nervurados porque apresentam uma área de contacto muito maior que os varões lisos, aumentando a assim a ligação aço/betão e consequentemente melhorando a transmissão dos esforços.

Para o pré-esforço é recomendado a utilização de cordões porque aumenta a capacidade resistente.

Esta capacidade é igualmente válida para o programa colonna.

5.2.1.2.6 ARMADURAS DE FLEXÃO

O objetivo deste ponto é indicar as armaduras que estão na zona mais tracionada (só as tracionadas), como seria por exemplo, a indicação das armaduras inferiores e a respetiva altura útil numa viga comum simplesmente apoiada com momentos positivos. A imagem seguinte apresenta, de uma forma visual, o conceito:

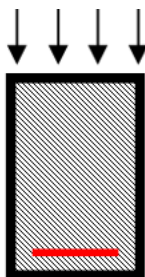


Figura 5.2.30 - Exemplo da localização das armaduras tracionadas

Há também a possibilidade, como demonstra a segunda figura, de indicar várias armaduras a alturas diferentes.

Também é necessário aplicar o valor do recobrimento dos estribos c_w , que é igual a **3 cm**.

A armadura total da secção é **4φ25 + 4φ16**, dos quais será considerado apenas **2φ25 + 1φ16** (cada aresta da secção retangular tem **2φ25 + 1φ16**, totalizando **4φ25 + 4φ16**).

A imagem seguinte demonstra um quadro de armaduras igual ao apresentado no outro programa que permite a escolha das armaduras de forma personalizada:

varão diâmetro	numero de varões									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ø 6	0,28	0,57	0,85	1,13	1,41	1,7	1,98	2,26	2,54	2,83
Ø 8	0,5	1,01	1,51	2,01	2,51	3,02	3,52	4,02	4,52	5,03
Ø 10	0,79	1,57	2,36	3,14	3,93	4,71	5,5	6,28	7,07	7,85
Ø 12	1,13	2,26	3,39	4,52	5,65	6,79	7,92	9,05	10,1	11,3
Ø 14	1,54	3,08	4,62	6,16	7,7	9,24	10,77	12,3	13,8	15,3
Ø 16	2,01	4,02	6,03	8,04	10,0	12,0	14,0	16,0	18,1	20,1
Ø 18	2,54	5,09	7,63	10,1	12,7	15,2	17,8	20,3	22,9	25,4
Ø 20	3,14	6,28	9,42	12,5	15,7	18,8	21,9	25,1	28,2	31,4
Ø 22	3,8	7,6	11,4	15,2	19,0	22,8	26,6	30,4	34,2	38,0
Ø 25	4,91	9,82	14,7	19,6	24,5	29,4	34,3	39,2	44,1	49,0
Ø 26	5,31	10,6	15,9	21,2	26,5	31,8	37,1	42,4	47,7	53,0
Ø 28	6,16	12,32	18,4	24,6	30,7	36,9	43,1	49,2	55,4	61,5
Ø 30	7,07	14,1	21,2	28,2	35,3	42,4	49,4	56,5	63,6	70,6
Ø 32	8,04	16,0	24,1	32,1	40,2	48,2	56,3	64,3	72,3	80,4

área total:

$A_s =$

11,83

[cm²]

escolha:

2

Ø 25

1

Ø 16

Figura 5.2.31 - Quadro de armaduras (Lamella)

Para abrir este submenu, basta clicar no botão da direita (assinalada na imagem que se segue). A próxima imagem apresenta os valores considerados:

armadura de flexão principal

armadura de flexão

No.	A_s [cm ²]	z_s [cm]	classe do aço	σ_{p0} [N/mm ²]	aderente
1	11,83	34,95	200 [N/mm ²]		☒
2	0	0	200 [N/mm ²]		☒
3	0	0	200 [N/mm ²]		☒
4	0	0	200 [N/mm ²]		☒
5	0	0	200 [N/mm ²]		☒
6	0	0	200 [N/mm ²]		☒

espessura de recobrimento dos estribos
 $c_w = 3$ [cm]

distância mínima lateral das tiras de FRP à extremidade

Figura 5.2.32 - Representação dos valores necessários (Lamella)

A classe do aço é apresentada automaticamente e é igual à escolhida anteriormente. O z_s representa a altura útil para o aço escolhido.

A opção **aderente** é possível apenas considerando o pré-esforço. Esta opção diz respeito à aderência entre as armaduras de pré-esforço e o betão circundante ou se não existe aderência ao betão circundante devido à aplicação de bainhas. As ordinárias são sempre aderentes.

5.2.1.2.7 EXTREMIDADE DA ARMADURA

Esta secção tem em consideração características de aderência da peça. O valor pedido é o comprimento de amarração do aço (essencial para a transferência completa de esforços para o betão), representado por $l_{s,A}$. Se não houver informação sobre o caso poderá ser deixado igual a zero e prosseguir para o próximo menu, porque não vai mudar os resultados do reforço (sempre recomendado introduzir o valor, mas, neste caso, não havia informação para o fazer).

As armaduras escolhidas anteriormente serão automaticamente aplicadas e o valor d_s que aparece igual a 25 mm representa o diâmetro das maiores armaduras, e o coeficiente de eficiência da ancoragem $\alpha_{1.5}$ poderá ser deixado com 1,0 (os valores mais comuns estão entre 0,7 a 1,0 inclusive).

A imagem seguinte apresenta a os valores aplicados:

extremidade da armadura de flexão

armadura variável ao longo do vão

No.	A_s [cm ²]	z_s [cm]	σ_{p0} [N/mm ²]
1	11,83	34,95	
2	0	0	
3	0	0	
4	0	0	
5	0	0	
6	0	0	

detalhes de aderência

d_s [mm]	$l_{s,A}$ [cm]	$\alpha_{1..5}$ [-]
25	0	1,0
0	0	1,0
0	0	1,0
0	0	1,0
0	0	1,0
0	0	1,0

Figura 5.2.33 - Apresentação dos valores relacionados com a extremidade (Lamella)

O valor σ_{p0} representa a tensão na zona de apoio para o pré-esforço.

5.2.1.2.8 SOLICITAÇÕES PRÉ-REFORÇO

Este menu permite a aplicação dos momentos e dos esforços axiais antes das intervenções e esforços relativos ao pré-esforço. Neste caso não haverá antes e depois porque não existe alteração dos esforços, havendo uma mudança da propriedade dos materiais. Para o programa funcionar é necessário considerar valores antes e depois, assim o valor “inicial” será considerado 60% do esforço existente (tabela apresentada numa folha de excel em anexo).

A imagem seguinte representa o menu e os valores aplicados.

solicitações pré-reforço

situação inicial

☒ momento no vão (positivo)
 ☐ momento no apoio (negativo)

☒ força de compressão
 ☐ força de tracção

$M_{Ek0}^* = 67,56$ [kNm]
 $N_{Ek0} = 29,64$ [kN]

* incluindo o momento secundário do pré-esforço

pré-esforço (determinado estaticamente)

$M_{p0} = 0$ [kNm]
 $N_p = 0$ [kN]

zona flexo-traccionada

☒ fissurada
 ☐ não fissurada

Figura 5.2.34 - Menu de aplicação dos esforços pré-reforço (Lamella)

Permite a escolha do tipo momento (positivo ou negativo), ou seja, permite analisar as situações no vão e no apoio (forma diferente de cálculo). A escolha está relacionada com o próximo menu porque não é possível escolher tipos de cálculo diferentes nas duas janelas de entrada de dados.

No caso da força axial pode ser escolhido se a força vai comprimir a peça (-> <-) ou se vai tracionar a peça (<- ->).

Designações:

- M_{EK0}^* – Momento fletor característico instalado durante a aplicação do reforço FRP (define o estado inicial de tensões na secção transversal):
 - É comum que o valor represente o momento devido às cargas permanentes.
- N_{EK0} – Força axial característica externa;
- M_{p0} – Momento de pré-esforço;
- N_p – Esforço de pré-esforço.

A **zona flexo-tracionada** permite informar ao programa se a secção transversal se apresenta fissura ou não fissurada sob cargas de serviço. Os elementos de betão armado estão normalmente **fissurados** tal como para elementos pré-esforçados mais baixos, tendo em conta o histórico de cargas. Para pré-esforço máximo considera-se não fissurado.

Notas:

Todos os valores aplicados nas simulações vão estar apresentados no ficheiro excel “Informações” apresentado em anexo.

5.2.1.2.9 SOLICITAÇÕES PÓS-REFORÇO

Este ponto é muito semelhante ao anterior, apresentando a mesma configuração do menu anterior. É neste ponto que se aplicação os esforços que foram sujeitos a diminuição no ponto anterior (esforços que o pilar necessita de resistir).

A figura seguinte representa o menu e os valores considerados para os esforços.

Figura 5.2.35 - Menu de aplicação dos esforços a resistir (Lamella)

Os dois pontos superiores na secção “estado limite último” representam os valores que o pilar tem de resistir, neste caso com a mesma configuração dos anteriores.

No caso todos os valores abaixo do estado limite último não foram seleccionados porque não havia dados para o fazer e porque o exercício foi pretendido ser realizado considerando apenas os estados limites últimos. Se numa situação real não forem aplicados estes valores o programa vai garantir o reforço adequado sem qualquer problema.

A escolha do estado de serviço está relacionada com a forma como os valores são determinados, por exemplo: Uma estrutura onde os esforços foram obtidos por análises mais complexas, como elementos finitos, será recomendada a utilização da opção **aproximado**, permitindo a aplicação de coeficientes médios de segurança que aumentam a segurança (parcela “coeficiente de segurança parcial”). Se o valor escolhido for o **exacto**, os esforços a aplicar serão o momento característico de serviço em estado reforçado, M_{Ekf} e a força axial de serviço característica, N_{Ekf} .

Designações:

- M_{Ed}^* – Momento de cálculo:
 - Para cargas esperadas é considerado um fator de segurança parcial γ para cargas permanentes e sobrecargas, assim com as combinações de ações ψ .
- N_{Ed} – Força axial de cálculo;
- M_{Ek}^* – Momento característico do momento na consideração da opção “exacto”;
- N_{Ek} – Força axial característica na consideração da opção “exacto”
- $\gamma_{M,m}$ – Valor médio do coeficiente de segurança parcial para o momento;
- $\gamma_{N,m}$ – Valor médio do coeficiente de segurança parcial para a força axial;

Segundo o EC2 os valores dos coeficientes parciais podem estar entre 1.35 e 1.5, inclusive.

5.2.1.2.10 ESCOLHA DO FRP

Este ponto permite escolher o tipo de CFRP a aplicar, o modo como é colocado e o tipo de resina. As restantes características serão apresentadas de forma automática consoante o escolhido.

O valor escolhido S&P CFK 150/2000 é utilizado na grande maioria dos reforços por apresentar capacidade resistente suficiente. Em um dos casos, apresentado mais à frente, é utilizado o outro valor possível para o laminado S&P CFK 200/2000 pela insuficiência do outro escolhido.

O tipo de CFRP utilizado será um laminado externamente aderido porque existe mais informação sobre a técnica, tornando-a mais segura e porque promove uma área de secção transversal maior. Os laminados inseridos exibem uma maior força de aderência, mas apresentam secções significativamente menores.

Para o externamente aderido não é possível escolher a resina utilizada.

A imagem seguinte apresenta a escolha do material, o tipo de aplicação e várias características do material.

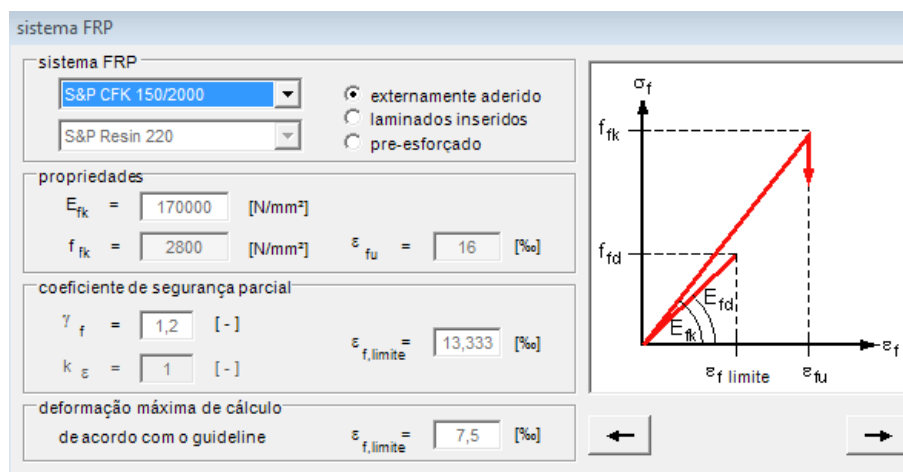


Figura 5.2.36 - Menu de escolha do CFRP (Lamella)

Designações:

- E_{fk} – Módulo de elasticidade do CFRP;
- f_{fk} – Resistência à tração;
- ε_{fu} – Extensão última;
- γ_f – Coeficiente de segurança parcial (depende do guia de cálculo escolhido);

- k_ε – Fator de redução para o limite de extensão;
- $\varepsilon_{f,lim}$ – Extensão limite;
- γ_E – Fator de redução para o módulo de elasticidade (pré-selecionado igual a 1.2).

A próxima imagem apresenta o submenu para a escolha dos materiais:

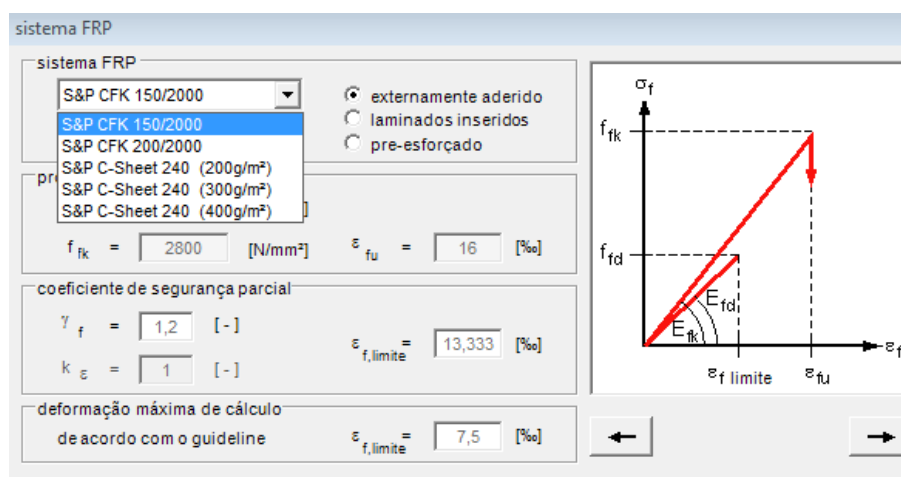


Figura 5.2.37 - Apresentação do submenu de escolha (Lamella)

Nota:

Para o reforço à flexão será recomendada a utilização dos laminados porque são mais eficientes e não apresentam uma deformabilidade muito elevada, quando comparado com as mantas. As mantas são muito utilizadas para reforço ao confinamento e para o esforço transversal.

Um dos pontos a considerar para as mantas é que necessitam de confinar as peças completamente, sendo em alguns casos difícil. Numa situação de uma viga, na prática só poderá ser aplicada a manta em três faces, visto que a superior apresenta algum elemento por cima, no caso de uma viga retangular, sendo impossível a aplicação normal da manta. Nestas situações é recomendado que se faça o encastramento da manta no elemento que está acima do pilar para garantir o bom funcionamento do sistema.

O S&P Resin 50 é utilizado para preenchimento das ranhuras na zona de momentos negativos em lajes.

5.2.1.2.11 A SECÇÃO TRANSVERSAL DO FRP

O menu permite escolher a área de FRP para o reforço. Como o reforço depende dos vários componentes apresentados, será necessário fazer algumas iterações para conseguir um resultado positivo.

A imagem seguinte representa a primeira iteração e a segunda imagem vai apresentar os valores que permitem o reforço da estrutura.

Figura 5.2.38 - Escolha dos valores para primeira iteração (Lamella)

A secção pode ser escolhida considerando um submenu semelhante aos anteriores. A designação da secção é feita considerando a largura do laminado w_f , neste caso 50 mm seguido da espessura t_f do mesmo, neste caso 1.2 mm (nos desenhos será aumentado o valor para ser mais perceptível).

É de notar que o número de camadas, n_f terá de ser no máximo igual a dois (na maioria das vezes considera-se igual a um), devido à diminuição da eficiência do reforço e devido à pouca aderência da superfície dos laminados. Para laminados inseridos na peça o número de camadas será no máximo igual ao anterior.

O valor m_f representa o número de laminados aplicados pela configuração assinalada pelo retângulo vermelho, o s_f representa o espaçamento entre os laminados considerados a partir do centro geométrico dos mesmos, o valor A_f é a área total de CFRP e o valor z_f representa a profundidade onde o laminado será inserido (como o pilar tem 40 cm, então será esse o valor onde o laminado será inserido).

Para verificar se o valor permite reforçar a secção é necessário averiguar os retângulos coloridos, especialmente o valor M_{Rd} (representa o valor resistente da secção considerando o reforço escolhido). Se o reforço for suficiente a cor apresentada será azul, como demonstra a figura seguinte:

seção transversal do FRP

reforço de FRP

No.	seção [mm/mm]	n_f [pcs]	m_f [pcs]	s_f [cm]	A_f [cm²]	z_f [cm]
1	50 / 1.2	1	2	29	1,2	40
2	50 / 1.2	1	0	0	0	0
3	50 / 1.2	1	0	0	0	0

$s_{f,max}$ $z_{f,min}$ 32

distancia até a extremidade
 a_r = 3 [cm] $a_{r,min}$ = 3 [cm]

dimensionamento

a dimensionar

seção transversal do FRP momento flector

$A_{f,nec}$ = 1,16 [cm²] M_{Ed} = 112,6 [kNm]
 $A_{f,efet}$ = 1,2 [cm²] M_{Rd} = 113,4 [kNm]

$M_{Rd} > M_{Ed}$

seção não reforçada

M_{Rd0} = 72,8 [kNm]
 M_{Re0} = 76,5 [kNm]

nível de reforço

$\eta_M = \frac{M_{Ed}}{M_{Rd0}} = 1,55$ [-]

factor de segurança em caso de perda do reforço

$\gamma_{Me} = \frac{M_{Re0}}{M_{Ek}} = 0$ [-]

Figura 5.2.39 - Iteração capaz de resistir ao pretendido (Lamella)

Outras designações:

- $s_{f,max}$ – Espaçamento máximo:
 - Poderá ser calculado segundo as fórmulas:

$$s_{f,max} = 5h, \quad \text{lajes} \quad (161)$$

$$s_{f,max} = 0.2l, \quad \text{distância entre apoios} \quad (162)$$

$$s_{f,max} = 0.4l, \quad \text{comprimento do banzo} \quad (163)$$

- $z_{f,min}$ – Profundidade mínima;
- a_r – Distância lateral das faixas á extremidade lateral da secção:

- Requerida apenas para o cálculo da força de aderência para laminados inseridos;
- Para os sistemas aplicados externamente utiliza-se a distância mínima $a_{r,min}$ (recomendado que seja igual a 3 cm).

O valor η indica o rácio entre o momento de cálculo M_{Ed} da peça no estado reforçado e o momento resistente da peça M_{Rd0} . Considerando o documento alemão, o η terá de ser inferior a dois para reforços externamente aderidos.

5.2.1.2.12 REFORÇO TRANSVERSO

Para o reforço transversal não será efetuada a verificação porque os esforços transversos são muito reduzidos, no entanto, considerando as capacidades relacionadas com o aumento da resistência do betão, será recomendada a aplicação de duas camadas S&P C-Sheet 240 (300g/m²) para garantir um pouco mais segurança.

A manta poderá ser aplicada em toda a altura do pilar ou poderá ser aplicada, por exemplo, onde estão a maior percentagem de armadura transversal (zonas mais desfavoráveis).

5.2.1.2.13 CASOS PARTICULARES

Esta secção tem como objetivo dar a conhecer casos particulares que possam ocorrer no decorrer do procedimento.

Para fazer o reforço do pilar P18 na secção [rampa] foi necessário aplicar uma redução igual a 30% do valor existente. Isto ocorreu porque o programa deu um erro relativo à incapacidade de o pilar ser capaz de resistir ao momento instalado antes do reforço. A imagem seguinte apresenta o erro obtido:

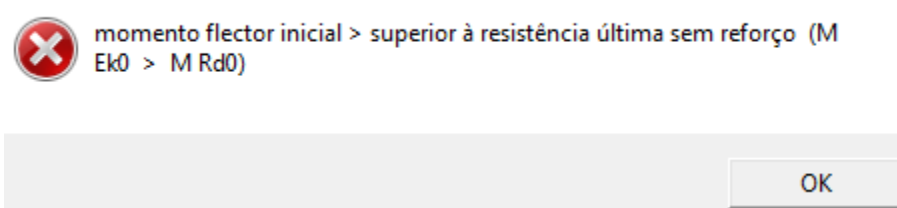


Figura 5.2.40 - Erro incomum de incapacidade resistente (Lamella)

Este erro em situações normais nunca vai ocorrer, porque significava que o elemento a ser estudado não tem capacidade para resistir aos momentos ou esforços axiais

presentes antes de acontecer alguma coisa (edifício numa situação normal de utilização sem qualquer necessidade extra). No caso, como não há qualquer informação sobre os esforços antes (às vezes não é fácil obter esses valores), teve de ser feito dessa forma, podendo sempre haver imprevistos destes, porque são utilizados valores hipotéticos.

O próximo caso particular não aconteceu no decorrer das simulações (provocado para exemplificação), mas, se a extensão do betão ϵ_c for igual à extensão última do betão ϵ_{cu} , o cálculo é comandado pela falha na zona de compressão ao invés da zona de tração. Neste caso o reforço na zona tracionada com FRP não será razoável.

A imagem seguinte demonstra a mensagem que apareceu:

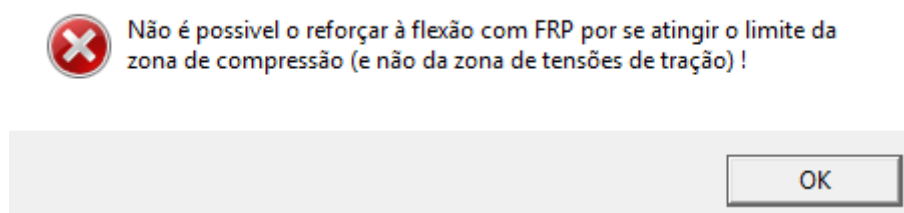


Figura 5.2.41 - Erro relativo à falha na zona de compressão (Lamella)

Para resolver este problema poderão ser aplicados dois métodos.

- Aplicação de mantas ou tecidos para garantir bom confinamento do elemento:
 - O confinamento do betão melhora a capacidade resistente do mesmo;
- Aplicação de laminados na zona comprimida para servir com reforço.

Tendo em consideração as dicas dos autores do **artigo 2.1** é possível duplicar a capacidade resistente do betão com envolvimento completo, para betões entre 30 MPa e 40 MPa (pilares circulares), utilizando uma manta com 0.167 mm de espessura. Tendo isso em consideração poderá ser considerado, de uma forma muito conservativa, para garantir segurança, que para um betão de 14 MPa o aumento será bastante mais reduzido, podendo aumentar 1 ou 2 MPa.

Para a aplicação das mantas ou tecidos mencionados para o aumento da resistência, poderão ser aplicados os seguintes pontos:

- Raio de boleamento das arestas igual a 3 cm (mínimo 2.5 cm):
 - Garantia de mais segurança sem comprometer muito a secção útil da peça.
- Envolvimento completo de quatro camadas (muito provavelmente um exagero, no entanto dada a falta de informação é preferível presar pela segurança) com espessura igual a 0.176mm.

- Quando são aplicadas mantas ou tecidos num elemento com reforço à flexão é necessário que as mantas estejam por cima do mesmo para garantir um melhor confinamento do sistema na sua totalidade, diminuindo a possibilidade do sistema de flexão se soltar e permitir, ao mesmo tempo, o aumento da resistência do sistema.

Fazendo contrário, a aplicação dos laminados em cima das mantas, ia originar tensões muito elevadas nas zonas onde estão aplicados os laminados, originando, muito rapidamente, fenómenos de rutura e porque o atrito superficial das mantas é muito baixo, impossibilitando assim a aplicação correta do laminado (razão para não serem utilizadas muitas camadas [o número máximo de camadas para as mantas é igual a cinco]).

5.2.1.2.14 RESULTADOS

Este ponto serve para apresentar os resultados obtidos do programa e a tabela resumo com os reforços.

As figuras seguintes apresentam os resultados da simulação bem-sucedida:

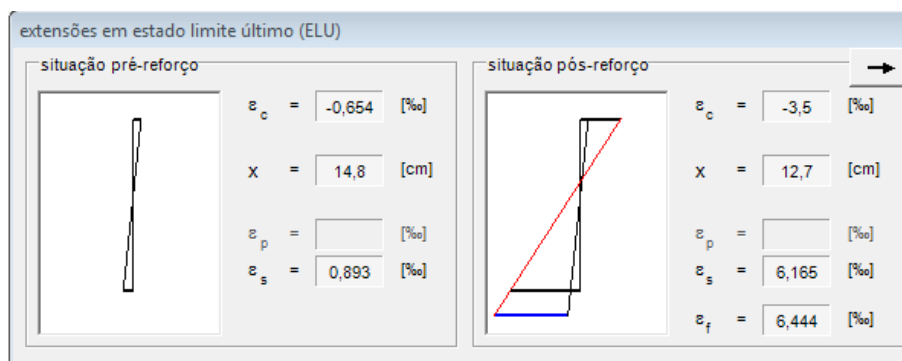


Figura 5.2.42 – Primeiros resultados para o estado limite último (Lamella)

Na figura acima são apresentados os diagramas de extensões relativas à situação inicial (secção menos importante para o caso presente porque os valores foram hipotéticos) e os valores para a situação após o reforço à direita.

Os valores apresentados representam:

- ε_c – Extensão do betão na extremidade comprimida;
- x – Representa a profundidade do eixo neutro:
 - O valor é menor para a situação pós-reforço devido ao aumento das tensões na zona mais inferior da peça oriundos do reforço.
- ε_p – Representa a extensão do aço pré-esforçado, incluindo a extensão inicial devido ao pré-esforço;
- ε_s – Extensão das armaduras ordinárias;

- ε_f – Extensão do material FRP.

Considerando que o reforço está a aplicar uma tensão superior que o aço será de esperar que a extensão seja ligeiramente maior que a do aço, considerando as suas propriedades, tal como foi verificado.

A imagem seguinte apresenta o segundo resultado:

Figura 5.2.43 - Segundos resultados (Lamella)

Como no caso não foi considerado qualquer informação relativa ao estado de serviço (explicação para os resultados).

À esquerda são apresentados os vários valores da extensão equivalentes aos anteriores para a situação de serviço.

À direita são apresentados os valores da tensão máxima σ_{limite} do EC2. OS valores apresentados estão de acordo com as combinações características de ações.

A tabela resumo seguinte apresenta os valores considerados para o reforço dos vários pilares, assim:

40x40	Cobert.		P.1		P.0		P.-1		P.-2		P.-3		Rampa		Reforço
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	
P1			50/1,2		50/1,2						50/1,2		50/1,2		secção nf mf sf
			1		1						1		1		
			2		3						1		2		
			29		14,5						0		29		
P10			50/1,2		50/1,2								60/1,4		
			1		1								1		
			2		3								2		
			29		14,5								28		
P12											50/1,2		60/1,4		
											1		1		
											3		3		
											14,5		14		
P18													50/1,2		
													1		
													2		
													9,3		

Tabela 16 - Tabela resumo dos reforços

O valor selecionado representa a secção demonstrada na simulação. É possível observar que algumas das células apresentam cores variadas. A tabela seguinte representa a legenda efetuada durante a construção da tabela, assim:

	Para fazer estes reforços foi necessário diminuir o valor "inicial" para 30% do existente. Não existe necessidade de mudar para os outros pilares porque este valor não vai afetar a quantidade de reforço.
	Não há necessidade de reforço.

Tabela 17 - Legenda da tabela resumo dos reforços

5.2.2 PAREDE DA CAIXA DE ELEVADOR

Inicialmente foi previsto o reforço das paredes da caixa de elevador (edifício da Lousã), no entanto não foi possível realizar o pretendido porque nenhuma das paredes necessitava de reforço, pelo que não foi considerado.

Não foi considerado a possibilidade para o projeto de PEC porque não havia qualquer parede ou muro mencionado.

Este ponto foi deixado apenas para dar a conhecer a razão pela qual não foram dimensionados estes elementos e para dar a conhecer, de uma forma mais simplificada, como seria o processo de dimensionamento.

A imagem seguinte apresenta a secção a considerar:

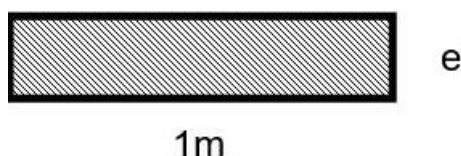


Figura 5.2.44 – Secção da parede

O processo de cálculo será muito semelhante ao demonstrado para a flexão dos pilares, mudando apenas a consideração da secção (como se uma laje na vertical se tratasse, representado acima), as respetivas armaduras e os esforços.

Em anexo, na parte dos esforços e armaduras, estão apresentados os esforços das paredes (é de notar que uma das paredes não apresenta esforços, porque não estavam disponíveis).

6 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O objetivo da dissertação foi, de certa forma, averiguar as várias capacidades do sistema do compósito com fibras de carbono e dar a conhecer um pouco desta tecnologia. Nas várias pesquisas efetuadas foi concluído que este sistema apresenta uma vasta gama de aplicações, sendo cada vez mais importante a aposta de soluções muito adaptáveis (especialmente pela adição das mantas e tecidos altamente resistente que podem ser aplicados nas superfícies mais complexas) e económicas (pensando a longo prazo).

Foi concluído que para a análise dos pilares o confinamento não apresenta um grande problema para a grande maioria das situações (apenas em situações muito desfavoráveis). O grande vilão nesta situação é a ação dos momentos que tornam as análises mais complexas.

O programa de cálculo apresenta-se como uma opção interessante para a avaliação da necessidade de reforço e as respetivas verificações. É, no entanto, de notar que a utilização dos programas implica um conhecimento prévio da situação antes da intervenção, onde na maioria das situações é pouco provável, especialmente para estruturas mais antigas.

Considerando o seu comportamento resistente muito elevado (Tensões de cedência à tração muito elevadas, um peso muito reduzido, uma rigidez elevada [necessário muita atenção para não afetar demasiado a ductilidade da estrutura], elevado módulo de elasticidade, entre outras, é possível começar a entender realmente o porquê de ser uma solução muito desejável.

Ao longo da investigação foi notado que a maior preocupação dos sistemas compósitos está relacionada com os adesivos e resinas, pelo que é necessária mais investigação sobre as suas várias propriedades. Esta investigação será de teor importantíssimo para o desenvolvimento destes sistemas, não só para melhorar os materiais adesivos existentes como potencialmente desenvolver novos materiais.

Foi demonstrado que é possível reforçar uma estrutura conhecendo os vários estados da mesma, antes e após a intervenção, de forma a garantir que a estrutura cumpra a sua função com a maior segurança e aumentando a sua vida útil.

Dentro da investigação a ser realizada está um ponto muito importante relacionado com a resposta dos adesivos a temperaturas muito elevadas durante um incêndio, especialmente devido ao efeito quase instantâneo do fogo. O efeito é muito parecido com o ocorrido com a madeira, onde existe a carbonização do material orgânico na superfície exposta a altas temperaturas. A espessura dessa camada aumenta tendo em consideração vários fatores, sendo os mais consideráveis a temperatura e o tempo de exposição.

Como a espessura destas soluções é muito reduzida, o fenómeno destrói as resinas completamente muito rapidamente, pelo que tem de ser muito bem protegido, daí a necessidade de mais investigação para melhorar este ponto.

Um outro projeto muito interessante é a realização de um repositório de informação onde os profissionais possam obter toda a informa necessária, incluindo as várias formas de cálculo apresentadas nos vários artigos publicados tal como a informação existente sobre os vários processos e materiais disponíveis. Esse documento seria uma etapa mais próxima da normalização e da criação de documentos oficiais que ditariam exatamente o que é necessário fazer, visto que a informação atual está espalhada por todo o lado.

Um outro ponto muito importante é tornar os vários métodos de cálculo mais intuitivos, não apenas para facilitar os utilizadores, como para melhorar a eficiência do trabalho.

Um dos pontos pretendidos deste documento é a apresentação mais intuitiva dos vários métodos de cálculo, no entanto o objetivo foi parcialmente concluído, ou seja, dadas as formas existentes não foi possível melhorar muito a apresentação dos métodos. Algo poderia ter sido melhorado se fossem realizadas algumas experimentações com os materiais e, desse facto, recomendar a utilização de certos valores em processos iterativos, por exemplo, que iam ajudar uma pessoa que estaria a tentar utilizar o documento como guia.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARVALHO, J.C.C. (2021). Dimensionamento de Dimensionamento de Reforços em Compósitos Reforçados com Polímeros de Fibra, em Elementos Estruturais de Betão Armado, Dissertação de Mestrado, ISEC, Setembro 2021;

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

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

CNR (2004). Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction – National Research Council, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures, 2004;

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;

FIGUEIRA, S.P.S. (2016). Reforço de Pilares por Confinamento com Mantas de Fibras de Carbono Avaliação de modelos de comportamento, Dissertação de Mestrado, Universidade da Madeira, fevereiro 2016

BARROS, J. (2004). Materiais Compósitos no Reforço de Estruturas. Jornadas de Engenharia Civil. Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil;

CORREIA, J. RAMÔA (2012). Utilização de Materiais FRP na Reabilitação e Reforço de Estruturas, Instituto Superior Técnico;

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;

<https://1library.org/article/constitui%C3%A7%C3%A3o-dos-comp%C3%B3sitos-frp-pol%C3%ADmeros-refor%C3%A7ados-fibras-frp.gmw05xwz>

<https://www.scirp.org/journal/articles.aspx?searchcode=+CFRP&searchfield=keyword>

<https://mechanicalland.com/hand-lay-up-open-molding-of-frp-laminates/>

<http://www.fiberprofil.com/pt/pultrus-o/que-es/>

<https://www.sp-reinforcement.eu/en-EU/projects/earthquake-reinforcement-mythencenter-schwyz-switzerland>

<https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/116012>

<https://www.researchgate.net/journal/Journal-of-the-Japan-Society-for-Composite-Materials-0385-2563/12>

<https://www.miuraboard.com/frp-composite/>

<http://green.fibrenamics.com/infusao-por-vacu>

<https://bfginternational.com.br/pt/compositos/processos/infusao-a-vacuo/>

<https://www.rhinocarbonfiber.com/retrofitting-masonry-walls-using-cfrp/>

<https://www.rhinocarbonfiber.com/walls-with-openings-strengthened-with-cfrp/>

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9105878/>

CARLOS, T.B. (2019). Experimental and Numerical Analysis on the Structural Behavior of RC Beams Strengthened with CFRP Laminates Under Fire Conditions, Tese de Doutoramento em Engenharia de Segurança ao Incêndio, Universidade de Coimbra, Abril 2019;

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;

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

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

DIAS, S. & BARROS, J. (2010). Aplicação da técnica de inserção de laminados de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado, Congresso Nacional de Mecânica Experimental, Abril 2010;

BISCAIA, H. & CHASTRE, C. & SILVA, M. AG. & FRANCO, N. (2016). Ligações em superfícies curvas entre compósitos de FRP e betão sujeitas a temperaturas elevadas, Novembro 2016;

RIBEIRO, S. & ULRICH 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;

CRUZ, J.M.S. & BARROS, J.A.O. (2002). Caracterização experimental da ligação de laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento, Dissertação de Doutoramento, Universidade do Minho, Setembro 2002;

QIU & QIWEN & LAU, D. (2016). “The Sensitivity of Acoustic-Laser Technique for Detecting the Defects in CFRP-Bonded Concrete Systems”, Journal of Nondestructive Evaluation.

BARROS, J. & FERREIRA, D. (). CFRP-Based Confinement Strategies for RC columns- experimental and analytical research, Universidade do Minho;

SILVA, P.A.S.C.M. (2008). Comportamento de Estruturas de Betão Reforçadas por Colagem Exterior de Sistemas de CFRP, Dissertação de Doutoramento, Universidade do Porto, Outubro 2008;

FERREIRA, D. & BARROS, J. (2003). Mantas de CFRP no confinamento de elementos de betão submetidos a compressão, Dissertação de Doutoramento, Universidade do Minho, Junho 2003;

WILLIAMS, J. L. (2009). Fatigue of Masonry Walls with Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP) Applied Externally for Out-of-Plane Loads, Universidade da California, Agosto 2009;

MCDANIEL, G. & KNIGHT, C. (2014). Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites, Design Training Expo;

<https://www.sp-reinforcement.eu/en-EU/datasheets> - S&P FRP Systems

<https://www.sp-reinforcement.eu/en-EU/application-guidelines> - S&P FRP Systems

ESTEVEES, J.L. & LOUREIRO, N.C. & VIEIRA, P. & BENTO, J.P. (2003). Reabilitação de estruturas de betão reforçadas com CFRP usando o método de enrolamento filamentar, Universidade do Porto;

FERREIRA, D. & BARROS, J. (2008). Confinamento de pilares de betão armado reforçados total e parcialmente com mantas de CFRP submetidos a carregamentos cíclicos de compressão, Universidade do Minho, Janeiro 2008;

AGANTE, M. & JÚLIO, E.N.B.S. & BARROS, J.A.O. & SANTOS, J.M.C. (2008). Active CFRP - Based Confinement Strategies for RC Columns with Rectangular Cross Sections, Artigo de Conferência, Agosto 2008;

UEDA, T. (2016). FRP for Construction in Japan, Shenzhen University, Março 2016.

BARROS, J.A.O. & FERREIRA, D.R.S.M. & VARMA, R.K. (2008). CFRP – Confined Reinforced Concrete Elements Subjected to Cyclic Compressive Loading, Universidade do Minho;

SILVA, V.D. & SANTOS, J.M.C. (2001). Strengthening of axially loaded concrete cylinders by surface composites, Artigo, Janeiro 2001;

PURDUE ECT TEAM. (2007). Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Laminates for Structural Strengthening, Purdue University, Janeiro 2001;

BARROS, J. & COSTA, I. (2010). Avaliação do desempenho de ensaios de caracterização da ligação FRP-betão, Encontro Nacional Betão Estrutural;

CORREIA, J.R. (2012). A Utilização Estrutural de Perfis Pultrudidos de GFRP, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Novembro 2012;

MACHIDA, A. & UOMOTO, TAKETO. (1996). Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcement Materials, JSCE Research Subcommittee on Continuous Fiber Reinforcing Materials, Setembro 1996;

CZADERSKI, C. (2021). Application of externally bonded reinforcement, EBR, Empa, Dezembro 2021.

8 ANEXOS

8.1 Outros Reforços

8.2 Esforços e armaduras

8.3 Peças desenhadas [reforços]

8.4 Imagens do excel de dimensionamento

Anexos

Outros Reforços

O objetivo deste documento é apresentar os vários resultados dos reforços apresentados nas várias tabelas resumo do documento principal, considerando que os resultados apresentados nesse documento não vão aparecer neste.

1. PILARES

1.1. CONFINAMENTO

1.1.1. PILAR.1 (P1)

1.1.1.1. PISO.1

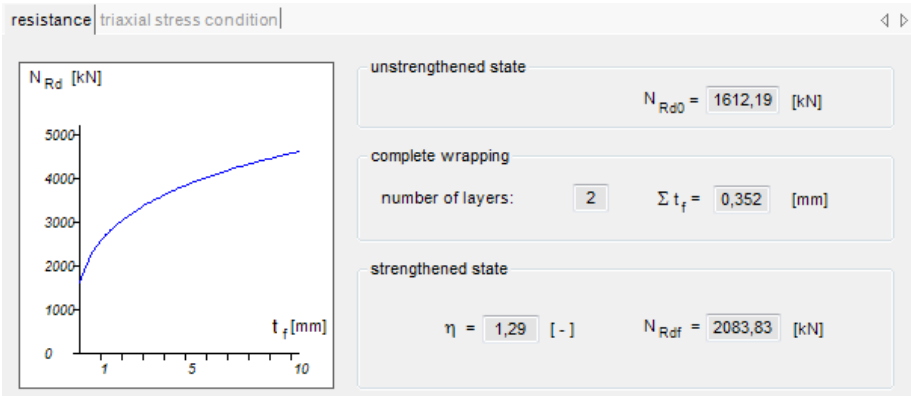


Figura 1.1-1 - Resultado.1 (Colonna)

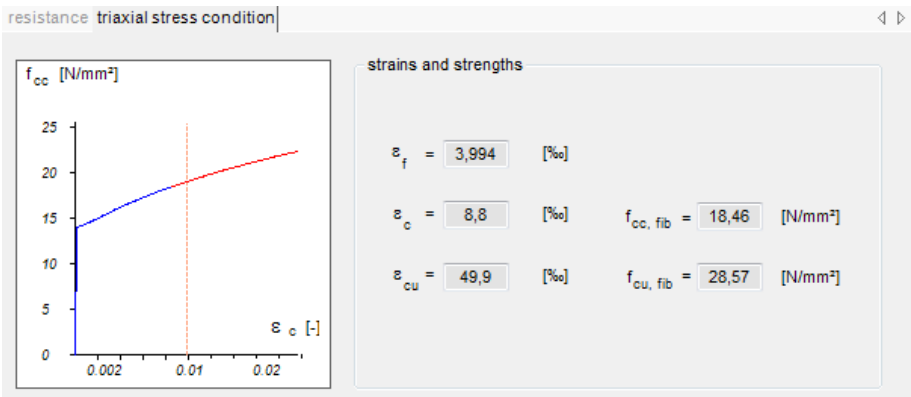


Figura 1.1-2 - Resultado.2 (Colonna)

1.1.2. PILAR.2 (P2)

1.1.2.1. PISO. R/C

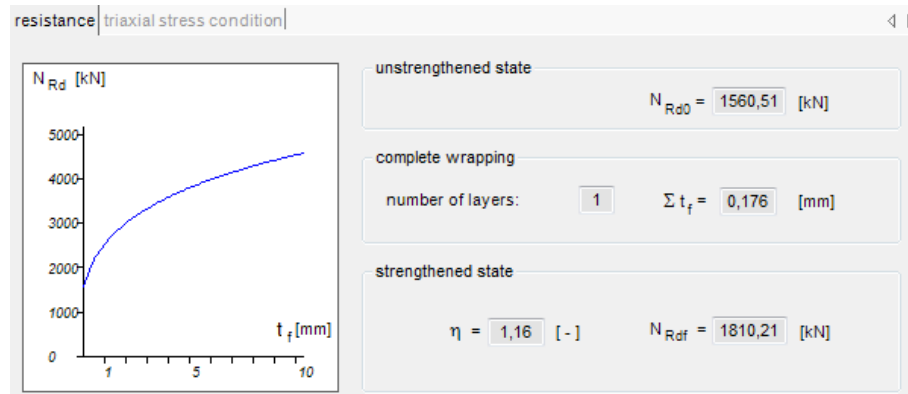


Figura 1.1-3 - Risultado.1 (Colonna)

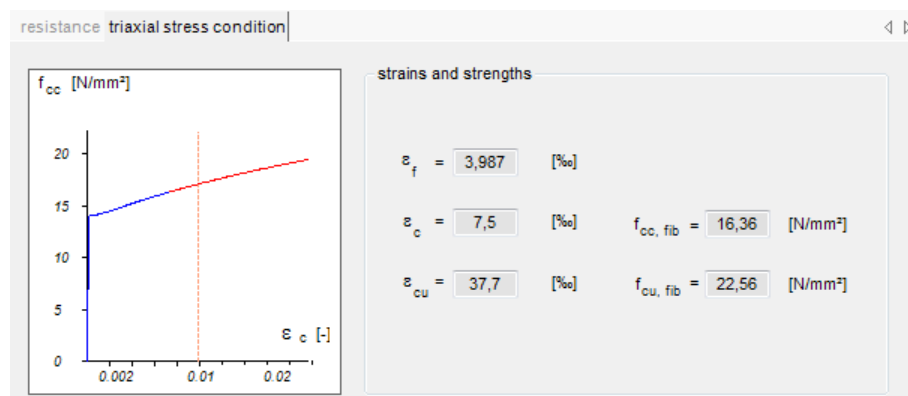


Figura 1.1-4 - Risultado.2 (Colonna)

1.1.3. PILAR.3 (P3)

1.1.3.1. PISO.R/C

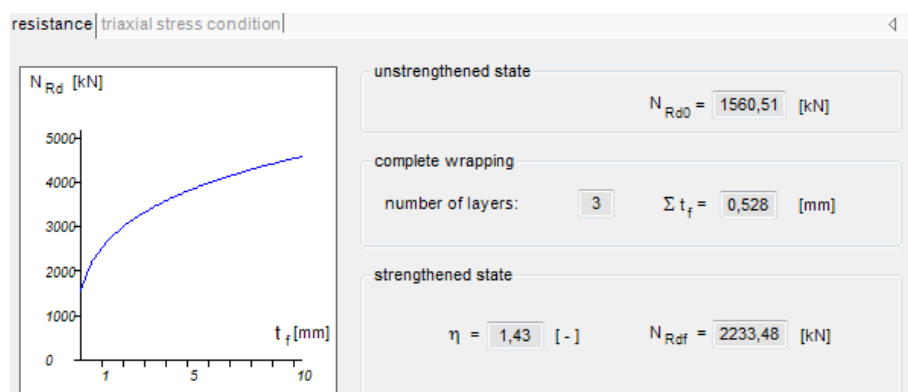


Figura 1.1-5 - Risultado.1 (Colonna)

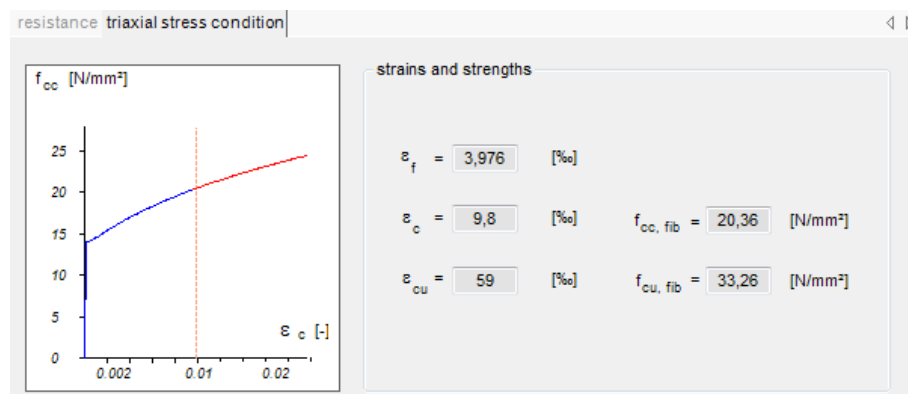


Figura 1.1-6 - Risultato (Colonna)

1.1.4. PILAR.4 (P4)

1.1.4.1. PISO.R/C

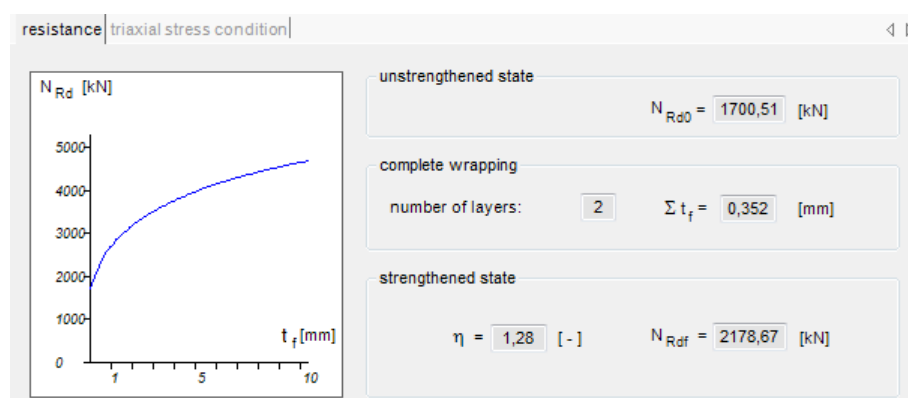


Figura 1.1-7 - Risultato.1 (Colonna)

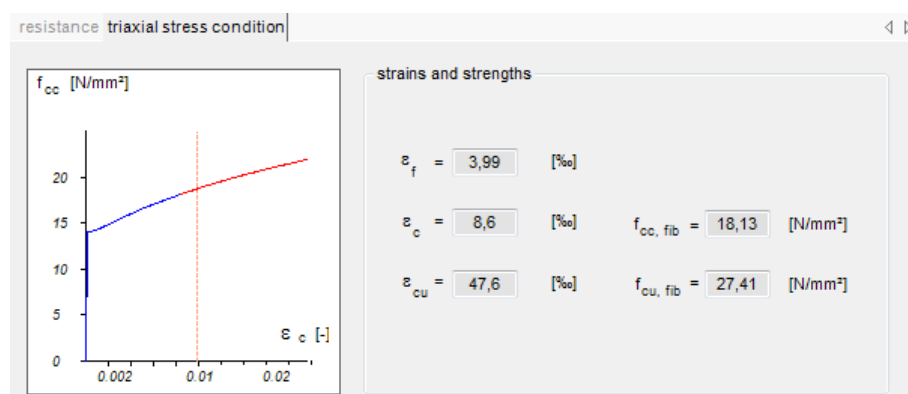


Figura 1.1-8 - Risultato.2 (Colonna)

1.2. FLEXÃO

Como os resultados não apresentam os valores escolhidos para o reforço, será demonstrada a tabela que está presente no documento principal para melhorar a compreensão.

40x40	Cobert.		P.1		P.0		P.-1		P.-2		P.-3		Rampa		Reforço
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	
P1				50/1,2		50/1,2						50/1,2		50/1,2	secção nf mf sf
				1		1						1		1	
				2		3						1		2	
P10				29		14,5						0		29	
				50/1,2		50/1,2								60/1,4	
				1		1								1	
P12				2		3								2	
				29		14,5								28	
												50/1,2		60/1,4	
P18												1		1	
												3		3	
												14,5		14	
P18														50/1,2	
														1	
														2	
														9,3	

Tabela 1 - Tabela resumo dos reforços

É de notar que a apresentação dos resultados será feita da esquerda para a direita, seguida da mudança de linha.

Não foi apresentada a tabela no confinamento porque o resultado é obtido a partir do método, diretamente.

1.2.1. PILAR.1 (P1)

1.2.1.1. PISO.0

dimensionamento

a dimensionar

secção transversal do FRP

momento flector

$A_{f,nec} = 1,18 \text{ [cm}^2\text{]}$
 $M_{Ed} = 112,6 \text{ [kNm]}$

$A_{f,efet} = 1,8 \text{ [cm}^2\text{]}$
 $M_{Rd} = 120,8 \text{ [kNm]}$

M Rd > M Ed

secção não reforçada

$M_{Rd0} = 86,8 \text{ [kNm]}$
 $M_{Re0} = 76,5 \text{ [kNm]}$

nível de reforço

$\eta_M = \frac{M_{Ed}}{M_{Rd0}} = 1,3 \text{ [-]}$

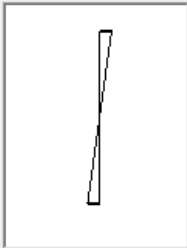
factor de segurança em caso de perda do reforço

$\gamma_{Me} = \frac{M_{Re0}}{M_{Ek}} = 0 \text{ [-]}$

Figura 1.2-1 - Resultado.1 (Lamella)

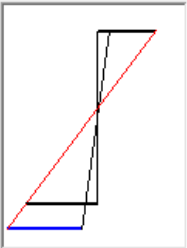
extensões em estado limite último (ELU)

situação pré-reforço



$\varepsilon_c = -0,691$ [‰]
 $x = 16,6$ [cm]
 $\varepsilon_p =$ [‰]
 $\varepsilon_s = 0,76$ [‰]

situação pós-reforço



$\varepsilon_c = -3,5$ [‰]
 $x = 15,6$ [cm]
 $\varepsilon_p =$ [‰]
 $\varepsilon_s = 4,362$ [‰]
 $\varepsilon_f = 4,529$ [‰]

Figura 1.2-2 - Resultado.2 (Lamella)

1.2.1.2. PISO.-3

dimensionamento

a dimensionar

secção transversal do FRP momento flector

$A_{f,nec} = 0,04$ [cm²] $M_{Ed} = 94,9$ [kNm]
 $A_{f,efet} = 0,6$ [cm²] $M_{Rd} = 105,3$ [kNm]

$M_{Rd} > M_{Ed}$

secção não reforçada

$M_{Rd0} = 94,1$ [kNm]
 $M_{Re0} = 76,5$ [kNm]

nível de reforço

$\eta_M = \frac{M_{Ed}}{M_{Rd0}} = 1,01$ [-]

factor de segurança em caso de perda do reforço

$\gamma_{Me} = \frac{M_{Re0}}{M_{Ek}} = 0$ [-]

Figura 1.2-3 - Resultado.1 (Lamella)

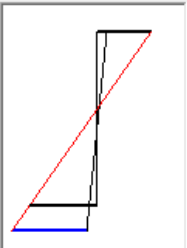
extensões em estado limite último (ELU)

situação pré-reforço



$\varepsilon_c = -0,6$ [‰]
 $x = 18,6$ [cm]
 $\varepsilon_p =$ [‰]
 $\varepsilon_s = 0,528$ [‰]

situação pós-reforço



$\varepsilon_c = -3,5$ [‰]
 $x = 15,5$ [cm]
 $\varepsilon_p =$ [‰]
 $\varepsilon_s = 4,384$ [‰]
 $\varepsilon_f = 4,832$ [‰]

Figura 1.2-4 - Resultado.2 (Lamella)

1.2.1.3. PISO.RAMPA

dimensionamento

a dimensionar

secção transversal do FRP momento flector

$A_{f,nec} = 0,84 \text{ [cm}^2\text{]}$ $M_{Ed} = 108,5 \text{ [kNm]}$

$A_{f,efet} = 1,2 \text{ [cm}^2\text{]}$ $M_{Rd} = 112,9 \text{ [kNm]}$

$M_{Rd} > M_{Ed}$

secção não reforçada

$M_{Rd0} = 94,3 \text{ [kNm]}$

$M_{Re0} = 76,5 \text{ [kNm]}$

nível de reforço

$\eta_M = \frac{M_{Ed}}{M_{Rd0}} = 1,15 \text{ [-]}$

factor de segurança em caso de perda do reforço

$\gamma_{Me} = \frac{M_{Re0}}{M_{Ek}} = 0 \text{ [-]}$

Figura 1.2-5 - Resultado.1 (Lamella)

extensões em estado limite último (ELU)

situação pré-reforço

$\epsilon_c = -0,688 \text{ [‰]}$

$x = 18,1 \text{ [cm]}$

$\epsilon_p = \text{ [‰]}$

$\epsilon_s = 0,639 \text{ [‰]}$

situação pós-reforço

$\epsilon_c = -3,5 \text{ [‰]}$

$x = 17,3 \text{ [cm]}$

$\epsilon_p = \text{ [‰]}$

$\epsilon_s = 3,572 \text{ [‰]}$

$\epsilon_f = 3,764 \text{ [‰]}$

Figura 1.2-6 - Resultado.2 (Lamella)

1.2.2. PILAR.10 (P10)

1.2.2.1. PISO.1

dimensionamento

a dimensionar

secção transversal do FRP momento flector

$A_{f,nec} = 1,16 \text{ [cm}^2\text{]}$ $M_{Ed} = 112,6 \text{ [kNm]}$

$A_{f,efet} = 1,2 \text{ [cm}^2\text{]}$ $M_{Rd} = 113,4 \text{ [kNm]}$

$M_{Rd} > M_{Ed}$

secção não reforçada

$M_{Rd0} = 72,8 \text{ [kNm]}$

$M_{Re0} = 76,5 \text{ [kNm]}$

nível de reforço

$\eta_M = \frac{M_{Ed}}{M_{Rd0}} = 1,55 \text{ [-]}$

factor de segurança em caso de perda do reforço

$\gamma_{Me} = \frac{M_{Re0}}{M_{Ek}} = 0 \text{ [-]}$

Figura 1.2-7 - Resultado.1 (Lamella)

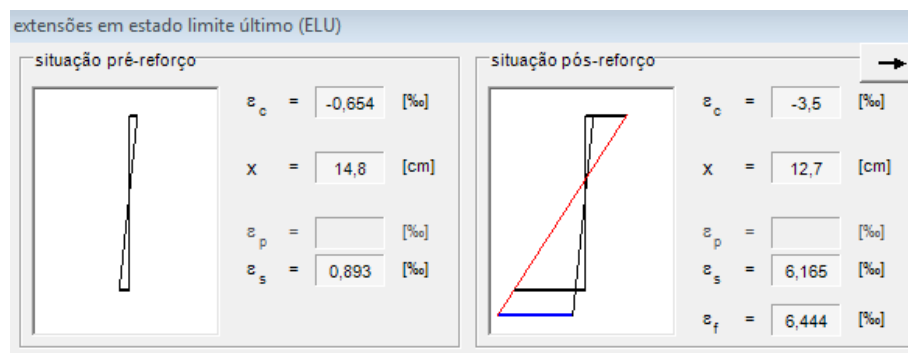


Figura 1.2-8 - Resultado.2 (Lamella)

1.2.2.2. PISO.0

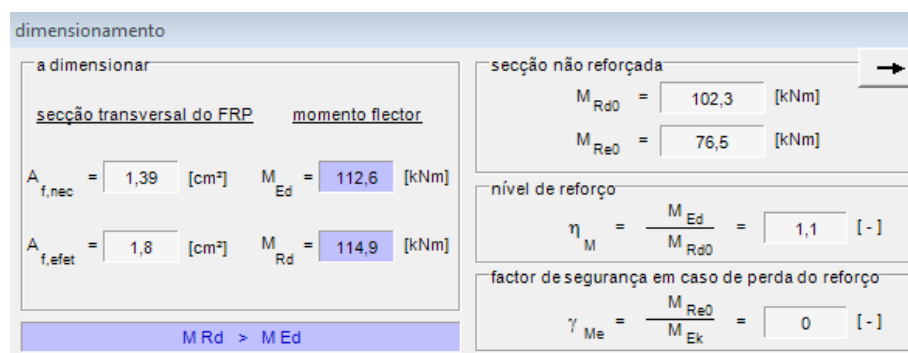


Figura 1.2-9 - Resultado.1 (Lamella)

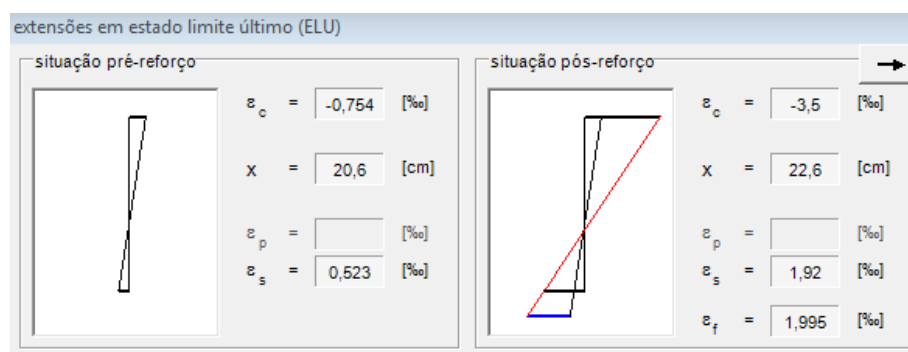


Figura 1.2-10 - Resultado.2 (Lamella)

1.2.2.3. PISO.RAMPA

dimensionamento

a dimensionar

secção transversal do FRP momento flector

$A_{f,nec} = 1,08$ [cm²] $M_{Ed} = 123,4$ [kNm]

$A_{f,efet} = 1,68$ [cm²] $M_{Rd} = 124,1$ [kNm]

$M_{Rd} > M_{Ed}$

secção não reforçada

$M_{Rd0} = 122$ [kNm]

$M_{Re0} = 134,4$ [kNm]

nível de reforço

$\eta_M = \frac{M_{Ed}}{M_{Rd0}} = 1,01$ [-]

factor de segurança em caso de perda do reforço

$\gamma_{Me} = \frac{M_{Re0}}{M_{Ek}} = 0$ [-]

Figura 1.2-11 - Resultado.1 (Lamella)

extensões em estado limite último (ELU)

situação pré-reforço

$\varepsilon_c = -0,758$ [‰]

$x = 24,5$ [cm]

$\varepsilon_p =$ [‰]

$\varepsilon_s = 0,323$ [‰]

situação pós-reforço

$\varepsilon_c = -3,5$ [‰]

$x = 28,8$ [cm]

$\varepsilon_p =$ [‰]

$\varepsilon_s = 0,751$ [‰]

$\varepsilon_f = 0,887$ [‰]

Figura 1.2-12 - Resultado.2 (Lamella)

1.2.3. PILAR 12 (P12)

1.2.3.1. PISO.-3

dimensionamento

a dimensionar

secção transversal do FRP momento flector

$A_{f,nec} = 0,83$ [cm²] $M_{Ed} = 99,6$ [kNm]

$A_{f,efet} = 1,8$ [cm²] $M_{Rd} = 114$ [kNm]

$M_{Rd} > M_{Ed}$

secção não reforçada

$M_{Rd0} = 79,3$ [kNm]

$M_{Re0} = 54,4$ [kNm]

nível de reforço

$\eta_M = \frac{M_{Ed}}{M_{Rd0}} = 1,26$ [-]

factor de segurança em caso de perda do reforço

$\gamma_{Me} = \frac{M_{Re0}}{M_{Ek}} = 0$ [-]

Figura 1.2-13 - Resultado.1 (Lamella)

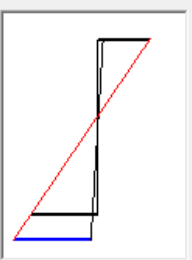
extensões em estado limite último (ELU)

situação pré-reforço



$\varepsilon_c = -0,324$ [‰]
 $x = 16,2$ [cm]
 $\varepsilon_p =$ [‰]
 $\varepsilon_s = 0,387$ [‰]

situação pós-reforço



$\varepsilon_c = -3,5$ [‰]
 $x = 15,5$ [cm]
 $\varepsilon_p =$ [‰]
 $\varepsilon_s = 4,563$ [‰]
 $\varepsilon_f = 5,084$ [‰]

Figura 1.2-14 - Resultado.2 (Lamella)

1.2.3.2. PISO.RAMPA

dimensionamento

a dimensionar

secção transversal do FRP momento flector

$A_{f,nec} = 1,81$ [cm²] $M_{Ed} = 113,5$ [kNm]
 $A_{f,efet} = 2,52$ [cm²] $M_{Rd} = 121,1$ [kNm]

$M_{Rd} > M_{Ed}$

secção não reforçada

$M_{Rd0} = 79,6$ [kNm]
 $M_{Re0} = 54,4$ [kNm]

nível de reforço

$\eta_M = \frac{M_{Ed}}{M_{Rd0}} = 1,43$ [-]

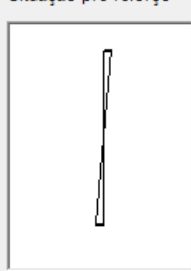
factor de segurança em caso de perda do reforço

$\gamma_{Me} = \frac{M_{Re0}}{M_{Ek}} = 0$ [-]

Figura 1.2-15 - Resultado.1 (Lamella)

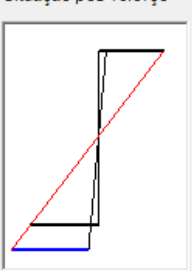
extensões em estado limite último (ELU)

situação pré-reforço



$\varepsilon_c = -0,369$ [‰]
 $x = 15,7$ [cm]
 $\varepsilon_p =$ [‰]
 $\varepsilon_s = 0,466$ [‰]

situação pós-reforço



$\varepsilon_c = -3,5$ [‰]
 $x = 17,3$ [cm]
 $\varepsilon_p =$ [‰]
 $\varepsilon_s = 3,714$ [‰]
 $\varepsilon_f = 4,036$ [‰]

Figura 1.2-16 - Resultado.2 (Lamella)

1.2.4. PILAR.18 (P18)

1.2.4.1. PISO.RAMPA

dimensionamento

a dimensionar

secção transversal do FRP momento flector

$A_{f,nec} = 0,31 \text{ [cm}^2\text{]}$ $M_{Ed} = 117,3 \text{ [kNm]}$

$A_{f,efet} = 1,2 \text{ [cm}^2\text{]}$ $M_{Rd} = 118,5 \text{ [kNm]}$

$M_{Rd} > M_{Ed}$

secção não reforçada

$M_{Rd0} = 116,9 \text{ [kNm]}$

$M_{Re0} = 120,2 \text{ [kNm]}$

nível de reforço

$\eta_M = \frac{M_{Ed}}{M_{Rd0}} = 1 \text{ [-]}$

factor de segurança em caso de perda do reforço

$\gamma_{Me} = \frac{M_{Re0}}{M_{Ek}} = 0 \text{ [-]}$

Figura 1.2-17 - Resultado.1 (Lamella)

extensões em estado limite último (ELU)

situação pré-reforço

$\varepsilon_c = -0,749 \text{ [‰]}$

$x = 24,6 \text{ [cm]}$

$\varepsilon_p = \text{ [‰]}$

$\varepsilon_s = 0,314 \text{ [‰]}$

situação pós-reforço

$\varepsilon_c = -3,5 \text{ [‰]}$

$x = 28,5 \text{ [cm]}$

$\varepsilon_p = \text{ [‰]}$

$\varepsilon_s = 0,787 \text{ [‰]}$

$\varepsilon_f = 0,939 \text{ [‰]}$

Figura 1.2-18 - Resultado.2 (Lamella)

Esforços e Armaduras

Confinamento_ Pilares

P1	40x40	Ned (kN)	Msd,x (kN.m)	Msd,y (kN.m)	Armadura
	R/C	2528,1	37,8	24,3	4φ12 + 4φ10 2φ8a/0,15
	Piso 1	1954,4	64,4	43,2	4φ12 + 4φ10 2φ8a/0,15
	Piso 2	1384,8	62	38,4	4φ12 + 4φ10 2φ8a/0,15
	Piso 3	815,3	71,3	39,4	4φ12 + 4φ10 2φ8a/0,15
	Piso 4	245,1	53,3	43,5	8φ12 2φ8a/0,15

P3	40x40	Ned (kN)	Msd,x (kN.m)	Msd,y (kN.m)	Armadura
	R/C	2123,8	74,3	26,4	4φ12 2φ8a/0,15
	Piso 1	1628,4	133	49,1	8φ12 6φ8a/0,15
	Piso 2	1145,1	121,5	39,6	4φ12 + 4φ10 6φ8a/0,15
	Piso 3	665,8	132,6	40,2	8φ12 6φ8a/0,15
	Piso 4	185,7	106,7	42,2	4φ12 + 4φ10 5φ8a/0,15

P2	40x40	Ned (kN)	Msd,x (kN.m)	Msd,y (kN.m)	Armadura
	R/C	1743,2	23,5	63,6	4φ12 2φ8a/0,15
	Piso 1	1361	44,6	116,8	4φ12 + 4φ10 5φ8a/0,15
	Piso 2	986,5	38,5	94,2	4φ12 + 4φ10 5φ8a/0,15
	Piso 3	613,1	39,1	94,5	4φ12 + 4φ10 5φ8a/0,15
	Piso 4	240,9	38,1	114,2	4φ12 + 4φ10 5φ8a/0,15

P4	35x50	Ned (kN)	Msd,x (kN.m)	Msd,y (kN.m)	Armadura
	R/C	1973,2	24,8	12,7	4φ12 2φ8a/0,15
	Piso 1	1530,1	48,1	23,3	4φ12 2φ8a/0,15
	Piso 2	1096,8	39,1	16,9	4φ12 2φ8a/0,15
	Piso 3	663,5	38,4	16	4φ12 2φ8a/0,15
	Piso 4	232,5	49,6	20,6	4φ12 2φ8a/0,15

Flexão_Pilares

40x40	Cobert.	P.1	P.0	P.-1	P.-2	P.-3	Rampa	
P1	4φ25 & 4φ16 φ8a/20	4φ25 & 4φ16 φ8a/20	4φ25 & 4φ16 φ8a/20	4φ25 & 4φ16 φ8a/20	4φ25 & 4φ16 φ8a/20	4φ25 & 4φ16 φ8a/20	4φ25 & 4φ16 φ8a/20	long. trans.
P10	4φ25 & 4φ16 φ8a/20	4φ25 & 4φ16 φ8a/20	4φ25 & 4φ16 φ8a/20	4φ25 & 4φ16 φ8a/20	4φ25 & 8φ16 φ8a/20	8φ25 & 8φ20 φ8a/25	8φ25 & 8φ20 φ8a/25	
P12	8φ16 & 4φ12 φ6a/15	8φ16 & 4φ12 φ6a/15	8φ16 & 4φ12 φ6a/15	8φ16 & 4φ12 φ6a/15	8φ16 & 4φ12 φ6a/15	8φ16 & 4φ12 φ6a/15	8φ16 & 4φ12 φ6a/15	
P18		8φ16 φ6a/20	4φ20 & 4φ12 φ6a/15	4φ20 & 4φ12 φ6a/15	8φ25 & 2φ16 φ8a/20	8φ25 & 2φ16 φ8a/20	8φ25 & 2φ16 φ8a/20	

40x40	Cobert.	P.1	P.0	P.-1	P.-2	P.-3	Rampa	
P1	24,3 7,8 37,3	49,4 24,4 112,6	175,3 37,3 112,6	203,5 20,6 44,2	231,8 16,5 44,2	260,1 41,6 94,9	263 45,8 108,5	N (kN) Mx (kN.m) My (kN.m)
P10	24,3 7,8 37,3	49,4 24,4 112,6	429,1 24,4 112,6	457,4 17,9 52,6	485,6 15,5 49,5	513,9 40,3 108,7	516,8 44,3 123,4	
P12	24,3 7,8 37,3	49,4 24,4 112,6	170,5 35,9 112,6	198,7 19,8 44,2	227 15,9 44,2	255,2 42,9 99,6	258,2 47,1 113,5	
P18		25,1 8,6 36,9	460,7 44,6 43,8	488,9 32,9 45,4	517,2 18,7 45,4	545,4 47,3 103,2	548,4 52,2 117,3	

Inicalmente	Projectos		Coefficiente de redução dos Esforços
A500	A200	-60%	0,6
C25/30	C14/16,8	-44%	

40x40	Cobert.	P.1	P.0	P.-1	P.-2	P.-3	Rampa	
P1	14,58 4,68 22,38	29,64 14,64 67,56	105,18 22,38 67,56	122,1 12,36 26,52	139,08 9,9 26,52	156,06 24,96 56,94	157,8 27,48 65,1	N (kN) Mx (kN.m) My (kN.m)
P10	14,58 4,68 22,38	29,64 14,64 67,56	257,46 14,64 67,56	274,44 10,74 31,56	291,36 9,3 29,7	308,34 24,18 65,22	310,08 26,58 74,04	
P12	14,58 4,68 22,38	29,64 14,64 67,56	102,3 21,54 67,56	119,22 11,88 26,52	136,2 9,54 26,52	153,12 25,74 59,76	154,92 28,26 68,1	
P18		15,06 5,16 22,14	276,42 26,76 26,28	293,34 19,74 27,24	310,32 11,22 27,24	327,24 28,38 61,92	329,04 31,32 70,38	

Flexão_Paredes

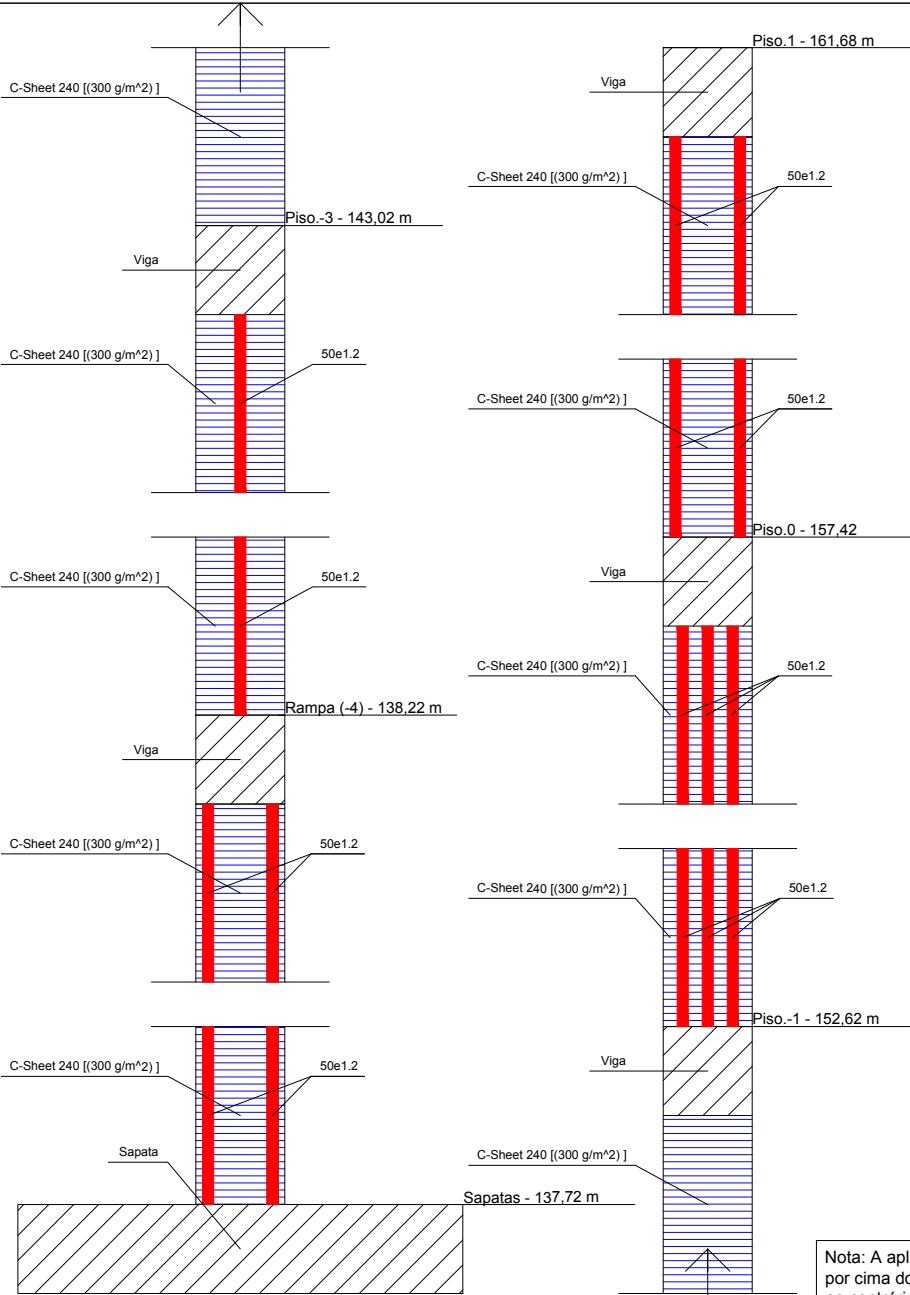
Armadura	long: $\phi 20//0,10$
	trans: $\phi 10//0,10$

40x40	Cobert.	P.1	P.0	P.-1	P.-2	P.-3	Rampa	
P84	-235,39 4,71 0,81	307,26 11,83 -4,57	-898,57 -17,97 1,40	501,39 -5,27 0,16	1309,79 -0,02 -0,13	2211,33 38,62 -0,09	2430,31 -42,59 0,16	N Mx My
	-233,76 -4,69 -1,19	-460,42 -9,21 0,34	-931,08 18,62 -0,60	-605,8 12,12 1,68	1271,26 -0,05 0,01	2152,18 -0,40 0,08	2360,16 42,26 -1,54	
P85								
P87	-272,67 5,45 -0,39	-636,44 -12,73 -1,88	-817,34 16,35 -0,82	-689,97 13,80 -0,22	1518,22 0,00 0,00	2458,06 0,00 0,00	2682,91 45,74 -0,16	

DESENHOS

Flexão (Lousã)					Confinamento (PEC)				
P1	P10	P12	P12		P1	P10	P12	P12	
				Piso.1					Piso.1
				Piso.0					Piso.R/C
				Piso.-3					
				Rampa.(-4)					
Notas:- A manta C-Sheet 240 é aplicada para ajudar no reforço ao esforço transversal e melhorar as propriedades do pilar. - O C-Sheet 240 (300 g/m²) é o tipo de manta e o 2 significa duas camadas (espessura real igual a 0,176 mm); - Nos laminados o 50 indica a largura e o 1.2 indica a espessura (mm); - A espessura dos compósitos foram aumentadas 3x, para melhorar a percepção dos reforços. Como as representações tem por base medidas reais, não se aumentou mais os compósitos porque tornar-se-ia menos real.									

Exemplo da aplicação do laminado numa das faces do pilar P1 (flexão)



Nota: A aplicação das mantas terá de ser feita por cima dos laminados. A representação está ao contrário apenas para evidenciar mais os laminados.

Excel

In

Dimensionamento De Sistemas FRP



Menu com os vários métodos de dimensionamento



Base de dados [tabelas, por ex.]

Este projecto tem como objectivo demonstrar algumas das opções disponíveis para o dimensionamento de reforços com FRP de forma intuitiva e interessante.
O segundo objectivo é melhorar algumas aptidões relacionadas com o programa excel.

José Carlos Santos
Prof.Dr. António Correia

In



Pilares

○ ○ ○

In



Pilares



ACI 440.2R-08 [Axial Puro]

ACI 440.2R-08 [Esforço Transverso]

In



Rectangular

rc:

b:

ffu*:

Ag:

f'c:

 $\phi P_{n.req}$:

tr:

0,33

h:

 ϵ_{fu}^* :

Ast:

 ϕ :

fy:

Ef:

1º - Propriedades do FRP:

Ambiente:

Interior

Fibra:

Carbono

F.redução ambiental, CE:

0,95

ffu:

0,00

 ϵ_{fu} :

0,000

2º - Resistência máxima de confinamento do betão, f'cc:

f'cc:

#DIV/0!

3º - Pressão máxima de confinamento, fl:

Ae/Ac:

#DIV/0!

ka:

#DIV/0!

 ρ_g :

#DIV/0!

fi:

#DIV/0!

4º - Número de camadas, n:

k ϵ : Ψ_f : ϵ_{fe} :

0,0000

Ef:

0

fi/f'c

#DIV/0!

 $\geq 0,08$

?

n:

#DIV/0!

5º - V.extensão axial última do betão confinado, ϵ_{ccu} :

kb:

#DIV/0!

 ϵ'_c :

0,002

 ϵ_{ccu} :

#DIV/0!

 ϵ_{ccu}

#DIV/0!

< 0,01

#DIV/0!

 ≤ 5

Info.

ffu*:

 ϵ_{fu}^* :

Ag:

Ast:

f'c:

 ϕ : $\phi P_{n.req}$:

fy:

tr:

Ef:

k ϵ :

In



Circular

r:

f_{fu}*:A_g:f'_c:φP_{n.req}:t_f: 0,33ε_{fu}*:A_{st}:

φ:

f_y:E_f:

1º - Propriedades do FRP:

Ambiente:

Interior

Fibra:

Carbono

F.redução ambiental, CE:

0,95

f_{fu}:

0,00

ε_{fu}:

0,000

2º - Resistência máxima de confinamento do betão, f'_{cc}:f'_{cc}:

#DIV/0!

3º - Pressão máxima de confinamento, f_l:A_e/A_c:

-

k_a:

1,00

ρ_g:

-

f_l:

#DIV/0!

4º - Número de camadas, n:

k_ε:Ψ_f:ε_{fe}:

0,0000

E_f:

0

f_l/f'_c

#DIV/0!

≥ 0,08

?

n:

#DIV/0!

5º - V.extensão axial última do betão confinado, ε_{ccu}:k_b:

1,00

ε'_c:

0,002

ε_{ccu}:

#DIV/0!

ε_{ccu}

#DIV/0!

< 0,01

#DIV/0!

≤ 5

Info.

f_{fu}*:ε_{fu}*:A_g:A_{st}:f'_c:

φ:

φP_{n.req}:f_y:t_f:E_f:k_ε:

In



Rectangular

rc:

b:

ffu*:

 ϵ_{fe} :

Vf:

 Ψ_f :

tf:

Sf:

h:

 ϵ_{fu} : $k\epsilon$:

Vi:

 ϕ :

Ef:

wf:

1º - Propriedades do FRP:

Ambiente: Exterior

Fibra: Vidro

F.redução ambiental, CE: 0,65

ffu: 0,00

 ϵ_{fu} : 0,0002º - Calcular da extensão, ϵ_{fe} : ϵ_{fe} : 0 $\leq 0,75 \epsilon_{fu}$ $\leq 0,75 \epsilon_{fu}$ 0,0000

3º - Majoração do esf. transverso:

 ΔV_u : 0,00 $V_{f, reqd}$: #DIV/0!

4º - Determinar a área de FRP:

 $A_{fv, reqd}$: #DIV/0!

5º - Determinar o número de camadas, n:

n: #DIV/0!

Info.

ffu*:

 ϵ_{fu} :

Ag:

Ast:

f'c:

 ϕ : $\phi P_n, reqd$:

fy:

tf:

Ef:

 $k\epsilon$:

In



Circular

rc:

r:

ffu*:

 ϵ_{fe} :

Vf:

 Ψ_f :

tf:

Sf:

 ϵ_{fu} *:k ϵ :

Vi:

 ϕ :

Ef:

wf:

1º - Propriedades do FRP:

Ambiente: Exterior

Fibra: Vidro

F.redução ambiental, CE: 0,65

ffu: 0,00

 ϵ_{fu} : 0,0002º - Calcular da extensão, ϵ_{fe} : ϵ_{fe} : 0 $\leq 0,75 \epsilon_{fu}$ $\leq 0,75 \epsilon_{fu}$ 0,0000

3º - Majoração do esf. transverso:

 ΔV_u : 0,00 $V_{f,reqd}$: #DIV/0!

4º - Determinar a área de FRP:

 $A_{fv,reqd}$: #DIV/0!

5º - Determinar o número de camadas, n:

n: #DIV/0!

Info.

ffu*:

 ϵ_{fu} *:

Ag:

Ast:

f'c:

 ϕ : $\phi P_{n,reqd}$:

fy:

tf:

Ef:

k ϵ :

In

ACI 440.2R-08 [Pilar - Axial Pura]				
	Factor de redução			
		Carbono	Vidro	
	Interior	0,95	0,75	0,85
	Exterior	0,85	0,65	0,75
	Ambiente	0,85	0,5	0,7

In



Pilares



Este ponto está relacionado com os elementos construtivos que não estão especificados na tese, como as vigas e as lajes.

Infelizmente não foi possível aplicar outros métodos de dimensionamento primeiramente devido ao tempo e também por alguns dúvidas.

Está também pensado com o âmbito de ser expandido por futuros colegas que pretendam continuar este projecto e, assim, demonstrar o conhecimento de forma interessante e coesa aos professores e aos utilizadores futuros que necessitarem.