

DM

**Reforço de Pilares por Confinamento
com Mantas de Fibras de Carbono**
Avaliação de modelos de comportamento

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Sónia Patrícia Silva Figueira
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL



UNIVERSIDADE da MADEIRA

A Nossa Universidade

www.uma.pt

fevereiro | 2016

**Reforço de Pilares por Confinamento
com Mantas de Fibras de Carbono**
Avaliação de modelos de comportamento

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Sónia Patrícia Silva Figueira

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ORIENTADOR
Paulo Silva Lobo

Resumo

A presente dissertação incide sobre o estudo dos efeitos do confinamento com materiais compósitos de polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP) em pilares de estruturas de betão armado. A motivação para este estudo surge da necessidade de aprofundar conhecimentos acerca do comportamento dos pilares de betão reforçados por confinamento com CFRP, uma vez que a sua aplicação apresenta uma crescente importância, por exemplo, para aumento da resistência e da ductilidade de estruturas de betão armado.

Fez-se, inicialmente, uma breve revisão das técnicas de reforço convencionais utilizadas em pilares de betão armado, com ênfase no reforço exterior com polímeros reforçados com fibras. A elevada resistência à tração, à corrosão e à fadiga, o baixo peso volúmico, a versatilidade e a diversidade dos sistemas comercializados com CFRP tornam este material muito competitivo para este tipo de aplicação.

Na sequência desse estudo, realizou-se uma revisão bibliográfica acerca dos modelos de comportamento que permitem prever o desempenho de pilares de betão confinados com CFRP, sujeitos a esforços de compressão. Como forma de análise desses modelos, desenvolveu-se uma ferramenta numérica em ambiente *Mathworks - Matlab R2015a*, que permitiu a obtenção e posterior comparação dos diagramas de tensão-extensão descritos pelos modelos desenvolvidos por Manfredi e Realfonzo (2001), Ferreira (2007) e Wei e Wu (2011).

Por fim, comparam-se os resultados experimentais de Paula (2003) e de Rocca (2007) com os dos modelos constitutivos referidos anteriormente, analisando-se também a influência de vários fatores na eficácia do confinamento, tais como o boleamento, o número de camadas de CFRP e a geometria da secção transversal. Foram ainda comparados e discutidos resultados relativos ao confinamento parcial de pilares.

Os resultados obtidos indicam que os modelos analíticos representam relativamente bem o andamento das curvas do betão confinado para secções circulares, quadradas e retangulares, verificando-se as principais discrepâncias nestas duas últimas tipologias de secção transversal, dada a dificuldade associada à quantificação de parâmetros associados ao seu comportamento (por exemplo, boleamento de arestas). No entanto, verificou-se igualmente que com um adequado boleamento de arestas (e conseqüente aumento da relação entre o raio de canto e a largura da secção de betão), bem como com um aumento do número de camadas de material compósito, é possível aumentar a tensão resistente e a extensão axial na rotura do betão à compressão.

Palavras-Chave: Reforço de Pilares de Betão; Confinamento; Ductilidade; Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono; Modelos Analíticos de Confinamento

Abstract

This study work focuses on the effects of the confinement with carbon fiber reinforced polymers (CFRP) on reinforced concrete columns. The necessity of researching on the behavior of reinforced concrete columns strengthened with CFRP, given the growing interest in this type of materials, presenting themselves as promising, for example, to increase the strength and ductility of reinforced concrete structures, motivated this research.

To begin with, a review on the traditional strengthening techniques used on reinforced concrete columns was made, with emphasis on carbon fiber reinforced polymers jacketing. High tensile strength, resistance to corrosion, low unit weight, versatility and diversity of the commercialized systems make CFRP an interesting solution for this type of application.

A literature review regarding the analytical models proposed in the literature for prediction of the effects of confinement with FRP was performed. In order to evaluate these models, a numeric tool was developed based on *Mathworks - Matlab R2015a*. This made it possible to obtain and compare the stress-strain response of the models by Manfredi and Realfonzo (2001), Ferreira (2007) and Wei and Wu (2011).

At last, the experimental results of Paula (2003) and Rocca (2007) were compared with the response obtained with the models mentioned above. Also, the influence of several factors on the confinement of concrete columns was assessed. The results on partially confined columns are also compared and discussed.

Overall, the obtained results show that the analytical models make it possible to obtain a good estimate of the response of confined concrete for circular, square and rectangular cross-section columns. The most noticeable discrepancies were observed for the last two cross-section types, mainly due to the difficulty to quantify some parameters (for example, rounded corners). Nevertheless, with adequate rounded corners (higher ratio between corner radius and side length of cross-section) and with an increase of the number of plies, it is possible to increase the peak stress and the ultimate axial strain of concrete under axial compression.

Key Words: Strengthening of Concrete Columns; Confinement; Ductility; Carbon Fiber Reinforced Polymers; Axial Confinement Modelling

Agradecimentos

A todos os que de alguma forma tornaram possível a realização do presente trabalho, desejo expressar o meu mais sincero e profundo agradecimento.

Ao Professor Paulo Silva Lobo, meu orientador, pelos conhecimentos transmitidos, pelo rigor científico exigido e revisão crítica, pela disponibilidade e dedicação demonstrada ao longo deste percurso.

A todos os meus amigos, que de uma forma ou de outra ajudaram na concretização desta dissertação, pelo incentivo e apoio que sempre me passaram.

À minha família, em especial à minha mãe, por terem acreditado em mim, pelas palavras de apreço e incentivo. Sem vós, todo o percurso percorrido ao longo destes cinco anos não seria possível.

À Sara Magalhães e à Beatriz Ornelas, pela amizade, pelo companheirismo, pelo apoio, por todas as palavras certas, pelo incentivo, pela confiança, pela preciosa ajuda na revisão do texto e da bibliografia. Não há palavras para expressar a minha gratidão.

Por último, ao Tiago Ornelas, por toda a dedicação, pelo carinho, pelo amor e paciência demonstrada ao longo de todo este percurso que agora chega ao fim. Sem ti, nada disto seria possível.

Índice

Índice de Figuras.....	iii
Índice de Tabelas.....	vii
Lista de Símbolos.....	ix
1. Introdução.....	1
1.1. Estruturação da tese e objetivos do trabalho	1
1.2. Considerações Iniciais.....	2
2. Reforço de Pilares de Betão.....	5
2.1. Reforço por Adição de Armaduras Exteriores	6
2.1.1. <i>Metálicas</i>	6
2.2. Reforço por Encamisamento	6
2.2.1. <i>Armaduras e Betão</i>	7
2.2.2. <i>Chapas Metálicas</i>	7
2.3. Reforço com Ligas Metálicas com Memória de Forma	7
2.3.1. <i>Confinamento Ativo</i>	8
2.4. Reforço Exterior com Polímeros Reforçados com Fibras	10
2.4.1. <i>Materiais Compósitos</i>	10
2.4.2. <i>Fibras</i>	11
2.4.3. <i>Propriedades físicas e mecânicas típicas de mantas CFRP</i>	13
2.4.4. <i>Matrizes Poliméricas</i>	13
2.4.5. <i>Resinas</i>	14
2.4.6. <i>Processos de Fabrico</i>	15
2.5. Técnica de Colagem.....	15
2.5.1. <i>Vantagens e dificuldades na utilização dos sistemas de FRP no reforço estrutural</i>	19
3. Confinamento	21
3.1. Confinamento de Pilares com CFRP	21
3.2. Tensão lateral de confinamento.....	25
3.2.1. <i>Secções Circulares</i>	25
3.2.2. <i>Secções Quadradas e Retangulares</i>	27
4. Modelos de Comportamento do Betão Confinado	31
4.1. Modelos de confinamento com armaduras de aço.....	31
4.1.1. <i>Modelo de Richart et al. (1928)</i>	31
4.1.2. <i>Modelo de Mander et al. (1988)</i>	32
4.2. Modelos de Confinamento com CFRP	34
4.2.1. <i>Modelo de Fardis e Khalili (1982)</i>	36

4.2.2.	<i>Modelo de Toutanji (1999)</i>	36
4.2.3.	<i>Modelo de Spoelstra e Monti (1999)</i>	39
4.2.4.	<i>Modelo de Manfredi e Realfonzo (2001)</i>	40
4.2.5.	<i>Modelo de Ferreira (2007)</i>	41
4.2.6.	<i>Modelo de Chastre e Silva (2010)</i>	46
4.2.7.	<i>Modelo de Wei e Wu (2011)</i>	50
4.3.	Vantagens e desvantagens dos modelos	55
4.4.	Recomendações - ACI e fib	57
5.	Apresentação, Correlação e Análise de Resultados	59
5.1.	Implementação dos Modelos Analíticos	59
5.2.	Correlação dos modelos analíticos com resultados experimentais.....	59
5.2.1.	<i>Comparação entre os modelos analíticos e os resultados experimentais de Paula (2003).</i> 60	
5.2.2.	<i>Comparação entre os modelos analíticos e resultados experimentais de Rocca (2007)</i>	65
5.3.	Análise de parâmetros que influenciam o confinamento com CFRP	67
5.3.1.	<i>Influência do boleamento na eficácia do confinamento</i>	68
5.3.2.	<i>Influência do número de camadas de CFRP na eficácia do confinamento</i>	71
5.3.3.	<i>Influência da geometria da secção transversal na eficácia do confinamento</i>	75
5.3.4.	<i>Confinamento Parcial</i>	78
6.	Considerações Finais	85
6.1.	Conclusões	85
6.2.	Trabalhos Futuros	87
7.	Referências Bibliográficas	89

Índice de Figuras

<i>Figura 1 - Diagrama esquemático do efeito de memória de forma (adaptado de Chen et al., 2014)</i>	8
<i>Figura 2 - Confinamento ativo de um pilar de betão com SMA pré-esforçado</i>	9
<i>Figura 3 - Comparação da tensão-extensão para um pilar circular por confinamento com diferentes materiais (Adaptado de Janke et al., 2005)</i>	9
<i>Figura 4 - Diagrama comparativo das propriedades à tração das fibras de carbono, aramida e vidro (Paula, 2003)</i>	12
<i>Figura 5 - Secção transversal das fibras de carbono (Luca, 2006).</i>	13
<i>Figura 6 – Diferentes tipologias de elementos de reforço FRP (Correia, 2012)</i>	16
<i>Figura 7 – Compósitos de FRP (Formas Prefabricada e curada “in situ”) (Juvandes, 1999)</i>	17
<i>Figura 8 - Ordem de aplicação do sistema CFRP (Silva, 2013)</i>	18
<i>Figura 9 - Sistema especial de encamisamento automático de pilares (Paula, 2003)</i>	18
<i>Figura 10 - Comportamento à tração de fibras e metais (Juvandes, 1999).</i>	19
<i>Figura 11 – Deformações longitudinais e transversais devido a ação da força axial (Pinheiro, Muzardo & Santos, 2004)</i>	21
<i>Figura 12 - Diagramas da curva tensão-extensão de provete não confinado e de provetes com diferentes níveis de confinamento (Barros, 2007)</i>	23
<i>Figura 13 - Diagramas tensão-deformação do betão submetido a diversos tipos de confinamento (adaptado de Paula, 2003, citado por Rodrigues, 2005)</i>	24
<i>Figura 14 - Influência da secção no desempenho dos pilares confinados com FRP (Rodrigues, 2005)</i>	24
<i>Figura 15 - Exemplos de pormenorizações do sistema de confinamento com FRP (Paula, 2003)</i>	25
<i>Figura 16 – Tensão lateral confinamento em secções circulares (adaptado de Sadeghian & Fam, 2015)</i>	26
<i>Figura 17 - Distribuição da pressão de confinamento antes e depois do reforço com CFRP e arredondamento dos cantos em secções quadradas (adaptado de Sudano & Hanai, 2007)</i>	27
<i>Figura 18 - Distribuição da pressão de confinamento antes e depois do reforço com CFRP e arredondamento dos cantos em secções retangulares (adaptado de Sudano & Hanai, 2007)</i>	27
<i>Figura 19 - Núcleo de betão efetivamente confinado numa secção retangular (Paula, 2003)</i>	28
<i>Figura 20 - Diagrama tensão-extensão axial proposto por Mander et al. (1988) (adaptado de Mander et al., 1988)</i>	32
<i>Figura 21 - Determinação da tensão máxima do betão confinado (adaptado de Mander et al., 1988)</i>	33
<i>Figura 22 - Comparação entre os diagramas tensão-extensão axial do betão não confinado e confinado com aço e com FRP (Adaptado de Spoelstra & Monti, 1999)</i>	34
<i>Figura 23 - Parâmetros do modelo proposto por Toutanji (Adaptado de Toutanji, 1999)</i>	37
<i>Figura 24 - Procedimento iterativo do modelo proposto por Spoelstra e Monti, 1999 (Adaptado de Spoelstra & Monti, 1999)</i>	40
<i>Figura 25 - Curva típica tensão-extensão do betão não confinado e confinado com CRFP (Ferreira, 2007)</i> .	42
<i>Figura 26 - Sistema genérico de confinamento parcial ou total com CFRP (Ferreira, 2007)</i>	44

<i>Figura 27 - Modelo proposto para provetes de secção circular sujeitos à compressão monotónica por Chastre e Silva (Adaptado de Chastre & Silva, 2010)</i>	<i>49</i>
<i>Figura 28 - Curva típica tensão-extensão (Adaptado de Wei e Wu, 2011).....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 29 - Unificação do modelo para várias secções de pilares de betão (Adaptado de Wei & Wu, 2011).....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 30 - Definição do ponto de rotura do betão confinado, para diferentes níveis de confinamento (Adaptado de Wei & Wu, 2011)</i>	<i>52</i>
<i>Figura 31 – Secções transversais dos pilares analisados (Faustino & Chastre, 2015; Paula, 2003)</i>	<i>60</i>
<i>Figura 32 - Ensaio de Paula (2003) versus modelos analíticos em secções circulares: série CC.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 33 - Ensaio de Paula (2003) versus modelos analíticos em secções quadradas com $R = 0$ cm</i>	<i>62</i>
<i>Figura 34 - Ensaio de Paula (2003) versus modelos analíticos em secções quadradas com $R = 2.0$cm</i>	<i>63</i>
<i>Figura 35 - Ensaio de Paula (2003) versus modelos analíticos em secções quadradas com $R = 3.8$cm</i>	<i>63</i>
<i>Figura 36 - Ensaio de Rocca (2007) versus modelos analíticos em secção quadrada: Pilar E3 com $R = 3.05$ cm.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 37 - Ensaio de Rocca (2007) versus modelos analíticos em secção retangular: Pilar B3 com $R = 3.05$ cm.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 38 - Influência do boleamento em secção quadrada com modelo de Manfredi e Realfonzo (2001) .</i>	<i>68</i>
<i>Figura 39 - Influência do boleamento em secção quadrada com modelo de Wei e Wu (2011)</i>	<i>68</i>
<i>Figura 40 - Influência do boleamento em secção retangular com modelo de Manfredi e Realfonzo (2001)</i>	<i>70</i>
<i>Figura 41 - Influência do boleamento em secção retangular com modelo de Wei e Wu (2011).....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 42 - Influência do número de camadas de CFRP com o modelo de Manfredi e Realfonzo (2001) em pilar com secção quadrada</i>	<i>72</i>
<i>Figura 43 - Influência do número de camadas de CFRP com o modelo de Wei e Wu (2011) em pilar com secção quadrada</i>	<i>72</i>
<i>Figura 44 - Influência do número de camadas de CFRP com modelo de Manfredi e Realfonzo (2001) em pilar com secção retangular</i>	<i>73</i>
<i>Figura 45 - Influência do número de camadas de CFRP com modelo de Wei e Wu (2011) em pilar com secção retangular</i>	<i>74</i>
<i>Figura 46 - Influência do número de camadas de CFRP com modelo de Ferreira (2007) em pilar com secção circular.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 47 - Influência da geometria com modelo de Manfredi e Realfonzo (2001)</i>	<i>76</i>
<i>Figura 48 - Influência da geometria com modelo de Wei e Wu (2011)</i>	<i>76</i>
<i>Figura 49 - Sistemas de confinamento parcial (faixas com 45 mm)</i>	<i>78</i>
<i>Figura 50 - Variação do número de faixas de 45 mm no confinamento parcial, comparativamente ao confinamento total.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 51 - Sistemas de confinamento parcial (faixas com 60 mm).....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 52 - Variação do número de faixas de 60 mm no confinamento parcial, comparativamente ao confinamento total.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 53 - Sistemas de confinamento parcial (faixas com 80 mm).....</i>	<i>80</i>

<i>Figura 54 - Variação do número de faixas de 80 mm no confinamento parcial, comparativamente ao confinamento total</i>	<i>81</i>
<i>Figura 55 - Eficácia do confinamento parcial com 4 faixas com larguras de 45, 60 e 80 mm</i>	<i>82</i>
<i>Figura 56 - Eficácia do confinamento parcial com 5 faixas com largura de 45, 60 e 80 mm.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 57 - Eficácia do confinamento parcial com 6 faixas com largura de 45, 60 e 80 mm.....</i>	<i>83</i>

Índice de Tabelas

<i>Tabela 1 - Características típicas dos principais reforços fibrosos (Correia, 2012)</i>	<i>11</i>
<i>Tabela 2 - Propriedades físicas e mecânicas típicas de mantas de CFRP (adaptado de Correia, 2012).....</i>	<i>13</i>
<i>Tabela 3 - Propriedades típicas das resinas mais utilizadas no reforço estrutural (Barros, 2007).....</i>	<i>14</i>
<i>Tabela 4 - Descrição das mantas e tecidos empregues nos sistemas FRP curados "in situ" (Juvandes, 1999)</i>	<i>16</i>
<i>Tabela 5 - Reforço com colagem de tecidos e mantas de FRP ao betão (adaptado de Juvandes, 1999).....</i>	<i>22</i>
<i>Tabela 6 - Vantagens e desvantagens dos modelos de confinamento com FRP.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabela 7 - Características dos pilares analisados.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabela 8 - Geometria dos pilares adotados</i>	<i>76</i>

Lista de Símbolos

Siglas

FRP	- Fiber Reinforced Polymer (Polímeros Reforçados com Fibras)
CFRP	- Carbon Fiber Reinforced Polymer (Polímero reforçado com fibra de carbono)
GFRP	- Glass Fiber Reinforced Polymer (Polímero reforçado com fibra de vidro)
AFRP	- Aramid Fiber Reinforced Polymer (Polímero reforçado com fibras de aramida)
ACI	- American Concrete Institute Committee
fib	- Fédération Internationale du Béton
SMA	- Shape Memory Alloys (Ligas Metálicas com Memória de Forma)
SME	- Shape Memory Effect (Efeito de memória de forma)

Notações Escalares Latinas

A_{conf}	- área da secção transversal do sistema de confinamento
A_e	- área da secção de betão efetivamente confinado
A_g	- área total da secção de betão confinado
A_{sl}	- área total de armaduras longitudinais
A_t	- área total da secção de betão confinado
B	- comprimento da secção de betão
c_r	- coeficiente de redução
D	- diâmetro ou largura da secção de betão
d_{st}	- diâmetro dos estribos de aço ou do núcleo de betão confinado com estribos
E_c	- módulo de elasticidade do betão
E_{cA}	- módulo de elasticidade tangente ao ponto A
E_{ci}	- módulo de elasticidade tangente do betão não confinado
E_j	- módulo de elasticidade à tração do FRP de confinamento
E_l	- módulo de elasticidade do confinamento lateral
E_s	- módulo de elasticidade do aço
E_{sec}	- módulo de elasticidade secante do betão
E_1	- rigidez do primeiro ramo do diagrama tensão-extensão
E_2	- rigidez do diagrama no ponto de interseção entre dois ramos

f_c	- tensão de compressão do betão
f_{cc}	- tensão máxima de compressão do betão confinado
f_{co}	- tensão máxima de compressão do betão não confinado
f_{cA}	- tensão de transição no ponto A
f_{cu}	- tensão de rotura à compressão do betão confinado
f_j	- tensão de tração do FRP de confinamento
f_{fl}	- tensão lateral de confinamento exercida pelo CFRP
f_l	- tensão lateral de confinamento
$f_{l,ef}$	- tensão lateral efetiva de confinamento
$f_{lx,ef}$	- tensão lateral efetiva de confinamento segundo a direção x
$f_{ly,ef}$	- tensão lateral efetiva de confinamento segundo a direção y
f_{sl}	- tensão lateral de confinamento exercida pelos estribos
f_{su}	- tensão de rotura do aço à tração
f_{sy}	- tensão de cedência do aço
H	- altura do provete
$k_1; k_2$	- coeficientes de confinamento
k_e	- coeficiente de eficácia do confinamento
s_c	- distância livre entre cantos arredondados
s'	- espaçamento livre entre faixas de CFRP
s_s	- espaçamento livre entre cintas de aço
t	- espessura
t_j	- espessura do FRP de confinamento
t_{fib}	- espessura das fibras (manta, tecido, etc.)
R	- raio de canto

Notações Escalares Gregas

α	- coeficiente de eficácia do confinamento
$\alpha_{fe}; \alpha_{se}$	- coeficientes de confinamento relacionados com a geometria do provete
$\alpha_{fv}; \alpha_{sv}$	- coeficientes de confinamento que atendem à configuração do provete
β	- fator de redução

ε	- extensão
ε_c	- extensão axial de compressão do betão
ε_{cc}	- extensão axial de compressão do betão correspondente à tensão máxima de compressão do betão confinado, f_{cc}
ε_{co}	- extensão axial de compressão do betão não confinado correspondente à tensão axial de compressão do betão não confinado, f_{co}
ε_{cA}	- extensão de transição entre troços no modelo proposto por Ferreira (2007)
ε_{cu}	- extensão axial correspondente a f_{cu}
ε_j	- extensão do CFRP de confinamento na direção das fibras
ε_l	- extensão lateral do provete de betão
ε_{lu}	- extensão na rotura do CFRP à tração na direção das fibras
ε_{su}	- extensão axial na rotura do aço
ρ_j	- relação volumétrica do FRP de confinamento
ρ_{jx}	- relação volumétrica do FRP de confinamento segundo a direção x
ρ_{jy}	- relação volumétrica do FRP de confinamento segundo a direção y
ρ_{sg}	- percentagem de armaduras longitudinais em relação à área total da secção de betão
σ_c	- tensão de compressão no betão

1. Introdução

O reforço de estruturas é uma atividade da indústria da construção civil, cujo impacto económico tem crescido significativamente nos últimos anos e que tem como objetivo principal o aumento da resistência e/ou da ductilidade dos elementos, melhorando o seu desempenho.

A utilização de sistemas de materiais compósitos de FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) como reforço estrutural é uma técnica recente que constituiu soluções competitivas a nível económico e de qualidade técnica, com perspectivas de aplicação crescente no futuro, uma vez que se apresentam como uma alternativa viável aos métodos convencionais.

Procurou-se, com o presente trabalho, analisar e caracterizar os materiais compósitos, e simultaneamente os modelos analíticos e numéricos que permitem aprofundar o conhecimento sobre o efeito do confinamento em pilares de betão armado com mantas de fibras de carbono (*Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP*), investigado por vários autores.

1.1. Estruturação da tese e objetivos do trabalho

A presente dissertação está dividida em sete capítulos, que incluem a introdução e as referências bibliográficas, e encontra-se organizada seguindo os objetivos definidos para a concretização deste estudo.

Deste modo, os principais objetivos que pautam a realização do presente trabalho são:

- I. Com base numa pesquisa bibliográfica, caracterizar os materiais compósitos e viabilização de aplicação como material para reforço estrutural;
- II. Estudo dos efeitos de confinamento em pilares de betão armado com mantas de CFRP em seções circulares, quadradas e retangulares;
- III. Pesquisa bibliográfica de modelos analíticos de confinamento com aço e FRP, comparando as principais diferenças entre eles através de interpretação gráfica;
- IV. Aplicação de modelos de confinamento com FRP estudados recorrendo ao *software Mathworks - Matlab R2015a*, com comparação gráfica de resultados, através da curva tensão-extensão.

De forma a explicar a concretização destes objetivos, logo após a apresentação do tema estudado, no Capítulo 1 – Introdução, existe o Capítulo 2, onde são abordadas diferentes tipologias de intervenções ao nível do reforço em pilares de betão armado, em que são igualmente apresentadas vantagens e desvantagens da sua utilização. Apresenta-se ainda uma panorâmica geral sobre a técnica de reforço exterior com compósitos de FRP, onde se resumem as principais características dos materiais e tecnologias dos sistemas FRP.

O Capítulo 3 aborda o confinamento em pilares, nomeadamente as vantagens da sua utilização com FRP. São abordados os efeitos do confinamento nas curvas tensão-extensão, nomeadamente no que respeita ao aumento da resistência e da ductilidade do betão.

O Capítulo 4 reúne os modelos analíticos que permitem estimar o confinamento de pilares de betão com armaduras transversais de aço e com compósitos de FRP. São apresentadas as

equações que permitem estimar e prever o comportamento dos pilares e as respectivas curvas tensão-extensão propostas por cada autor. É ainda apresentada, neste capítulo, uma breve descrição das recomendações descritas pelo ACI (American Concrete Institute Committee) e *fib* (*Fédération Internationale du Béton*), quando são utilizados sistemas de reforço com FRP.

No Capítulo 5 é realizada a aplicação dos modelos de confinamento na avaliação da correlação entre resultados experimentais e numéricos, apresentando-se os respetivos diagramas de tensão-extensão e comparando-os com os ensaios experimentais de Paula (2003) e Rocca (2007). É ainda abordado e comparado neste capítulo a influência do boleamento, do número de camadas, da geometria das secções transversais, e confinamento parcial na eficácia do confinamento.

Como forma de avaliação e reflexão de toda a investigação realizada, no Capítulo 6, apresentam-se as principais conclusões do presente estudo.

1.2. Considerações Iniciais

O betão armado tem vindo a revelar as suas potencialidades a partir do século XX, consistindo numa das melhores opções da área da construção civil. A sua capacidade de moldagem, elevada resistência e durabilidade conduziram à sua frequente aplicação em diversos ramos da engenharia civil.

Contudo, de acordo com Costa e Juvandes (2002), variadas edificações manifestaram alguns problemas aquando do alcance do período de vida inicialmente previsto, verificando-se, para além dos efeitos do envelhecimento, o aparecimento de degradação prematura, muito antes do período estimado.

Pese embora, na generalidade dos casos, as estruturas de betão possuírem um período de vida útil longo, os seus requisitos podem alterar-se. Poderá ser alterada a sua finalidade, tendo portanto de suportar mais carga ou verificar novas exigências normativas. Diversas vezes as estruturas são igualmente alvo de reparação devido a acidentes. Existem ainda situações em que são detetados erros na fase de projeto ou construção, obrigando desta forma a reforçar as estruturas, antes ou mesmo após entrarem em funcionamento.

O custo/benefício, relativamente à construção e reabilitação (reparação e/ou reforço) de edifícios, deverá considerar, não apenas o custo de construção por metro quadrado, mas também o de valores habitualmente não considerados, tais como a proteção ambiental, consumos energéticos e valorização patrimonial, de onde surge o conceito de sustentabilidade abordado por Appleton (2010). Assim, a reabilitação de edifícios, em contraposição à construção nova, deve ter em conta os dados supramencionados, isto é, não se poderá dizer que o custo da reabilitação é barata ou cara, apenas com base numa análise de custos de construção por metro quadrado.

De entre as várias técnicas de reparação e reforço de pilares existentes, as usualmente utilizadas são o reforço por adição de armaduras exteriores em aço e o reforço por encamisamento. Recentemente, tem também vindo a ser adotado com êxito o sistema de reforço com materiais compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras, também designados por compósitos de FRP ou, simplesmente, por FRP. Neste sentido, têm sido vários os estudos levados a cabo para se

aprofundar cada vez mais o conhecimento sobre a sua utilização (Chastre & Silva, 2010; Ferreira, 2007; Manfredi & Realfonzo, 2001; Wei & Wu, 2011).

As principais vantagens na aplicação dos FRP estão justamente relacionadas com as propriedades intrínsecas aos próprios FRP, tais como elevada resistência à tração, baixo peso volumico, elevada resistência à corrosão e à fadiga, e diversidade e versatilidade dos sistemas comercializados.

Em contrapartida, as principais desvantagens apresentadas pelos materiais compósitos estão relacionadas com a necessidade de mão-de-obra altamente especializada, a baixa experiência de aplicação e o pouco conhecimento de alguns aspetos técnicos, tais como a sua durabilidade.

A opção pelas soluções de reforço com sistemas de FRP tem vindo a revelar-se francamente vantajosa face a outras técnicas tradicionais. A título de exemplo, é frequentemente comparável a aplicação de chapas metálicas coladas com resinas epoxídicas no reforço de zonas de tração de vigas ou lajes, com a colagem de materiais compósitos em prol das chapas metálicas. Apesar de simples e eficiente, quer a nível dos custos associados, quer quanto ao desempenho estrutural, a técnica de colagem de chapas metálicas apresenta várias desvantagens, tais como a corrosão do aço das chapas, que acaba por deteriorar o sistema de colagem, devido ao peso e rigidez, a dificuldade de manuseamento das chapas, a necessidade de colocação de estruturas de suporte provisórias, e a limitações nos comprimentos das chapas que poderá implicar a utilização de ligações adicionais (Juvandes, 1999).

Outra das áreas em que a utilização dos sistemas de FRP se tem revelado potencialmente vantajosa comparativamente aos materiais tradicionais é precisamente no reforço de pilares de betão armado por encamisamento com FRP. Esta técnica tem por base o aumento da resistência e/ou ductilidade do betão à compressão, por efeito do confinamento exercido pelos compósitos aplicados.

2. Reforço de Pilares de Betão

O reforço de estruturas em betão armado é um tema complexo. Atualmente, as principais dificuldades sentidas para a boa execução de uma obra de reforço, estão intimamente relacionadas com o facto de a informação relativa ao projeto, execução e exploração das obras ser de difícil obtenção e frequentemente inexistentes. Verifica-se igualmente que, com exceção de alguns tipos de intervenções mais comuns, é de uma ausência genérica a regulamentação sobre o reforço de estruturas, que trate de forma integrada o projeto e execução do reforço nas suas diversas componentes, tais como, metodologias de intervenção, dimensionamento, procedimentos de execução, especificação e controlo de qualidade. Existem ainda dificuldades relativas à análise estrutural e avaliação da segurança das obras a reforçar, e ao dimensionamento do próprio reforço (Brás, 2013).

O recurso ao reforço estrutural está normalmente associado à necessidade de aumentar o nível de segurança devida à alteração do tipo de utilização do edifício (aumento das cargas a atuar na estrutura, por exemplo), erros de projeto e/ou construção, alterações nos códigos de dimensionamento com introdução de disposições mais exigentes e ocorrência de acidentes (nomeadamente, incêndios, explosões, cheias ou atos de vandalismo).

As técnicas de reforço convencionais em pilares têm-se limitado a:

- reforço através de colagem de chapas de aço com resinas epoxídicas;
- reforço por encamisamento de secções (betão armado ou chapas metálicas);

Todavia, em determinadas obras de reforço, as técnicas acima mencionadas não se verificam ser as mais eficazes. Surge então a necessidade de encontrar alternativas à utilização de materiais tradicionais, desde que cumpram os requisitos definidos e que se apresentem como soluções economicamente competitivas e sustentáveis.

Assim sendo, verificou-se nos últimos anos uma crescente aplicação de materiais compósitos na indústria da construção. Quando as propriedades destes materiais são devidamente ajustadas às estruturas de betão armado, sobretudo garantindo uma adequada ligação com o betão, pela compatibilização das deformações e da interação entre eles, permitem a conceção de soluções de reforço mais leves, mais resistentes e mais duráveis (Costa & Juvandes, 2002; Juvandes, 1999).

A forma como o material compósito é aplicado nos elementos a reforçar é fulcral no desempenho do reforço de uma estrutura. No caso concreto de pilares, o seu envolvimento total ou parcial com mantas de um material compósito constituiu uma técnica de reforço muito eficaz, uma vez que permite um aumento considerável da ductilidade e da resistência à compressão destes elementos.

Inicialmente, em função do baixo conhecimento acerca do comportamento estrutural que então se verificava, as técnicas limitavam-se à adição de novos elementos, apoios, e incremento das secções resistentes. Contudo, com a evolução das tecnologias de construção, vão surgindo novas técnicas de reforço estrutural, cada vez mais sofisticadas (Pereira, 2012). Assim, existem vários tipos de intervenção possíveis de realizar nos diferentes elementos de uma estrutura de

betão armado, aos quais se recorre tendo em conta o seu campo de aplicação e os aspetos principais da solução, tais como rapidez de execução e interferência na utilização da estrutura, e custos associados à sua boa execução/manutenção.

Nos pontos seguintes, apresenta-se, de forma sucinta, técnicas de reforço em pilares de betão:

- reforço por adição de armaduras exteriores;
- reforço por encamisamento;
- reforço com ligas metálicas com memória de forma;
- reforço exterior com polímeros reforçados com fibra.

2.1. Reforço por Adição de Armaduras Exteriores

O reforço de estruturas com recurso à adição de armaduras exteriores pode ser efetuado através da colagem de chapas metálicas e, mais recentemente, com materiais compósitos de FRP (*Fiber Reinforced Polymer*). A presente dissertação tem por base a utilização de sistemas de reforço por confinamento com CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) em pilares, pelo que a análise dos seus materiais constituintes e a viabilidade das aplicações serão apresentadas em pormenor. Em seguida, apresenta-se a caracterização sucinta da intervenção com reforço por colagem de chapas metálicas.

2.1.1. Metálicas

A aplicação de chapas metálicas por colagem é usada quando há deficiência de armaduras e inconveniência no aumento das secções transversais dos elementos. Algumas das vantagens associadas à sua utilização estão relacionadas com a rapidez de execução e interferência mínima na utilização da estrutura.

Contudo, é necessário ter em conta a suscetibilidade à exposição solar, problemas de fluência para cargas permanentes, mau comportamento ao fogo e à fadiga (devem ser protegidas contra a corrosão e ação do fogo). Acresce ainda ser necessário recorrer a empresas e pessoal técnico especializado, o facto de a ligação dever ser complementada com conetores e de as chapas deverem ser convenientemente ancoradas nas extremidades (Appleton & Gomes, 1997).

2.2. Reforço por Encamisamento

A técnica mais comum no que concerne à melhoria do desempenho de elementos em betão armado (vigas, pilares, paredes ou nós viga-pilar) é o encamisamento. Esta técnica consiste num aumento da secção transversal de um elemento estrutural, através de adição de uma armadura suplementar e de uma camada de betão que envolve a secção inicial, onde ficam inseridas as novas armaduras ou, alternativamente, com chapas metálicas.

2.2.1. Armaduras e Betão

O reforço por encamisamento pode ser aplicado em vigas ou pilares. Nos pilares, o reforço por encamisamento envolve normalmente toda a secção, sendo o mesmo designado por encamisamento fechado. No entanto, devido a condicionantes arquitetónicas poderá ser executado apenas em algumas faces do pilar, designando-se por encamisamento aberto.

Este tipo de intervenção é naturalmente mais ajustado quando há necessidade de aumentar a resistência de zonas comprimidas, incrementar as dimensões da secção ou obter um acréscimo de armaduras, ficando estas no interior da secção. De entre as suas vantagens, esta intervenção garante uma boa proteção ao fogo e à corrosão das armaduras de reforço, e pode ser aplicado no reforço de lajes, vigas e de pilares, para todos os esforços, incluindo os esforços devidos à ação sísmica (Pereira, 2012).

Em contrapartida, a sua aplicação implica um aumento das dimensões das secções dos elementos transversais (através da adição de armaduras suplementares e betão), podendo interferir na arquitetura. Pode ainda causar restrições no que concerne à utilização da obra, e requer algum tempo até que o betão de encamisamento endureça, para que possa ser posto em serviço. Para obtenção de uma melhor ligação entre o material de adição e o existente, é necessário realizar uma preparação adequada da superfície da secção inicial (Gomes & Appleton, 1997).

2.2.2. Chapas Metálicas

A aplicação de chapas metálicas no reforço por encamisamento foi inicialmente desenvolvida para o caso de pilares circulares (Paula, 2003). Neste caso, a técnica consiste no posicionamento, em torno da superfície a reforçar, de duas meias mangas metálicas de raio 12.5 a 25.0 mm superior ao raio da secção dos pilares. Depois do ajuste ao pilar, as mangas são devidamente soldadas por forma a criar um tubo contínuo e a pequena espessura entre a chapa e o betão é injetada com uma calda cimentícia.

Nos pilares de secção retangular utilizam-se mangas de secção elíptica e, em vez da calda cimentícia, introduz-se betão no espaço entre a secção retangular e a chapa metálica. As chapas podem ser colocadas em toda a altura do pilar ou apenas nos troços críticos, tais como nas zonas de formação de rótulas plásticas ou em zonas de emendas de varões.

As principais desvantagens na utilização de chapas metálicas estão associadas à necessidade de proteção contra a corrosão e a ação do fogo, isto para além da dificuldade de manipulação de pesadas chapas de aço em obra.

2.3. Reforço com Ligas Metálicas com Memória de Forma

As ligas metálicas com memória de forma (*shape memory alloys* – SMAs) são um material com a capacidade de, após deformado, voltar à sua forma original, através de um processo de ativação térmica (Janke, Czaderski, Motavalli, & Ruth, 2005). De acordo com Cladera et al. (2014)

estes materiais possuem propriedades únicas, pelo que têm um grande potencial sendo atualmente alvo de diversas investigações na engenharia civil.

Na investigação efetuada por Chen, Shin, e Andrawes (2014), os autores referem que as SMAs são um tipo de ligas metálicas que apresentam um fenómeno termomecânico, designado por efeito de memória de forma (*Shape Memory Effect, SME*), ilustrado na Figura 1. Este fenómeno está relacionado com a possibilidade de o material recuperar a forma original mesmo quando excessivamente deformado, e as fases mais comuns presentes nas SMA são respetivamente a fase austenítica, de rigidez elevada e, a fase martensítica, mais deformável (Lobo, Almeida & Guerreiro, 2015). Dependendo da temperatura e da tensão instalada, o material da liga pode intercalar entre estas duas fases, sem alteração macroscópica, por forma a acomodar maiores ou menores deformações.

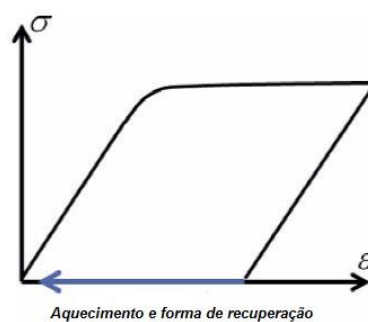


Figura 1 - Diagrama esquemático do efeito de memória de forma (adaptado de Chen et al., 2014)

Atualmente, as ligas com maior possibilidade de aplicação na engenharia civil são as ligas de níquel-titânio (Lobo, Almeida & Guerreiro, 2015). Estas destacam-se das restantes por apresentarem um intervalo de temperaturas mais compatível com a maioria das aplicações em engenharia civil e por apresentarem uma boa capacidade de recuperação após deformação. Apresentam também elevada resistência à abrasão e à corrosão, bem como uma ductilidade superior à de qualquer outra liga (Otsuka & Ren, 2005).

2.3.1. Confinamento Ativo

O pós-tensionamento de elementos com SMAs é prático para formas circulares e angulares. A principal vantagem do uso de um pós-tensionamento com ligas com memória de forma prende-se com o facto de estes fornecerem uma força de recuperação uniforme ao longo de todo o comprimento do elemento tensionado. Desta forma, o confinamento de elementos de betão é uma das áreas das quais se poderá retirar diversas vantagens do uso destes materiais, usando o efeito de memória de forma para tensionar o elemento de betão, aumentando assim o efeito de confinamento.

O estudo realizado por Krstulovic-Opara e Thiedeman (2000) teve por base testes em elementos confinados continuamente com ligas de níquel-titânio sob a forma de fios, os quais permitiram aos investigadores referidos concluir acerca do elevado potencial destes materiais para aplicação em soluções de confinamento ativo. Na sequência desses estudos, os

investigadores Janke et al. (2005) sugerem o desenvolvimento do conceito mencionado, no que concerne às necessidades práticas, podendo os pilares de betão ser facilmente revestidos com faixas de SMA em forma de espiral. A Figura 2 mostra a configuração do tensionamento por aquecimento de uma resistência, sendo esta tecnologia apropriada, em particular, para a recuperação de estruturas onde não há muito espaço de manobra, como, por exemplo, nas caves de edifícios. Refira-se que face à necessidade de uma quantidade elevada de material, os autores indicam que apenas as SMAs de baixo custo podem ser considerados.

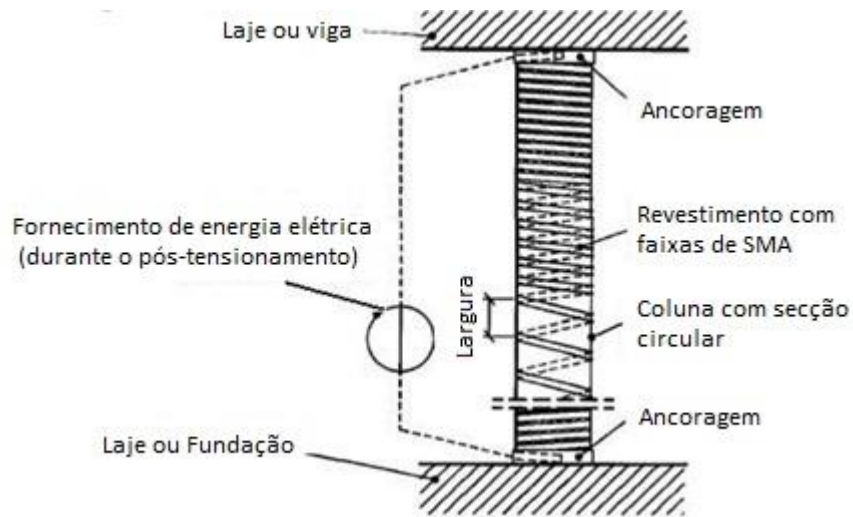


Figura 2 - Confinamento ativo de um pilar de betão com SMA pré-esforçado

Os autores Janke et al. (2005) compararam ainda os níveis de incremento de carga e ductilidade obtidos através do confinamento com SMAs com os fornecidos pelo confinamento com mantas de CFRP e com aço, ilustrados na Figura 3. No desenvolvimento deste estudo, os autores verificaram uma deformação axial, ϵ_a , menor para o pilar confinado com SMA, quando comparado com o pilar confinado com aço ou CFRP para a mesma carga, σ_{ca} .

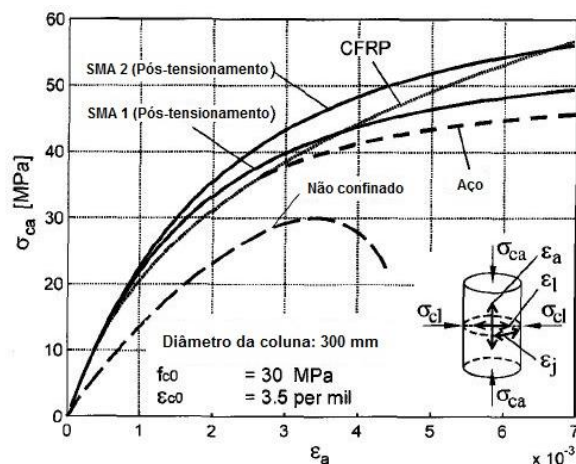


Figura 3 - Comparação da tensão-estensão para um pilar circular por confinamento com diferentes materiais (Adaptado de Janke et al., 2005)

As principais vantagens associadas ao uso de SMAs estão ainda associadas à sua alta resistência mecânica e à corrosão. Contrariamente, estes materiais apresentam como principais desvantagens o difícil controlo na sua composição (que explica o seu elevado custo no mercado) e homogeneização, bem como a baixa resistência à fadiga verificada em algumas ligas (Dolce, Cardone & Marnetto, 2000).

2.4. Reforço Exterior com Polímeros Reforçados com Fibras

Os principais avanços no âmbito da engenharia estrutural surgiram ligados à aplicação de novos materiais, em substituição dos ditos tradicionais. Correia (2012) defende que a durabilidade limitada aos materiais tradicionais tem causado alterações nas práticas de dimensionamento e na própria regulamentação. A par das exigências de velocidades de construção crescentes, este aspeto tem um efeito impulsionador no que concerne ao estudo e desenvolvimento de novos materiais estruturais, mais leves, menos sujeitos a degradação causada pelos agentes agressivos e com menores exigências de manutenção.

Na sequência do mencionado, e tendo em conta a crescente preocupação com a necessidade de reforçar as estruturas, surgem os materiais compósitos, que, como referido, têm sido alvo de diversos estudos.

Nesta secção, são apresentadas as vantagens e desvantagens da utilização de reforço com FRP, dando-se particular ênfase aos polímeros reforçados com fibras de carbono. Para além de serem as fibras mais utilizadas atualmente na indústria da construção civil, o estudo elaborado na presente dissertação tem por base a aplicação das mantas compostas por fibras de carbono no confinamento de pilares de betão.

2.4.1. Materiais Compósitos

De acordo com Juvandes (1999), os materiais compósitos são formados por dois ou mais constituintes, com distintas composições, estruturas e propriedades que se combinam, em que, um dos materiais garante a resistência, “reforço”, e o outro a ligação, “matriz”.

O reforço com fibras é responsável pelo desempenho mecânico do material, garantindo a maior parte da resistência e da rigidez (Correia, 2012). Por sua vez, a matriz polimérica, que funciona como a “cola” do compósito, garante a transferência de força entre as fibras. Para além da resina, a matriz polimérica dos materiais FRP costuma incorporar material de enchimento (também designado por carga ou *filler*) e aditivos, que permitem reduzir o custo e melhorar determinadas propriedades específicas.

A principal finalidade da produção de compósitos é o de combinar diversos materiais num único com propriedades superiores às dos componentes isolados. Desta forma, a sua combinação é decidida em função da aplicação específica do material compósito (Luca, 2006).

Os polímeros reforçados com fibras são empregues como armaduras não metálicas, sendo fácil a sua aplicação, não tendo a contrapartida de um aumento significativo do peso próprio ou

das dimensões do elemento estrutural, podendo a estrutura entrar em funcionamento com significativa rapidez. No final, o desempenho geral do reforço vai ser condicionado pelo comportamento a curto e longo prazo do FRP e do adesivo. Refere-se ainda que as principais formas de comercialização para os FRP, admitindo como parâmetros base a configuração geométrica espacial e a disposição das fibras no produto final, podem ser classificadas em três grupos, nomeadamente unidirecionais (1D), bidirecionais (2D) e multidirecionais (3D) (Costa & Juvandes, 2002).

2.4.2. Fibras

Os três principais tipos de fibras comercializadas são o vidro, o carbono e a aramida. Na Tabela 1 incluem-se valores correntes de algumas das principais propriedades das fibras utilizadas em compósitos para reforço estrutural.

Tabela 1 - Características típicas dos principais reforços fibrosos (Correia, 2012)

Propriedade	Vidro - E	Carbono	Aramida
Resistência à tração [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

Dependendo do tipo de fibras que constituem o compósito, os correspondentes FRP são designados por:

- Carbon Fiber Reinforced Polymer (Carbono) – CFRP;
- Glass Reinforced Polymer (Vidro) – GFRP;
- Aramid Fiber Reinforced Polymer (Aramida) – AFRP.

As fibras de vidro têm cor esbranquiçada e são muito utilizadas em materiais compósitos, pela razão de combinarem uma resistência elevada com um custo relativamente baixo, associado a processos simples de fabricação. No entanto, apresentam como principal desvantagem o baixo módulo de elasticidade relativamente às fibras de carbono e aramida, a suscetibilidade à rotura por fluência e a reduzida resistência à humidade e a ambientes alcalinos. Estas fibras dividem-se em 3 categorias: E (eletrical), C (chemical) e S (high tensile strength) e de entre os tipos de fibras de vidro existentes as que apresentam uma utilização mais generalizada, são as do tipo E, que comparativamente às outras, apresentam uma elevada resistência mecânica e resistência aos agentes agressivos e ainda, pelas suas boas propriedades de isolamento elétrico (Fiorelli, 2002).

As fibras de aramida, de cor amarelada, são pouco atrativas na indústria da construção civil, pelo facto de apresentarem uma resistência à compressão muito inferior quando comparada à resistência à tração (500 a 1000 MPa), serem suscetíveis à rotura por fluência e muito sensíveis à radiação ultravioleta.

Os dois tipos de fibras de carbono mais utilizados são as fibras de carbono de alta resistência (HS) e as de elevado módulo de elasticidade (HM). Estas são utilizadas nos laminados (unidireccionais, simplesmente colados com um adesivo de resina epoxídica), mantas (unidireccionais, aglutinadas e coladas com uma matriz epoxídica), tecidos (bidireccionais ou multidireccionais) e cabos de CFRP, e apresentam diversas vantagens, das quais se salientam os valores elevados de tensão de rotura e de módulo de elasticidade, o reduzido peso próprio e a razoável resistência à fadiga e à fluência. No entanto, face ao seu comportamento anisotrópico, estas fibras apresentam uma reduzida resistência na direção radial (Costa, 2009).

Para cada tipo de fibras apresentadas anteriormente, há uma diversa gama de produtos que varia em função das suas características mecânicas à tração (módulo de elasticidade, tensão e extensão de rotura). A ilustração da Figura 4 apresenta um diagrama comparativo das propriedades à tração dos três tipos de fibras mencionados, onde se verifica que as fibras de carbono são as que apresentam uma maior tensão de rotura à tração e maior módulo de elasticidade.

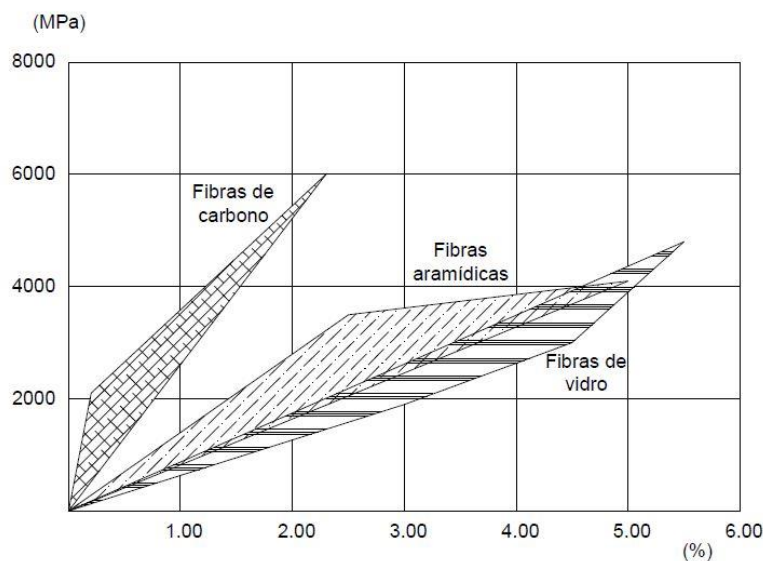


Figura 4 - Diagrama comparativo das propriedades à tração das fibras de carbono, aramida e vidro (Paula, 2003)

Costa e Juvandes (2002) referem ainda que das fibras disponíveis no mercado, os sistemas reforçados com fibras de carbono, CFRP, apresentam as características que melhor se ajustam aos compromissos exigidos pelo reforço de estruturas de betão com a técnica de colagem, abordada no presente trabalho.

2.4.3. Propriedades físicas e mecânicas típicas de mantas CFRP

As fibras de carbono possuem uma espessura equiparada a um fio de cabelo (ver Figura 5), capazes de apresentar boas características mecânicas, que dependem do seu arranjo microestrutural (Luca, 2006).

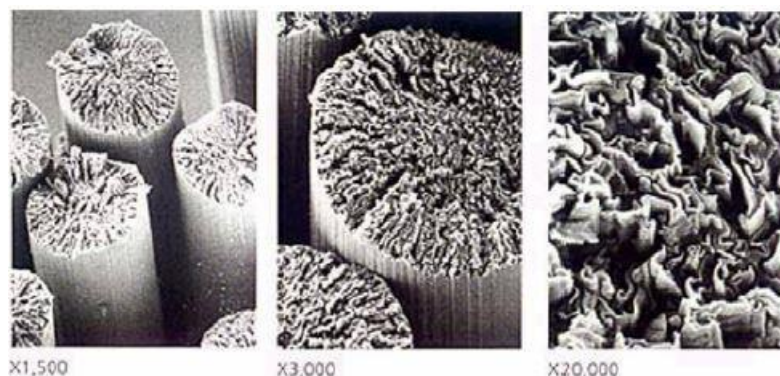


Figura 5 - Secção transversal das fibras de carbono (Luca, 2006).

A presente dissertação tem por base a utilização de mantas de fibras de carbono no confinamento de pilares, pelo que, nesta secção, nomeadamente na Tabela 2, apresentam-se intervalos de variação típicos para as propriedades físicas e mecânicas de mantas de CFRP e CFRP¹ (fibras de elevado módulo) utilizadas no reforço de estruturas.

Tabela 2 - Propriedades físicas e mecânicas típicas de mantas de CFRP (adaptado de Correia, 2012)

Propriedade	CFRP	CFRP ¹
Espessura nominal [mm]	0.165-0.330	0.165
Largura [mm]	600	600
Arquitetura das fibras	Unidirecional	Unidirecional
Resistência à tração axial das fibras [MPa]	3790	3520
Módulo de elasticidade axial em tração das fibras [GPa]	230-300	370-640
Extensão axial na rotura [%]	1.67-1.70	0.94

2.4.4. Matrizes Poliméricas

Sem retirar a importância à fibra, referida anteriormente, a matriz polimérica tem capacidade para resistir a algumas cargas, associadas a tensões de corte, interlaminar e no plano, do FRP (Costa & Juvandes, 2002). Esta desempenha ainda as seguintes funções essenciais (Correia, 2012; Moreira, 2009):

- mantém as fibras na posição pretendida;
- garante a transferência e distribuição de forças pelas fibras em caso de rotura;

- evita a encurvadura das fibras quando solicitadas em compressão;
- protege as fibras do meio envolvente e do dano durante o manuseamento.

Como referido anteriormente, a matriz polimérica é constituída pela resina propriamente dita, podendo igualmente incorporar material de enchimento e aditivos.

2.4.5. Resinas

Costa e Juvandes (2002) referem ainda que as resinas têm como função, impregnar o grupo de fibras, proporcionar a polimerização do conjunto num compósito FRP e, por fim, desenvolver propriedades de aderência na ligação do FRP ao material existente. Estão divididas em dois grandes grupos, que podem ser distinguidos pelo modo como as cadeias poliméricas estão interligadas quando o polímero se encontra na forma sólida:

- resinas termoendurecíveis;
- resinas termoplásticas.

As resinas termoendurecíveis (incluem o poliéster, o viniléster, as epóxidas e as fenólicas) depois de curadas são infusíveis e, como consequência não podem ser reprocessadas ou soldadas. Apresentam como vantagens a reduzida viscosidade (permitindo elevadas velocidades de processamento), boa capacidade de impregnação das fibras e muito boas propriedades adesivas, que justificam a sua utilização como colas e adesivos estruturais.

Na Tabela 3, apresentam-se valores para as principais propriedades das resinas mais utilizadas nos compósitos empregues no reforço estrutural.

Tabela 3 - Propriedades típicas das resinas mais utilizadas no reforço estrutural (Barros, 2007)

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

As resinas termoplásticas caracterizam-se por terem um processamento mais difícil (pela elevada viscosidade), correspondendo a um acréscimo do custo de produção, maior dificuldade de impregnação e adesão às fibras comparativamente às termoendurecíveis que, contrariamente, não fundem e apresentam viscosidades inferiores antes da polimerização (Custódio, 2012).

Por estas razões, Juvandes (1999) refere que a seleção da matriz deve ser criteriosa, justificando-se a opção pelas resinas termoendurecíveis do tipo epóxido, no caso dos sistemas de FRP mais utilizados na técnica de reforço por colagem.

2.4.6. Processos de Fabrico

Nas aplicações estruturais da indústria da construção, são utilizados essencialmente dois processos de produção dos materiais de FRP:

- pultrusão, em que os produtos de FRP são produzidos e transportados para a obra;
- moldagem manual (*hand layup* ou *wet layup*), em que os produtos FRP são produzidos, aplicados e curados em obra.

O processo de pultrusão é um método de fabricação contínuo e mecanizado, que consiste em puxar as fibras impregnadas com resina através de um molde pré-aquecido usando um dispositivo de tracionamento contínuo. Quando o material saturado com resina (pode ser por banho ou injeção) passa pelo molde aquecido ocorre o processo de polimerização (cura), e toma assim a forma definitiva. Este processo é recorrentemente utilizado no fabrico de varões (reforço interior), laminados (reforço exterior) e perfis estruturais (Correia, 2012).

O processo de moldagem manual, utilizado no caso do reforço de pilares por confinamento, trata-se de um método mais simples e mais antigo de entre os vários processos de fabricação de compósitos. No processo de fabricação das mantas, os feixes de fibras são agrupados, as fibras são alinhadas e esticadas, são ainda introduzidas numa prensa, em simultâneo com uma tela impregnada com quantidades mínimas de resina de epóxido e com um plástico de proteção. O compósito só se forma com a adição da resina às mantas durante a aplicação (Rodrigues, 2005). Este método de moldagem manual é essencialmente utilizado para a aplicação em obras de mantas de reforço (reforço exterior).

Na fabricação dos tecidos, as fibras depois de alinhadas, são entrelaçadas num tear de costura vulgar, não sendo, desta maneira, necessária a junção da tela impregnada (Rodrigues, 2005). À semelhança das mantas, o compósito apenas se forma com a adição da resina aos tecidos durante a aplicação.

2.5. Técnica de Colagem

O reforço estrutural com compósitos de FRP utiliza a denominada técnica de colagem, que se baseia na aderência dos FRP ao betão por intermédio de um adesivo. Uma das vantagens na utilização desta técnica rege-se pelo facto de não ser necessário sistemas de fixação, visto que os FRP aderem ao substrato a reforçar imediatamente após a colagem (Paula, 2003).

Na técnica de colagem, os sistemas de FRP comercializados para reforço dividem-se essencialmente em:

- sistemas curados “*in situ*” (Figura 6);
- sistemas pré-fabricados (Figura 6);
- sistemas especiais (Figura 9).

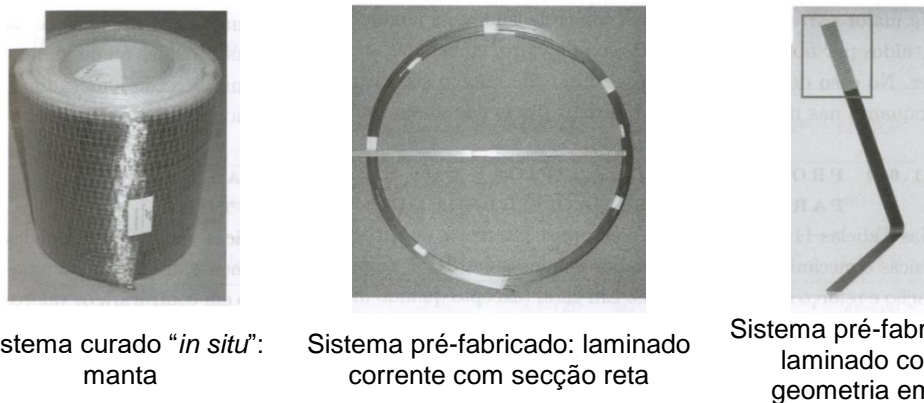


Figura 6 – Diferentes tipologias de elementos de reforço FRP (Correia, 2012)

Os sistemas curados “*in situ*”, consistem em impregnar no local os fios, mantas ou tecidos de fibra, com uma resina de saturação, que tem a finalidade de ligar igualmente as fibras de FRP à superfície de betão (Rodrigues, 2005). Estas, são aplicadas após a devida preparação de reparação da superfície de betão.

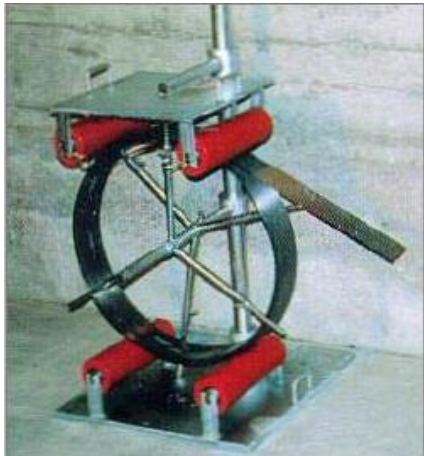
Na Tabela 4, apresentada de seguida, são apresentadas as descrições das Mantas e Tecidos empregues nos sistemas FRP curados “*in situ*”.

Tabela 4 - Descrição das mantas e tecidos empregues nos sistemas FRP curados “*in situ*” (Juvandes, 1999)

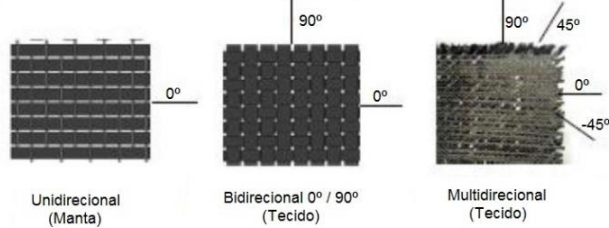
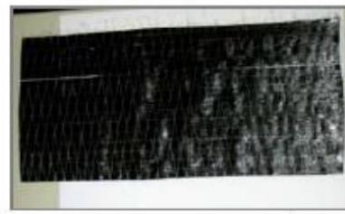
Designação	Descrição	Orientação das Fibras	Estado
Mantas “sheets”	Disposição de faixas contínuas e paralelas de fibras sobre uma rede de proteção (200 – 300 g/m ²)	Unidireccionais	secas Pré-impregnadas [i]
	“Woven roving” [ii]	Entrelaçamento direcionado de dois fios ou faixas de fibras (600 – 800 g/m ²)	Bidireccionais secos
Tecidos	“Mat” [ii]	Espalhamento aleatório das fibras num tapete rolante que, depois, é pulverizado com resina para adquirir consistência	Multidireccionais Pré-impregnados [i]
	“Cloth” [ii]	Fios contínuos tecidos por um processo têxtil convencional (150 – 400 g/m ²)	Unidireccionais ou bidireccionais ou multidireccionais Pré-impregnados

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

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



Sistema de FRP Pré-fabricado (laminado)



Sistema de FRP curado “in situ” (manta e tecido)

Figura 7 – Compósitos de FRP (Formas Prefabricada e curada “in situ”) (Juvandes, 1999)

Os sistemas pré-fabricados, ilustrados na Figura 7, resultam da impregnação com resina de um conjunto de feixes ou camadas de fibras que, através de adequados processos de fabrico, originam as formas geométricas finais pretendidas. São geralmente aplicados mediante a colagem na superfície exterior do elemento a reforçar, com adesivo epóxico, de laminados pré-curados (endurecidos), tipicamente produzidos por pultrusão, mencionados anteriormente (Correia, 2012).

Segundo Luca (2006) e Correia (2012) de forma a garantir boas condições de aderência da superfície do elemento a reforçar, o processo de aplicação de sistemas de FRP curados “*in situ*”, ou pré-fabricados, envolve trabalhos preparatórios, estando estes diretamente relacionados com a qualidade final da aplicação do produto nos vários elementos estruturais:

Subdivide-se, desta forma, o processo de aplicação em duas diferentes etapas (Figura 8):

- 1) Recuperação e preparação da superfície
 - i. remoção do reboco dos elementos a reforçar;
 - ii. remoção de materiais desagregados aparentes, e substituição desses elementos;
 - iii. boleamento das arestas dos elementos a reforçar, evitando a concentração de tensões e, conseqüentemente, uma rotura prematura da manta;
 - iv. limpeza da superfície do elemento a reforçar;
 - v. aplicação da uma resina epoxídica (primário), para assegurar uma superfície regular que promova uma boa adesão das mantas.
- 2) Aplicação do material composto (Correia, 2012; Luca, 2006; Pereira, 2012)
 - i. aplicação de massa de enchimento (Putty filler), para preencher pequenas superfícies ou espaços vazios no substrato, como orifícios ou pequenas fissuras, dando uma superfície lisa para colar o FRP;
 - ii. espalhar pela superfície uma cola epoxídica diretamente no suporte ou manta de FRP;
 - iii. colocação da manta de FRP sobre a superfície a reforçar (com uma sobreposição transversal entre faixas de 0.10 m), através de um ajuste manual ou com talocha de borracha, seguido da aplicação de pressão com um rolo rígido de estrias;

- iv. impregnação da superfície da manta com uma nova camada de cola epóxi, por forma a garantir a total impregnação da manta;
- v. aplicação de uma última camada de resina que poderá ser polvilhada com areia de quartzo, melhorando as características de aderência de eventuais revestimentos ou rebocos.
- vi. no final, proceder à aplicação de uma camada de revestimento (denominado por revestimento protetor) e/ou de proteção ao fogo, impactos, exposição a químicos tais como a corrosão ou à radiação UV, humidade e vandalismo e poderá ter um acabamento estético (Silva, 2013).

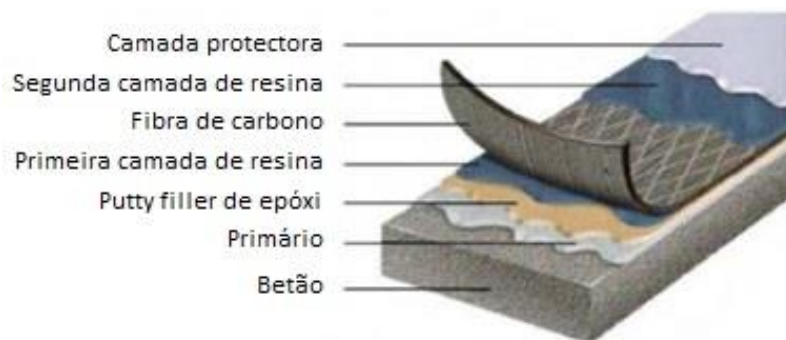


Figura 8 - Ordem de aplicação do sistema CFRP (Silva, 2013)

Nos sistemas especiais, destaca-se a colagem de laminados pré-esforçados e o encamisamento automático. Em determinadas situações, poderá ser preferível realizar o pré-esforço dos laminados antes de se proceder à sua colagem na superfície do betão. Como ilustrado na Figura 9, o encamisamento automático destina-se essencialmente a ser utilizado no confinamento de pilares. Este sistema consiste num mecanismo automático que gira em torno do perímetro dos pilares e enrola as fibras de uma forma contínua ao longo da sua altura. As fibras podem ser pré-impregnadas e a resina é aplicada ao mesmo tempo que as fibras. As fibras podem também ser pré-esforçadas. Este sistema permite um bom controlo da qualidade e uma redução significativa do tempo de aplicação dos materiais.

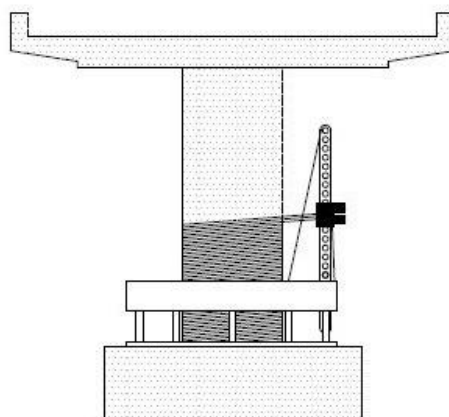


Figura 9 - Sistema especial de encamisamento automático de pilares (Paula, 2003)

A conclusão comum a vários autores, nomeadamente Juvandes (1999), no domínio da investigação e na área da construção, é a de que, das várias fibras disponíveis no mercado, os sistemas reforçados com fibras de carbono CFRP são os que apresentam as melhores características para assumir os compromissos exigidos pelo reforço de estruturas de betão, através da técnica de colagem.

Confrontando com as várias fibras, verifica-se um destaque relativamente a maiores resistências à tração e à compressão, o valor do módulo de elasticidade longitudinal mais próximo do aço (ver Figura 10), o bom comportamento à fadiga e a boa resistência alcalina.

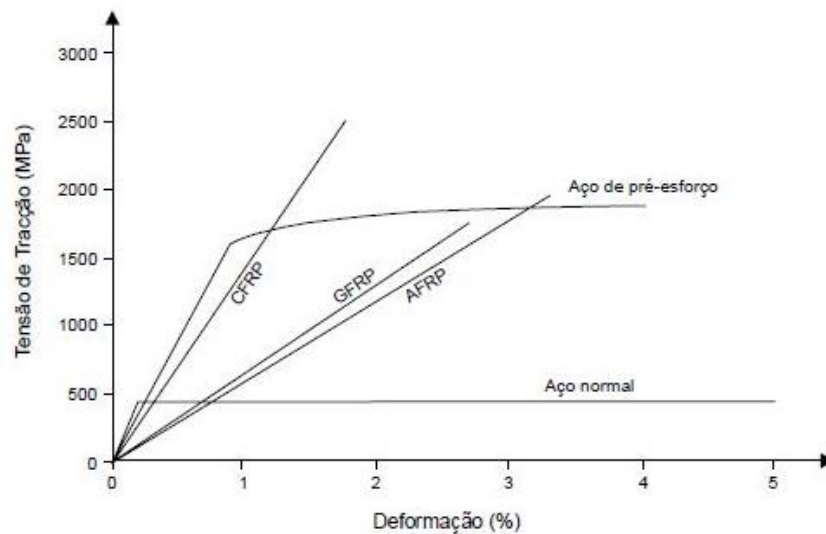


Figura 10 - Comportamento à tração de fibras e metais (Juvandes, 1999).

2.5.1. *Vantagens e dificuldades na utilização dos sistemas de FRP no reforço estrutural*

A utilização de sistemas de FRP no reforço estrutural apresenta vantagens e contrapartidas essenciais que influenciam a decisão da sua aplicação (Silva, 2013). São enumeradas de seguida as vantagens associadas à sua utilização:

- não corrosibilidade;
- leveza, que resulta em facilidade de aplicação, em particular no que se refere à não necessidade de recorrer a andaimes e escoramentos;
- redução dos custos de mão-de-obra e no reduzido acréscimo de carga sobre a estrutura existente;
- elevada resistência à tração;
- elevada rigidez;
- elevada capacidade de deformação;
- grande variedade de geometrias e dimensões disponíveis dos elementos de FRP.

Em contrapartida, sentem-se dificuldades na sua aplicação derivadas a:

- contrariamente ao aço, este material apresenta comportamento elástico-linear até à rotura;
- custo do material relativamente elevado;
- perda de desempenho para temperaturas moderadamente elevadas, rapidamente atingidas numa situação de incêndio, implicando desta forma a necessidade de recorrer a sistemas de proteção contra o fogo;
- limitações ao aproveitamento das propriedades dos materiais FRP causadas por problemas de aderência.

3. Confinamento

Nos pilares de betão armado, as técnicas de reforço habitualmente utilizadas e referenciadas anteriormente consistem no encamisamento das secções com betão armado ou com chapas metálicas. Atualmente, e ainda de acordo com o explanado nos capítulos anteriores, são já utilizados materiais compósitos como alternativa aos materiais tradicionais.

O confinamento de pilares de betão com FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) está especialmente indicado para os casos em que se verifique insuficiência de armaduras transversais. Para além destas, também se tem optado pelo sistema de reforço com compósitos de FRP na reparação de danos causados por sismos ou quando a durabilidade é uma questão essencial, por exemplo, garantindo uma proteção do elemento de betão relativamente aos danos causados por ação dos cloretos, ou seja, impedindo a ação de agentes agressivos ambientais.

Neste capítulo, irá ser abordada a viabilização do reforço em pilares com polímeros reforçados com fibras, mais concretamente com utilização de CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*). Inicia-se com a descrição dos efeitos do confinamento e tensão lateral de confinamento em pilares, seguindo-se os cálculos necessários para a determinação da tensão lateral de confinamento em secções de pilares circulares, quadradas e retangulares.

3.1. Confinamento de Pilares com CFRP

Um pilar de betão, quando sujeito a uma força axial de compressão, dilata transversalmente por efeito de *Poisson*, para além do encurtamento que ocorre na direção da aplicação da carga, Figura 11.

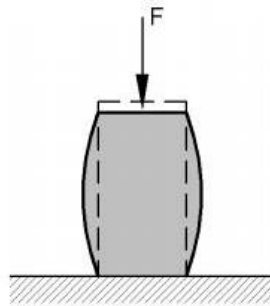


Figura 11 – Deformações longitudinais e transversais devido a ação da força axial (Pinheiro, Muzardo & Santos, 2004)

Com a aplicação de um adequado sistema de confinamento, observa-se um aumento significativo da resistência à compressão e da capacidade de deformação que se traduz numa maior ductilidade do elemento.

O objetivo do confinamento de pilares com polímeros reforçados com fibras consiste em aumentar consideravelmente o desempenho estrutural à compressão, à flexão e ao esforço transversal, por efeito do aumento da resistência do betão à compressão e da ductilidade resultantes de um aumento da capacidade de carga e de absorção de energia dos elementos

reforçados. Ferreira (2007) refere ainda que o aumento da capacidade de carga e de absorção de energia de pilares de betão confinados com CFRP (principalmente quando sujeitos a ações cíclicas, como os sismos) é influenciado por vários parâmetros, entre os quais a resistência do betão, a percentagem de CFRP e a configuração geométrica dos sistemas de confinamento.

O reforço de pilares de betão armado à flexão permite aumentar a resistência à flexão e a rigidez. Pode ser feito pela colagem de laminados, através da colagem de barras e cascas pré-fabricadas ou pela aplicação de mantas ou tecidos colados externamente. O reforço ao corte nestes elementos pode ser realizado com a aplicação de mantas ou tecidos de forma a confinar o pilar, ou ainda, com laminados pré-fabricados. Através do confinamento dos pilares de betão é também possível aumentar a resistência à compressão do betão, aumentar a resistência ao impacto, controlar a fendilhação do betão e a consequente corrosão das armaduras. Os sistemas de confinamento são geralmente aplicados sob a forma de mantas ou tecidos flexíveis de FRP que envolvem toda ou parcialmente a superfície exterior do elemento a confinar.

O reforço de pilares à flexão, ao corte e por confinamento referidos anteriormente encontram-se apresentados na Tabela 5:

Tabela 5 - Reforço com colagem de tecidos e mantas de FRP ao betão (adaptado de Juvandes, 1999)

Sistemas FRP	Reforço Tipo			
Laminados/ Mantas (unidirecionais)	Confinamento	Laminados de CFRP	Faixas de tecido de CFRP	
	Compressão / Ductilidade	Flexão	Corte	Flexão / Corte
Tecidos (bi ou multi-direcionais)				
	Sismo		Impacto/Explosão	

Os efeitos do confinamento nos diagramas de tensão-extensão do betão à compressão são, essencialmente, os seguintes:

- o confinamento aumenta a tensão axial máxima de compressão;
- a ductilidade do betão aumenta com o confinamento;
- o segundo troço da curva não ser tão decrescente como no betão não confinado.

Refira-se ainda que o confinamento não altera significativamente a maior parte do ramo inicial ascendente dos diagramas, uma vez que este troço depende das características do próprio betão.

Na Figura 12 são apresentadas relações típicas de tensão-extensão de provetes de betão não confinados e com distintos níveis de confinamento. Analisando estas curvas verifica-se que o troço inicial, correspondente à fase elástica, é semelhante nos provetes de betão confinados e não confinados, dado que nesta fase o betão sofre uma pequena expansibilidade transversal, não ocorrendo eficazmente a ativação do material de reforço. Posteriormente, o betão entra num processo de micro-fendilhação, caracterizado pela zona de transição. Por último, a zona plástica inicia-se quando a micro-fendilhação desenvolve-se para macro-fendilhação, ocorrendo uma expansibilidade significativa do betão. É portanto nesta fase que se dá a ativação do sistema de reforço.

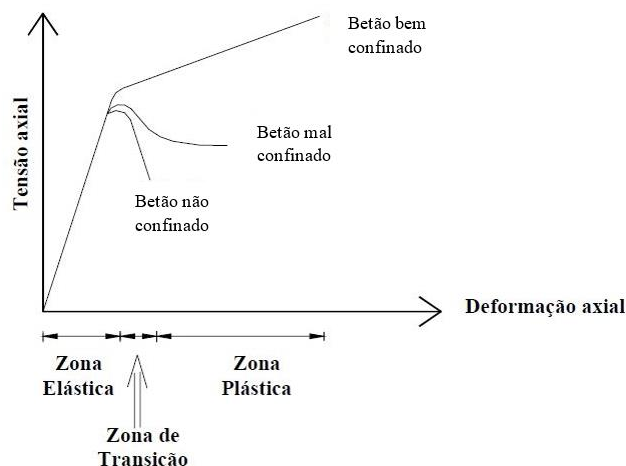


Figura 12 - Diagramas da curva tensão-extensão de provete não confinado e de provetes com diferentes níveis de confinamento (Barros, 2007)

Se o confinamento for efetivo (se houver acréscimo de carga por incremento de extensão), ocorrem grandes deformações e expansão significativa no decorrer da fase plástica, sendo o confinamento tanto mais efetivo quanto maior for a tendência para essa expansibilidade (Barros, 2007). A expansibilidade do betão e a rigidez do confinamento são então responsáveis pela inclinação da relação tensão-extensão correspondente à fase plástica. Quando o betão é bem confinado, apresenta uma fase plástica com inclinação positiva e um desenvolvimento aproximadamente linear, que indicia que o confinamento é suficiente para controlar o efeito da deterioração do betão durante o carregamento e, nesse caso, a capacidade de carga do elemento aumenta. Nos casos em que o betão é mal confinado, a tensão máxima atingida é semelhante à

do betão não confinado, o que acaba por indicar que para grandes deformações o confinamento não é suficiente para impedir a diminuição da capacidade de carga do provete com o acréscimo de deformação.

O nível de confinamento depende igualmente de diversos parâmetros, sendo os principais:

- geometria da secção transversal;
- pormenorização do sistema de confinamento
- características do material do confinamento.

Pela consulta da Figura 13 verifica-se, em termos qualitativos, o efeito de diferentes níveis de confinamento num pilar de betão armado, que variam do não confinado até ao betão confinado com FRP. É de salientar o aumento da ductilidade com o aumento do confinamento com armaduras e o grande aumento de resistência e ductilidade conferidos pelo confinamento de secções circulares com FRP.

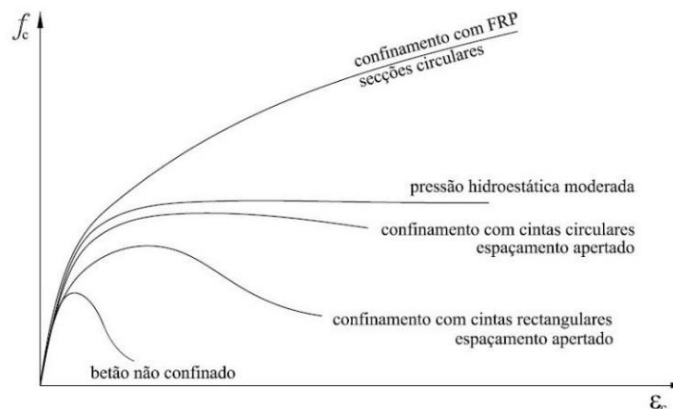


Figura 13 - Diagramas tensão-deformação do betão submetido a diversos tipos de confinamento (adaptado de Paula, 2003, citado por Rodrigues, 2005)

Na sequência do acima mencionado, o betão confinado com FRP permite aumentar significativamente a sua resistência e ductilidade, em que a eficiência do confinamento é tanto maior quanto mais a secção tender para uma secção circular. O efeito mencionado é representado na Figura 14, que teve como base os ensaios realizados por Paula (2003).

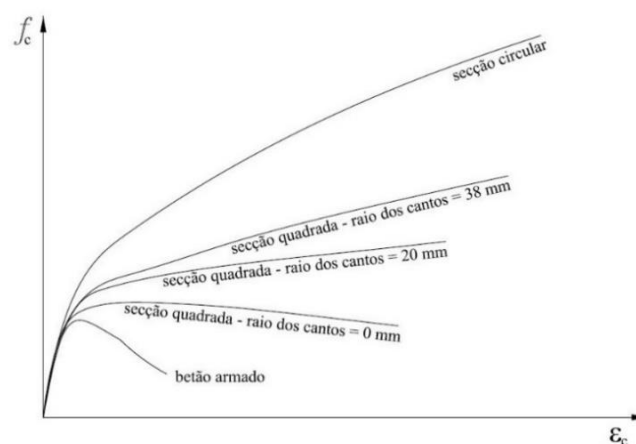


Figura 14 - Influência da secção no desempenho dos pilares confinados com FRP (Rodrigues, 2005)

O sistema de confinamento com CFRP pode ser aplicado de uma forma contínua ao longo de toda a altura do pilar, ou por faixas de determinada largura. Geralmente, este sistema é constituído por fibras unidireccionais, orientadas na direcção paralela à direcção transversal do pilar, ou seja, 0° . Contudo, as fibras podem ser aplicadas com outras direcções. No caso de aplicação sob a forma de mantas ou tecidos, deve sempre constar na pormenorização do confinamento o número de camadas a colocar. Na Figura 15 apresentam-se exemplos de pormenorizações típicas da aplicação dos sistemas de confinamento com FRP, referidas anteriormente.

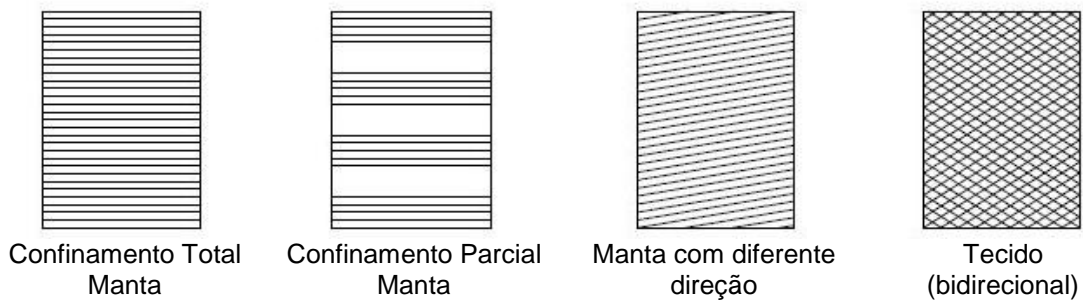


Figura 15 - Exemplos de pormenorizações do sistema de confinamento com FRP (Paula, 2003)

Dado que a tensão lateral de confinamento exercida pelo FRP sobre um pilar de betão depende da geometria da secção transversal, das propriedades do FRP e da sua pormenorização, os tecidos e as mantas são boas soluções, uma vez que apresentam elevada flexibilidade no que respeita à conceção da solução, sendo facilmente adaptáveis às diferentes geometrias das secções transversais.

3.2. Tensão lateral de confinamento

À semelhança do nível de confinamento, a tensão lateral de confinamento exercida pelo FRP num dado elemento de betão armado depende, essencialmente, de:

- geometria da secção transversal (circular, quadrada ou retangular, dependendo neste último caso da relação entre os lados da secção transversal);
- propriedades do FRP;
- pormenorização da solução.

No caso do confinamento com CFRP, a pressão de confinamento é efetuada de forma passiva, dado que o material apresenta elevada rigidez e a pressão de confinamento é variável. Ora, o confinamento depende da deformação transversal do betão, que por sua vez depende da carga axial exercida e da rigidez do sistema de confinamento utilizado.

3.2.1. Secções Circulares

Em pilares com secção transversal circular, a distribuição da pressão de confinamento é uniforme. Assim, quanto mais próxima desta for a secção do pilar a reforçar, mais uniforme será a

distribuição das pressões de confinamento e, conseqüentemente, maior será a eficiência do reforço. Para este tipo de secção, a tensão lateral de confinamento exercida pelas mantas de FRP, f_l , encontra-se representada na Figura 16.

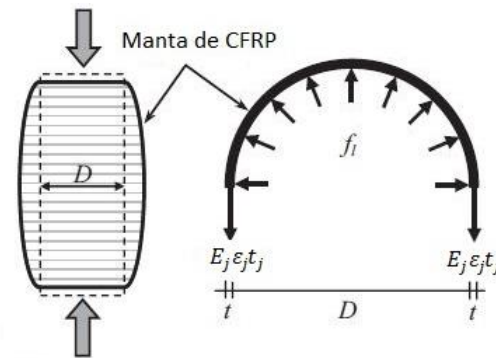


Figura 16 – Tensão lateral confinamento em seções circulares (adaptado de Sadeghian & Fam, 2015)

Como o aumento da tensão axial corresponde a um aumento da deformação transversal, o confinamento com as mantas de CFRP exerce uma pressão radial que reage contrariando a expansão lateral do betão, ocorrendo a rotura quando a sua resistência à tração é atingida.

Admitindo que a tensão na manta de FRP é uniforme, a tensão exercida no núcleo de betão é igualmente uniforme, e pode ser obtida através da Equação (1):

$$f_l = \frac{2t_j f_j}{D} \quad (1)$$

em que

- f_j - tensão de tração do FRP de confinamento;
- t_j - espessura do FRP de confinamento;
- D - diâmetro da secção de betão;

Dado que se admite que os FRP têm um comportamento elástico-linear até à rotura, é comum considerar-se a tensão lateral expressa na Equação (2), resultante da introdução da relação constitutiva do FRP na Equação (1).

$$f_l = \frac{2t_j E_j \epsilon_j}{D} \quad (2)$$

em que

- E_j - módulo de elasticidade à tração do FRP de confinamento;
- ϵ_j - extensão do FRP de confinamento.

De outra forma, a tensão lateral de confinamento em pilares de secção circular pode ainda ser expressa como:

$$f_l = \frac{\rho_j E_j \epsilon_j}{2} \quad (3)$$

com:

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

3.2.2. Secções Quadradas e Retangulares

No que concerne ao reforço de pilares de secção transversal quadrada ou retangular, existe o efeito de arqueamento de tensões, que causa uma distribuição de pressões de confinamento não uniforme, com concentração nos cantos da secção transversal. No reforço com FRP é particularmente importante atenuar esse efeito, dado que a concentração de tensões em pontos localizados causa a rotura prematura do compósito, prejudicando o desempenho do pilar reforçado.

Na sequência dos estudos realizados por Sudano e Hanai (2007), uma forma de potencializar o efeito de confinamento no reforço de pilares de secção quadrada ou retangular consiste no arredondamento dos cantos da secção transversal, diminuindo assim a concentração de tensões nestes pontos (ver Figura 17 e Figura 18).

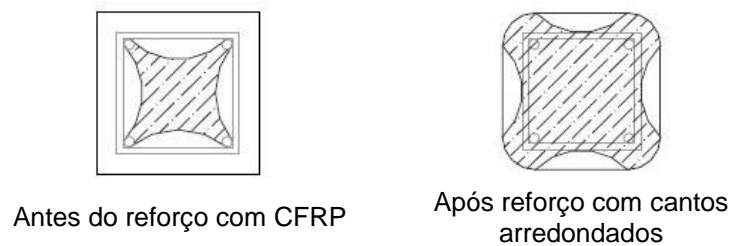


Figura 17 - Distribuição da pressão de confinamento antes e depois do reforço com CFRP e arredondamento dos cantos em seções quadradas (adaptado de Sudano & Hanai, 2007)

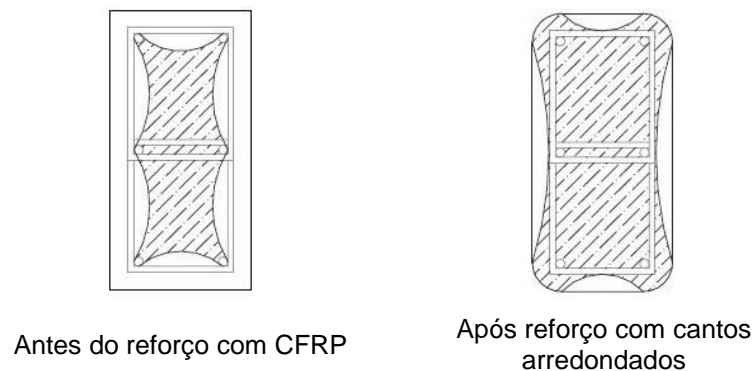


Figura 18 - Distribuição da pressão de confinamento antes e depois do reforço com CFRP e arredondamento dos cantos em seções retangulares (adaptado de Sudano & Hanai, 2007)

O cálculo das tensões laterais efetivas de confinamento surgiram, com base no estudo de Mander, Priestley e Park (1988), de maneira a ter em conta a influência da pormenorização das armaduras na determinação da tensão lateral em elementos de betão de secção retangular. Estas são calculadas para duas direcções perpendiculares, nomeadamente x e y, através das seguintes equações:

$$f_{lx,ef} = k_e \rho_{jx} E_j \varepsilon_j \quad (5)$$

$$f_{ly,ef} = k_e \rho_{jy} E_j \varepsilon_j \quad (6)$$

em que

k_e - coeficiente de eficácia do confinamento;

ρ_{jx} - relação volumétrica do FRP de confinamento segundo a direção x;

ρ_{jy} - relação volumétrica do FRP de confinamento segundo a direção y.

Como referido, em secções retangulares a tensão lateral de confinamento com FRP não é uniforme ao longo do perímetro da secção. Assim, o coeficiente de eficácia do confinamento é introduzido no cálculo das tensões laterais efetivas de confinamento, por forma a ter em conta a não uniformidade das tensões laterais.

Nas secções retangulares com os cantos arredondados, como ilustrado na Figura 19, admite-se a formação de um mecanismo de arco parabólico na secção do betão, com tangente inicial igual a 45° (Paula, 2003), que delimita o núcleo de betão efetivamente confinado. Contrariamente às secções circulares confinadas com FRP, uma parcela significativa da secção não é confinada.

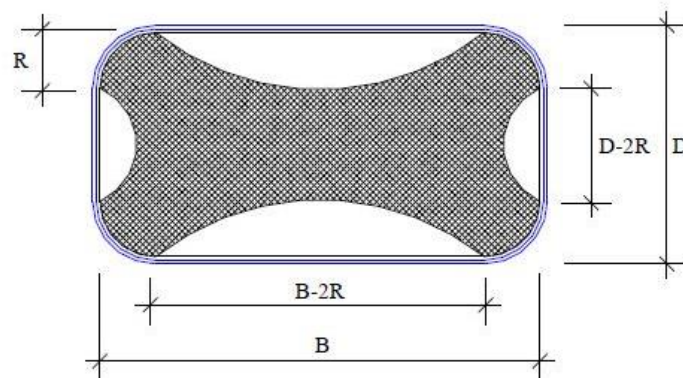


Figura 19 - Núcleo de betão efetivamente confinado numa secção retangular (Paula, 2003)

Considerando uma secção retangular com os cantos de raio R , e desprezando a espessura do FRP de confinamento, a área total de betão confinado é então expressa por:

$$A_t = A_g = B \times D - R^2(4 - \pi) \quad (7)$$

A área total de betão efetivamente confinada é dada por:

$$A_e = A_g - \sum_{i=1}^4 \frac{(s_c)_i^2}{6} = A_g - \frac{(B - 2R)^2 + (D - 2R)^2}{3} \quad (8)$$

em que

s_c - distância livre entre os cantos arredondados;

Não desprezando a área das armaduras longitudinais, o coeficiente de eficácia do confinamento resulta na seguinte expressão:

$$k_e = 1 - \frac{(B - 2R)^2 + (D - 2R)^2}{3A_g(1 - \rho_{sg})} \quad (9)$$

em que

ρ_{sg} - percentagem de armaduras longitudinais em relação à área total da secção de betão.

Nos elementos de betão com secção retangular e reforço contínuo de FRP, a relação volumétrica de FRP nas direções perpendiculares x e y é dada por:

$$\rho_{jx} = \frac{2t_j}{D} \quad (10)$$

$$\rho_{jy} = \frac{2t_j}{B} \quad (11)$$

Nas secções quadradas com igual confinamento de FRP nas duas direções, a tensão lateral efetiva de confinamento é também igual nas duas direções, sendo dada pela seguinte equação:

$$f_{lx} = k_e \rho_{jx} E_j \varepsilon_j = k_e \frac{2t_j E_j \varepsilon_j}{D} \quad (12)$$

4. Modelos de Comportamento do Betão Confinado

Reconhecida a grande vantagem da utilização da técnica de confinamento como reforço de pilares de betão armado com mantas de CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*), configurando uma alternativa à utilização do aço, têm surgido várias propostas de modelos analíticos que permitem a caracterização do comportamento à compressão do betão confinado com mantas de CFRP. Assim, para uma melhor análise dos vários modelos propostos, são diferenciados e analisados seguidamente os modelos de confinamento com armaduras de aço e, posteriormente, os modelos para o confinamento com FRP (*Fiber Reinforced Polymer*), nomeadamente os modelos calibrados ou testados através de ensaios experimentais com mantas de CFRP, são também analisados.

4.1. Modelos de confinamento com armaduras de aço

Os primeiros estudos sobre o comportamento do betão confinado, datados da década de 20, foram realizados em modelos de betão sujeitos a uma pressão lateral hidrostática ativa em pilares com armaduras em espiral, sobrepondo-se um esforço de compressão axial até à rotura dos provetes (Mander et al. 1988; Richart, Brandtzaeg & Brown, 1928).

Na análise dos modelos de confinamento com armaduras de aço, serão apresentados os modelos propostos por Richart et al. (1928) e o modelo proposto por Mander et al. (1988), salientando-se o facto de que este último tem sido exaustivamente avaliado por comparação com vários ensaios experimentais utilizando modelos de betão confinado com aço, para além de que serviu de base para os primeiros estudos sobre betão confinado com CFRP, sendo ainda incluído noutros modelos propostos mais recentemente.

4.1.1. Modelo de Richart et al. (1928)

Richart et al. (1928) verificaram que a tensão à compressão do betão confinado e a extensão última crescem na presença de pressões confinantes, pelo que propuseram as Equações (13) e (14). Estas equações relacionam a tensão máxima do betão não confinado com a do betão confinado, e a correspondente extensão axial.

$$f_{cc} = f_{co} + k_1 f_l \quad (\text{MPa}) \quad (13)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left(1 + k_2 \frac{f_l}{f_{co}} \right) \quad (14)$$

em que

- f_{co} - tensão máxima à compressão do betão não confinado;
- ε_{co} - extensão axial do betão correspondente a f_{co} ;
- f_{cc} - tensão máxima à compressão do betão confinado;
- ε_{cc} - extensão axial do betão correspondente a f_{cc} ;
- k_1, k_2 - coeficientes determinados experimentalmente, que variam nos diversos modelos analíticos existentes.

em que

- f_c - tensão de compressão do betão;
- ε_c - extensão axial correspondente a f_c ;
- E_c - módulo de elasticidade tangente do betão;
- E_{sec} - módulo de elasticidade secante do betão;

A extensão máxima proposta, tal como sugerido por Richart et al. (1928), é dada pela seguinte relação:

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right) \right] \quad (19)$$

Estes autores utilizaram ainda o conceito de tensão lateral efetiva de confinamento, $f_{l,ef}$, para ter em conta a influência da pormenorização das armaduras na determinação da tensão lateral em secções retangulares.

A tensão máxima do betão confinado é determinada a partir do ábaco apresentado na Figura 21, em função da tensão lateral efetiva de confinamento e, nos casos em que as tensões laterais são iguais, os autores propuseram a Equação (20).

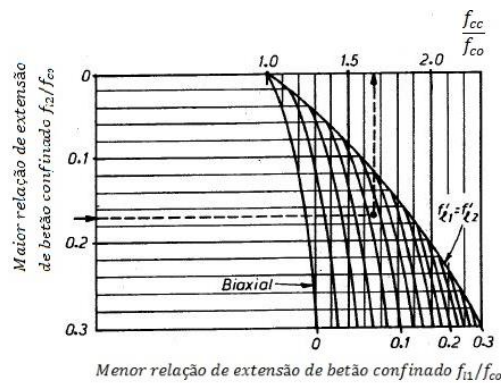


Figura 21 - Determinação da tensão máxima do betão confinado (adaptado de Mander et al., 1988)

$$f_{cc} = f_{co} \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_{l,ef}}{f_{co}}} - 2 \left(\frac{f_{l,ef}}{f_{co}} \right) \right) \quad (20)$$

A pressão efetiva de confinamento lateral exercida pelas cintas, apresentada na Equação (21), é dada pelo produto da pressão lateral de confinamento pelo coeficiente efetivo de confinamento, pela razão de a pressão lateral de confinamento não ser uniforme ao longo do pilar:

$$f_{l,ef} = f_l k_e \quad (21)$$

O coeficiente k_e depende da relação entre a área do núcleo de betão efetivamente confinado e a área da secção de betão confinada, dada por:

$$k_e = \frac{A_e}{A_g} \quad (22)$$

4.2. Modelos de Confinamento com CFRP

Nos últimos anos, foram vários os modelos analíticos desenvolvidos para prever o comportamento do betão confinado, os quais foram desenvolvidos, na maior parte dos casos, considerando a hipótese da pressão de confinamento ser constante. Contudo, quando se utilizam sistemas em que a tensão instalada aumenta de forma linear com o aumento da extensão até à rotura, essa hipótese não é válida. Este facto verifica-se na utilização de materiais compósitos para o confinamento, como é o caso das mantas de CFRP estudadas na presente dissertação.

Os primeiros modelos desenvolvidos para prever o comportamento do betão confinado com CFRP surgiram com base em modelos originalmente desenvolvidos para o confinamento com aço (Mander et al., 1988; Saafi, Toutanji, & Zongjin, 1999; Samaan, Mirmiran, & Shahawy, 1998). Nestes modelos, a área transversal de aço é substituída por uma área equivalente de FRP e considera-se a tensão de rotura do FRP em vez da tensão de cedência do aço (Carrazedo, 2002; Chastre & Silva, 2010; Paula, 2003; Pereira, 2012).

No entanto, tem vindo a ser demonstrado que o betão confinado com estribos de aço (ou tubos de aço) difere do comportamento do betão confinado com materiais compósitos, como se verifica na Figura 22, que compara diagramas genéricos de tensão-extensão axial do betão não confinado e confinado com aço e com CFRP, normalizados em relação à máxima tensão e extensão axial do betão não confinado.



Figura 22 - Comparação entre os diagramas tensão-extensão axial do betão não confinado e confinado com aço e com FRP (Adaptado de Spoelstra & Monti, 1999)

Analisando a Figura 22, verifica-se que as grandes diferenças surgem após o primeiro troço dos diagramas, em que a sua fase inicial é idêntica à fase elástica do betão não confinado. Dado que o confinamento com FRP é de natureza passiva, os seus efeitos só se começam a notar após atingir um nível próximo da tensão de rotura do betão não confinado, fazendo com que a determinação do primeiro ramo do diagrama dependa essencialmente das propriedades intrínsecas do betão. Depois de atingida a tensão máxima do betão não confinado, verifica-se que, no caso do betão confinado com aço, o diagrama regista uma perda de rigidez após a tensão máxima, enquanto que no caso do betão confinado com CFRP o diagrama é sempre crescente até atingir a rotura.

Os modelos numéricos disponíveis na bibliografia para definir o comportamento do betão confinado com FRP sujeito a compressão axial separam-se em dois grupos principais:

- modelos que permitem a representação dos diagramas tensão-extensão;
- equações que permitem estimar a tensão de rotura e respetiva extensão axial.

Segundo Paula (2003), a grande maioria dos modelos inclui vários parâmetros que foram calibrados com base em ensaios de provetes com confinamento de FRP. Todavia, a maioria foi realizada com provetes de secção circular, sem armadura.

Para além destes modelos, existem também análises através de modelos incrementais de elementos finitos com consideração da plasticidade. Nestes casos, o betão foi modelado como um material elasto-plástico perfeito e o critério de rotura adotado foi o critério associativo de Drucker-Prager. Apesar do modelo numérico permitir descrever adequadamente o comportamento de pilares de secção circular e quadrada confinados com FRP, sujeitos a um carregamento axial, é necessária uma formulação mais complexa para secções de diferentes formas, orientação das fibras e combinações de cargas (Rochette & Labossière, 1996).

Os modelos de confinamento com FRP que se apresentam de seguida correspondem aos modelos propostos por Fardis e Khalili (1982), Toutanji (1999), Spoelstra e Monti (1999), Manfredi e Realfonzo (2001), Ferreira (2007), Chastre e Silva (2010) e Wei e Wu (2011). Com exceção do modelo de Fardis e Khalili (1982), todos os outros modelos permitem determinar os diagramas tensão-extensão do betão confinado com FRP. Este modelo foi o primeiro a considerar o confinamento com FRP.

Nas investigações realizadas por Toutanji (1999) e Wei e Wu (2011), os provetes ensaiados eram compostos por betão simples (sem armaduras). No desenvolvimento dos modelos de Ferreira (2007), Spoelstra e Monti (1999), Manfredi e Realfonzo (2001) e Chastre e Silva (2010), os provetes testados eram compostos por betão armado. Estes modelos foram ensaiados com mantas de CFRP em provetes totalmente confinados, excepcionando-se o modelo de Ferreira (2007), em que a sua análise incidiu sobre provetes parcial e totalmente confinados.

Os modelos analíticos apresentados têm em conta o confinamento com FRP e cada um apresenta vantagens e desvantagens. O modelo proposto por Wei e Wu (2011) é, de entre os expostos, o mais simples, uma vez que apresenta a simplificação do segundo troço da curva tensão-extensão. É um modelo versátil e pode ser facilmente adaptado a pilares com diferentes geometrias. O modelo proposto por Spoelstra e Monti (1999) é o que envolve mais procedimentos de cálculo e é, portanto, o mais complexo. Este modelo permite determinar não só a relação tensão-extensão axial como também a relação tensão axial-extensão lateral do betão. O modelo apresentado por Manfredi e Realfonzo (2001) resulta de ligeiras modificações do modelo apresentado por Spoelstra e Monti (1999), por forma a ter em conta o efeito da geometria no confinamento com materiais compósitos de secções quadradas. Estes modelos consideram que a extensão lateral do betão é igual à extensão do material compósito ao longo do carregamento, à exceção do modelo apresentado por Chastre e Silva (2010), que introduz um coeficiente de

redução, precisamente para considerar que a extensão lateral do betão é menor do que a extensão do FRP, devido à não aderência perfeita entre os materiais (Varma, 2012).

Apenas os modelos investigados por Manfredi e Realfonzo (2001) e Ferreira (2007) consideram que a tensão lateral de confinamento aumenta ao longo do carregamento, contrariamente a todos os outros modelos referidos.

Cada uma destas propostas considera vários parâmetros, dos quais dependem o nível de confinamento. A geometria da secção transversal, a influência do tipo de betão, do tipo de mantas, do número de camadas, da orientação das fibras, se o confinamento é total ou parcial, o tipo de carga (monotónica ou cíclica), são alguns dos parâmetros estudados pelos diferentes investigadores. Cada autor propõe ainda equações para a determinação dos coeficientes de confinamento (k_1 e k_2), que dependem das calibrações realizadas em cada estudo.

4.2.1. Modelo de Fardis e Khalili (1982)

Fardis e Khalili (1982), propuseram que o modelo de Richart et al. (1928) fosse diretamente aplicado em modelos de confinamento com FRP. Assim, a expressão geral para o cálculo da tensão máxima à compressão do betão confinado é a proposta por estes autores (Equação (13)). No entanto, estudos posteriores efetuados por Mirmiran e Shahawy (1997), Samaan et al. (1998) e Saafi et al. (1999) mostraram que os modelos de confinamento com aço sobrestimavam o incremento de capacidade de carga obtida através do confinamento com FRP, pelo que foram propostos modelos específicos para estes casos. Nestes modelos, surgiram várias expressões para o cálculo do coeficiente de confinamento k_1 , como é o caso do modelo de Toutanji (1999).

4.2.2. Modelo de Toutanji (1999)

O modelo proposto por Toutanji (1999) teve por base ensaios experimentais em provetes de betão simples confinados com mantas ou tecidos flexíveis de CFRP e GFRP. Trata-se de um modelo incremental em que o investigador considera que ao longo do carregamento a extensão lateral, ε_l , é igual à extensão existente no compósito de FRP e que na rotura do modelo o FRP atinge a sua capacidade última à tração.

Os diagramas ilustrados na Figura 23 de tensão-extensão (lateral e axial) são caracterizados por duas regiões distintas. Na primeira região considera-se que o comportamento do betão confinado é semelhante ao comportamento do betão não confinado, com rigidez E_{1a} ou E_{1l} . Na segunda região, com rigidez E_{2a} ou E_{2l} , considera-se que o compósito de FRP já está ativado e que o comportamento é influenciado essencialmente pela sua rigidez. O ponto de interseção entre os dois ramos ocorre quando a extensão lateral é igual a 2‰, iniciando-se nesse ponto o segundo ramo, até atingir a tensão de rotura.

Segunda região do diagrama tensão-extensão

Tendo por base as Equações (13) e (14) apresentadas por Richart et al. (1928), e para cada valor da extensão lateral, calcula-se a tensão axial e a respetiva extensão axial através das seguintes expressões:

$$f_a = f_{co} \left(1 + 3.5 \left(\frac{f_l(\epsilon_l)}{f_{co}} \right)^{0.85} \right) \quad (23)$$

$$\epsilon_a = \epsilon_{co} \left(1 + (310.57\epsilon_l + 1.9) \left(\frac{f_c}{f_{co}} - 1 \right) \right) \quad (24)$$

Os coeficientes k_1 e k_2 foram determinados utilizando uma regressão linear sobre os dados obtidos dos ensaios realizados pelo autor do modelo.

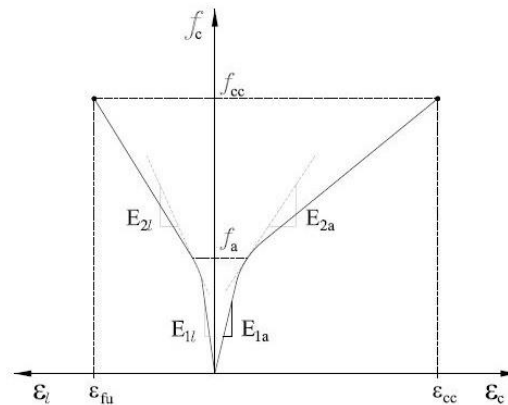


Figura 23 - Parâmetros do modelo proposto por Toutanji (Adaptado de Toutanji, 1999)

Primeira região do diagrama tensão-extensão

O primeiro ramo do diagrama tensão-extensão axial corresponde à fase inicial elástica até um valor de tensão ligeiramente superior à tensão máxima do betão não confinado, e é expresso na Equação (25):

$$f_c = \frac{A\epsilon_c}{1 + B\epsilon_c + C\epsilon_c^2} \quad (25)$$

sendo os parâmetros A , B e C determinados pelas seguintes equações:

$$A = E_1 \quad (26)$$

$$B = \frac{E_1}{f_a} - \frac{2}{\epsilon_1} + \frac{E_1 E_2 \epsilon_1}{f_a^2} \quad (27)$$

$$C = \frac{1}{\epsilon_1^2} - \frac{E_1 E_2}{f_a^2} \quad (28)$$

em que

- E_1 - rigidez do primeiro ramo;
- E_2 - rigidez do diagrama no ponto de interseção entre os dois ramos;
- f_a, ϵ_a - tensão-extensão axial do ponto de interseção dos dois ramos do diagrama.

No que concerne à determinação dos valores dos módulos E_{1a} e E_{1l} correspondentes aos diagramas tensão-deformação axial e lateral, utilizam-se as Equações (29) e (30):

$$E_{1a} = 10200(f_c)^{1/3} \quad (29)$$

$$E_{1l} = 51000(f_c)^{1/3} \quad (30)$$

A determinação da tensão, e correspondente extensão axial, do ponto de interseção entre os dois ramos do diagrama, que ocorre quando a extensão lateral é 2‰, obtém-se através de:

$$f_a = f_{co} \left(1 + 0.0178 \left(\frac{t_j E_j}{D f_{co}} \right)^{0.85} \right) \quad (31)$$

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{co} \left[1 + 0.0448 \left(\frac{t_j E_j}{D f_{co}} \right)^{0.85} \right] \quad (32)$$

O modelo proposto por este autor surgiu como modelo específico para o confinamento com CFRP e GFRP, melhorando a abordagem realizada por Fardis e Khalili (1982), introduzindo ainda a relação da tensão axial com a extensão lateral do betão. No entanto, uma das principais conclusões do estudo experimental e analítico de Saafi et al. (1999) foi precisamente que o modelo de Toutanji (1999) sobrestima a resistência do betão confinado com tubos de FRP. Estas diferenças foram relacionadas com o facto da tensão de aderência entre o betão e o FRP ser superior nos casos em que se utilizam mantas ou tecidos.

Este modelo apresenta a desvantagem ter sido calibrado com apenas um tipo de secção transversal, nomeadamente, em provetes cilíndricos de betão simples (sem armadura) totalmente confinados, e ainda de considerar que a tensão lateral de confinamento exercida pelas mantas de FRP é constante ao longo de todo o carregamento, contrariamente ao modelo proposto por Spoelstra e Monti (1999), que considera o aumento contínuo da tensão lateral de confinamento ao longo do carregamento. Este modelo considera ainda que a extensão lateral do betão é igual à extensão no FRP, contrariamente ao que as investigações realizadas por Chastre e Silva (2010) apontam.

Toutanji Melhorado (2006)

Posteriormente, o mesmo autor propõe alterações ao modelo apresentado, surgindo então o modelo de Toutanji Melhorado (2006). Como o próprio nome indica, este surge na sequência de melhorias ao modelo anteriormente apresentado, em que, com base nos ensaios experimentais realizados por Matthys, Toutanji, & Taerwe (2006) que incidiu em pilares circulares de grande escala, os autores verificaram que a extensão circunferencial de rotura é maioritariamente inferior à extensão de rotura obtida em ensaios à compressão. Assim, o modelo de Toutanji Melhorado (2006) introduz um fator de redução na tensão lateral de confinamento na rotura, expressa na Equação (33):

$$f_t = \frac{2t_j E_j \varepsilon_{ctu}}{D} \quad (33)$$

em que

$$\varepsilon_{ctu} = \beta \varepsilon_{lu} \quad (34)$$

Usando o fator de redução com valor de 0.6 e substituindo a tensão lateral de confinamento na Equação (23), o modelo de Toutanji Melhorado (2006) prevê o comportamento do betão confinado na segunda região do diagrama através da seguinte equação:

$$f_a = f_{co} \left(1 + 2.3 \left(\frac{\bar{f}_l}{f_{co}} \right)^{0.85} \right) \quad (35)$$

em que

$$f_l = \frac{2t_j E_j \varepsilon_{lu}}{D} \quad (36)$$

As restantes equações propostas no Modelo de Toutanji (1999) mantêm-se inalteradas. Assim, a principal vantagem do modelo de Toutanji Melhorado (2006) é a de que, na sequência do cálculo da tensão axial última, a tensão lateral de confinamento é função direta da tensão última do FRP.

4.2.3. Modelo de Spoelstra e Monti (1999)

O modelo proposto por Spoelstra e Monti (1999) trata-se de um modelo iterativo e incremental, que permite ter em conta o aumento contínuo da tensão lateral de confinamento, bem como a interação entre a dilatação lateral do betão e do FRP. Baseia-se na formulação de Mander et al. (1988), para a representação do diagrama tensão-extensão axial, e numa equação proposta por Patanzopoulou e Mills (1995), que relaciona a extensão lateral com a extensão axial. A tensão de compressão do betão é calculada através da Equação (15) proposta por Mander et al. (1988).

Admite-se que a extensão axial do betão correspondente à tensão máxima de compressão do betão não confinado é de 2‰ e que o módulo de elasticidade tangente na origem é dado pela seguinte expressão:

$$E_c = 5700 \sqrt{f_{co}} \quad (37)$$

Para o cálculo da tensão e da extensão máxima do betão confinado, os autores propõem o uso das Equações (19) e (20), também apresentadas por Mander et al. (1988), em que a tensão lateral de confinamento, modificada por Karbhari et al. (1997), é dada pela Equação (2).

Os autores consideram que, por compatibilidade, a extensão do FRP é igual à extensão lateral do betão ($\varepsilon_j = \varepsilon_l$), que, por sua vez, é definida com base na expressão de Patanzopoulou e Mills (1995). No sentido de ter este aspeto em consideração, Spoelstra e Monti (1999) propuseram então a seguinte equação:

$$\varepsilon_l(\varepsilon_c, f_l) = \frac{E_c \varepsilon_c - f_c(\varepsilon_c, f_l)}{2\beta f_c(\varepsilon_c, f_l)} \quad (38)$$

em que a constante β é função das características mecânicas do betão não confinado, dado pela Equação (39):

$$\beta = \frac{E_c}{|f_{co}|} - \frac{1}{|\varepsilon_{co}|} \quad (39)$$

atendendo ainda a que a extensão lateral é calculada através da Equação (38), a extensão axial pode ser determinada em cada momento, com base na tensão $f_f = E_j \varepsilon_j$, devido ao facto de que em secções circulares a extensão na manta de FRP, ε_j , é igual à deformação lateral do betão, ε_l .

O diagrama tensão-extensão axial é então construído, para valores crescentes da extensão axial, adotando o processo iterativo representado na Figura 24, até que haja convergência do valor da tensão lateral.

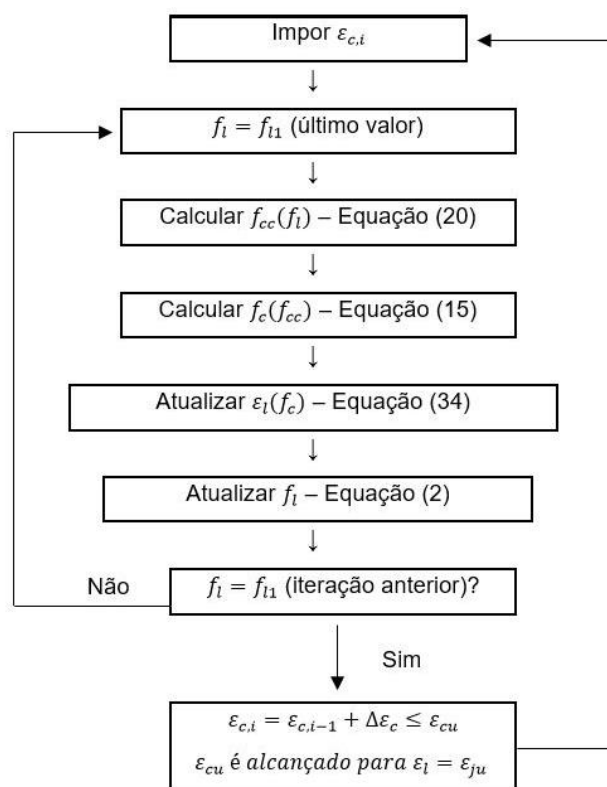


Figura 24 - Procedimento iterativo do modelo proposto por Spoelstra e Monti, 1999 (Adaptado de Spoelstra & Monti, 1999)

O modelo apresentado pelos investigadores Manfredi e Realfonzo (2001), que se aborda seguidamente, propõe alterações ao modelo de Spoelstra e Monti (1999), pelo que as vantagens de ambos os modelos são descritas após a exposição das duas propostas.

4.2.4. Modelo de Manfredi e Realfonzo (2001)

Como referido, o modelo apresentado por Manfredi e Realfonzo (1999), resulta de pequenas modificações ao modelo desenvolvido inicialmente por Spoelstra e Monti (1999). Estas modificações surgem por forma a ter em conta o efeito da geometria da secção no confinamento

com FRP nas secções quadradas, com a introdução de dois parâmetros denominados por coeficiente de eficácia do confinamento e coeficiente de redução. Assim, estes parâmetros foram introduzidos para o cálculo da tensão efetiva de confinamento, apresentada na Equação (40):

$$f_{l,ef} = k_e \frac{2nt_j E_j}{D} c_r \varepsilon_j \quad (40)$$

em que o coeficiente de eficácia é o descrito na Equação (9), apresentada anteriormente, e o respetivo coeficiente de redução é calculado através da seguinte expressão:

$$c_r = 1.17 \frac{R}{D} + 0.10 \quad (41)$$

Importa ainda referir que a introdução do coeficiente de redução no modelo abordado surge das investigações realizadas pelos autores aos ensaios de Rochette & Labossière (1996; 2000), tendo estes realizado ensaios em colunas cilíndricas e retangulares confinadas com FRP. Este parâmetro quantifica a eficiência do sistema de confinamento, tal que esta eficiência aumenta à medida que a relação R/D ($R/D = 0.5$ - secções circulares) aumenta. O modelo considera ainda que $\varepsilon_{lu} = \varepsilon_j$.

Neste sentido, as alterações introduzidas pelos autores ao modelo anteriormente proposto por Spoelstra e Monti (1999), apresenta diversas vantagens. Para além do modelo considerar que a tensão lateral de confinamento aumenta com o carregamento, contrariamente ao que se verifica nos restantes modelos expostos (com exceção do Modelo de Ferreira, 2007), é ainda introduzido um fator de redução, que varia de acordo com a geometria da secção transversal da coluna. Na representação do diagrama tensão-extensão, para além da relação axial, inclui-se a relação tensão axial-extensão lateral do betão, e o modelo é aplicável a geometrias circulares e quadradas. O modelo tem ainda em consideração a existência de armaduras longitudinais.

A desvantagem da aplicação deste modelo está associada à única calibração das colunas em provetes totalmente confinados com CFRP, a falta de consideração de armaduras transversais e, sem referência ao possível confinamento parcial, o que foi investigado e implementado no modelo de Ferreira (2007).

4.2.5. Modelo de Ferreira (2007)

O modelo de Ferreira (2007) surge para ter em conta a influência do confinamento parcial em detrimento do confinamento total. Assim, este modelo teve por base a simulação do comportamento de provetes de betão com secção circular reforçados, total ou parcialmente, com CFRP, sujeitos a compressão axial monotónica.

A relação tensão-extensão do modelo proposto é apresentada, esquematicamente, na Figura 25. Para o desenvolvimento deste modelo, o autor teve por base os estudos realizados por Lam e Teng (2003) e por Harajli, Hantouche, & Soudki (2006).

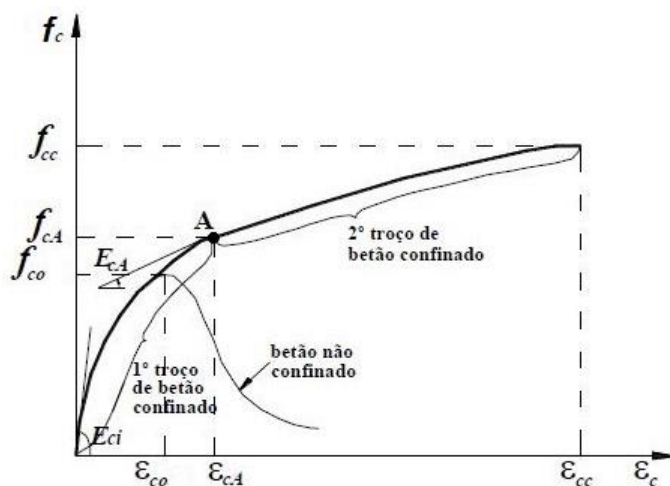


Figura 25 - Curva típica tensão-extensão do betão não confinado e confinado com CFRP (Ferreira, 2007)

A curva tensão-extensão do betão confinado com CFRP é definida essencialmente por dois troços, sendo os mesmos ascendentes até à rotura ser atingida. No primeiro troço, a influência do CFRP não é significativa, dado que o betão inicialmente não apresenta grandes deformações transversais. Numa fase posterior, o betão começa a fissurar, altura em que a manta de CFRP entra em funcionamento, restringindo as deformações laterais do betão.

O ponto A é definido por uma extensão e por uma tensão, respetivamente ϵ_{cA} e f_{cA} que separa os dois troços da curva tensão-extensão apresentados. Contrariamente ao que ocorre no segundo troço do diagrama, onde se verifica uma influência significativa da pressão lateral de confinamento exercida pelas mantas de CFRP, no primeiro troço a sua influência é marginal (Ferreira, 2007).

Nas situações em que a expansão volumétrica do betão ocorre antes da tensão de compressão máxima do betão não confinado se instalar, o ponto A é obtido para a extensão mínima no CFRP, ϵ_f , sendo esta a extensão a partir da qual a manta influencia de forma significativa a resposta do betão confinado. Com base nos ensaios do autor, nas extensões axiais medidas no CFRP correspondentes a ϵ_{co} , o valor de $3,0 \times 10^{-5}$ é assumido para a extensão no CFRP (ϵ_f), definindo-se, portanto, a extensão e a tensão axial no ponto de interseção.

Segundo troço do diagrama tensão-extensão

Para a obtenção das curvas tensão-extensão que definem o segundo troço ascendente, Ferreira (2007) utilizou as expressões propostas por Harajli et al. (2006):

$$f_c = f_{co} + k_1 f_l \quad \text{para } \epsilon_c \geq \epsilon_{cA} \quad (42)$$

$$\epsilon_c = \epsilon_{co} \left[1 + k_2 \left(\frac{f_c}{f_{co}} - 1 \right) \right] \quad \text{para } \epsilon_c \geq \epsilon_{cA} \quad (43)$$

em que

$$f_{l,ef} = f_{fl} + f_{sl} \frac{A_e}{A_g} \quad (44)$$

é a pressão lateral efetiva de confinamento, e k_1 e k_2 são dois parâmetros obtidos através dos resultados experimentais referentes a séries de ensaios em provetes de betão armado confinados com CFRP.

As pressões laterais de confinamento exercidas pelo CFRP e pelos estribos, respetivamente f_{fl} e f_{sl} , podem ser determinadas pelas seguintes expressões:

$$f_{fl} = \frac{\alpha_{fe} \alpha_{fv} \rho_j E_j \varepsilon_j}{2} \quad (45)$$

$$f_{sl} = \frac{\alpha_{se} \alpha_{sv} \rho_{st}}{2} f_{sy} \quad (46)$$

em que

ρ_{st} - percentagem de confinamento do estribo de aço;

α_{fe} ; α_{se} - coeficientes relacionados com a geometria do provete;

α_{fv} ; α_{sv} - coeficientes que atendem à configuração do confinamento.

A percentagem volumétrica de confinamento com CFRP, bem como a percentagem volumétrica de confinamento com estribos de aço, podem ser calculadas pelas Equações (47) e (48), respetivamente:

$$\rho_j = 4 \times \frac{S \times W \times n \times t_j}{D \times H} \quad (47)$$

$$\rho_{st} = \frac{A_{st}}{d_{st} s_s} \quad (48)$$

Para provetes com secção circular, o coeficiente $\alpha_{fe} = \alpha_{se} = 1.0$, e quando estão totalmente confinados com mantas de CFRP, $\alpha_{fv} = 1.0$. Para provetes confinados parcialmente com faixas de CFRP o valor do coeficiente α_{fv} pode ser obtido através da expressão de Mander et al. (1988):

$$\alpha_{fv} = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2D}\right)^2}{1 - \frac{A_{st}}{A_g}} \quad (49)$$

em que

s' - espaçamento livre entre faixas de CFRP (provetes totalmente confinados correspondem a $s'=0$);

A_{st} - área da secção transversal do reforço longitudinal.

e para o confinamento de provetes com estribos de aço, o valor do coeficiente α_{sv} poderá ser obtido através da Equação (50):

$$\alpha_{sv} = \frac{\left(1 - \frac{s_s}{2d_{st}}\right)^2}{1 - \frac{A_{st}}{A_g}} \quad (50)$$

em que

s_s - espaçamento livre entre as cintas de aço;

d_{st} - diâmetro do núcleo de betão confinado com os estribos;

Os parâmetros descritos anteriormente nas Equações (49) e (50) podem ser visualizados na Figura 26, apresentada de seguida, que representa o sistema genérico de confinamento adotado na segunda fase do programa experimental realizado pelo autor, em que os provetes de betão armado são compostos por faixas de mantas de CFRP, fixas ao betão e às camadas subjacentes por intermédio de uma resina epóxida.

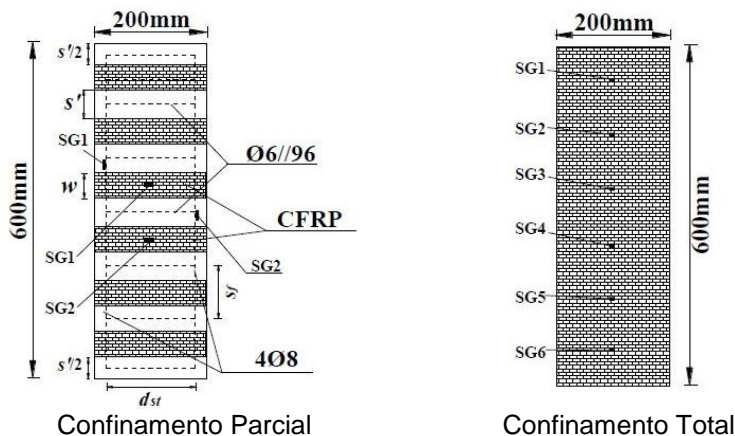


Figura 26 - Sistema genérico de confinamento parcial ou total com CFRP (Ferreira, 2007)

Para a determinação dos coeficientes de confinamento, k_1 e k_2 , apresentados nas Equações (42) e (43), o autor baseou-se em ensaios experimentais em provetes de betão com secção circular, divididos respetivamente por betão de baixa resistência e de alta resistência. No que concerne à sua classe de resistência acresce informar que os mesmos foram classificados com base na sua resistência média aos 28 dias, ou seja, o betão de baixa resistência apresentou uma resistência média à compressão, aos 28 dias, de 16 MPa, e o betão de alta resistência apresentou uma resistência média à compressão de 32 MPa.

Assim, para a obtenção da expressão de k_1 utilizado na Equação (42), Ferreira (2007) baseou-se nos resultados experimentais obtidos dos estudos realizados. Os valores obtidos variaram de acordo com a classe de resistência do betão e podem ser determinados através da seguinte expressão:

$$k_1 = a \left(\frac{f_l}{f_{co}} \right)^{-b} \quad (51)$$

Os parâmetros a e b variam igualmente de acordo com a classe de resistência do betão, sendo então possível a sua determinação através das seguintes equações:

$$a = 2.9 + 72.848(\rho_j - 0.0025) \text{ e } b = 0.2177, \text{ para C16 e } \rho_j \in [0.0025; 0.0176] \quad (52)$$

$$a = 2.0 + 125.828(\rho_j - 0.0025) \text{ e } b = 0.42 - 7.947(\rho_j - 0.0025), \text{ para C32 e } \rho_j \in [0.0025; 0.0176] \quad (53)$$

Para os casos em que a resistência do betão se encontre entre 16 MPa e 32 MPa, Ferreira (2007) admite que se possa determinar os valores do coeficiente k_1 por interpolação linear, usando para tal a Equação (51).

Relativamente aos valores de k_2 , considerado na Equação (43), estes foram novamente obtidos com base nos ensaios realizados por Ferreira (2007). À semelhança dos resultados obtidos para o coeficiente k_1 , os valores do coeficiente k_2 foram distintos consoante a classe de resistência do betão dos provetes ensaiados.

O autor concluiu, a partir da análise dos resultados obtidos, que o coeficiente k_2 apresenta uma tendência para aumentar com a diminuição da capacidade resistente do betão e, para uma dada classe de resistência do betão, a variação de k_2 com ε_j tende a ser tão mais elevada quanto menor for a percentagem de confinamento, ρ_j .

As expressões seguintes foram obtidas para a determinação do coeficiente de confinamento, de acordo com os betões de baixa (C16) e alta resistência (C32):

$$k_2 = [555 - 29006(\rho_j - 0.0025)]\varepsilon_j + 2.0 \text{ para C16 e } \rho_j \in [0.0025; 0.0176] \quad (54)$$

$$k_2 = [600 - 28695(\rho_j - 0.0025)]\varepsilon_j + 1.0 \text{ para C32 e } \rho_j \in [0.0025; 0.0176] \quad (55)$$

Para os casos em que os provetes com capacidade resistente, f_{co} , se encontrem entre 16 e 32 MPa (C16 e C32, respetivamente), os valores do coeficiente k_2 podem ser obtidos por interpolação linear, usando para tal as Equações (54) e (55).

Primeiro troço do diagrama tensão-extensão

Por forma a simular o primeiro troço da curva tensão-extensão, o autor refere que poderiam ser utilizadas as expressões propostas por Mander et al. (1998) ou as equações recomendadas pelo CEB-FIP Model Code (1990). No entanto, Ferreira (2007) recorreu ao uso de uma equação de terceiro grau, de maneira a ajustar o primeiro troço com maior exatidão:

$$f_c = B\varepsilon_c^3 + C\varepsilon_c^2 + E_{ci}\varepsilon_c \text{ para } \varepsilon_c < \varepsilon_{cA} \quad (56)$$

em que

$$B = -\frac{2}{\varepsilon_{cA}^3} D \quad (57)$$

$$C = \frac{E_{cA}}{2\varepsilon_{cA}} - \frac{E_{ci}}{2\varepsilon_{cA}} + \frac{3}{\varepsilon_{cA}^2} D \quad (58)$$

$$D = f_{cA} - 0,5\varepsilon_{cA}(E_{ci} + E_{cA}) \quad (59)$$

onde E_{cA} corresponde à tangente ao segundo troço das curvas tensão-extensão no ponto A (ver Figura 25), e pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$E_{cA} = \frac{f_{cA}}{k_{2R}\varepsilon_{cA}} \quad (60)$$

sendo

k_{2R} - valor de k_2 obtido para $\varepsilon_j = 3\text{‰}$ por forma a assumir a continuidade, tanto quanto possível, entre as tangentes do primeiro e do segundo troço da curva tensão extensão, no ponto A.

O estudo realizado pelo autor incidiu sobre a avaliação do desempenho dos provetes quanto ao incremento da capacidade de carga, índice de ductilidade e, capacidade de absorção de energia proporcionada pelo confinamento com CFRP. Para tal, teve em conta a influência do tipo de betão, de mantas utilizadas, de percentagem de armadura longitudinal e do número de camadas de CFRP na eficácia do confinamento. Dos ensaios realizados, o autor verificou que, no que concerne ao incremento de capacidade de carga, nos casos em que o betão do provete tem uma resistência baixa, o recurso ao confinamento total é o mais indicado e, nos casos em que o confinamento parcial é vantajoso, o incremento de carga é tanto maior quanto menor o espaçamento entre faixas.

Uma das outras vantagens apresentadas pelo modelo é o facto de este ter em conta a influência da percentagem de armadura longitudinal e transversal, bem como do tipo de mantas e do número de camadas de CFRP na eficácia do confinamento. À semelhança do modelo de Manfredi e Realfonzo (2001), este modelo também considera que a tensão lateral de confinamento aumenta com o carregamento. Apesar de não se verificar um aumento considerável do incremento da capacidade de carga com 3 ou 5 camadas de CFRP para provetes com betão de maior resistência, nos casos em que o betão é de resistência menor o seu aumento é significativo.

A principal desvantagem deste modelo incide sobre o facto da sua calibração ter sido realizada exclusivamente em pilares de betão com secção cilíndrica, não tendo a versatilidade de adotar diferentes geometrias da secção transversal, como é o caso dos modelos propostos pelos autores Manfredi e Realfonzo (2001) e Wei e Wu (2011), para além do modelo apenas ser aplicável a provetes cujas resistências à compressão se encontrem entre o intervalo de valores de 16 e 32 MPa. Este intervalo surge da diferenciação realizada ao nível do incremento da capacidade de carga em provetes com baixa e alta resistência.

4.2.6. Modelo de Chastre e Silva (2010)

O modelo proposto por Chastre e Silva (2010) surge no sentido de dar um contributo para a avaliação do comportamento de provetes cilíndricos com betão armado, tendo em consideração a influência da forma, da espessura da manta, da consideração de armadura longitudinal e transversal e da qualidade do betão no confinamento com mantas de CFRP, uma vez que a influência destes fatores estão ainda a ser discutidos por vários autores. Assim, para além dos ensaios experimentais efetuados, os autores fizeram igualmente uso de uma extensa base de dados experimentais para desenvolver equações empíricas que permitissem prever a resistência à compressão do betão confinado com CFRP e as correspondentes deformações axial e lateral quando é atingida a rotura, e apresentar um modelo para provetes de secção circular sujeitos à compressão monotónica.

A tensão máxima de compressão no betão confinado, f_{cc} , está relacionada com a resistência do betão não confinado, f_{co} , e com a pressão lateral de confinamento, f_l , exercida pela manta de CFRP, através da equação seguinte:

$$f_{cc} = f'_{co} + k_1 f_l \quad (61)$$

A Equação (52) foi calibrada através da análise dos ensaios experimentais realizados pelos autores, com base nos dados de Matthys, (2000), Paula e Silva (2002) e Braga (2005). Os autores propuseram ainda o coeficiente $k_1 = 5.29$.

A tensão máxima de compressão do betão não confinado obtida, f'_{co} , é dada por:

$$f'_{co} = \alpha f_{co} \quad (62)$$

para ter em conta o efeito de escala das forças obtidas em ensaio de resistência à compressão em colunas de betão *versus* o valor obtido em provetes cilíndricos normalizados de tensão de compressão no betão não confinado, os autores introduzem o parâmetro α , através da seguinte equação:

$$\alpha = \left(\frac{1.5 + D/H}{2} \right) \quad (63)$$

em que

D - diâmetro do provete de betão;

H - altura do provete de betão.

A determinação da pressão lateral de confinamento apresentada na Equação (61), consiste na soma da contribuição das mantas de CFRP, e dos estribos de aço:

$$f_l = f_{fl} + f_{sl} \text{ (MPa)} \quad (64)$$

as respetivas contribuições das mantas de CFRP e estribos de aço, podem ser calculadas pelas equações apresentadas de seguida:

- Contribuição das mantas de CFRP:

$$f_{fl} = \frac{2t_j}{D} E_j \varepsilon_j \quad (65)$$

- Contribuição dos estribos de aço:

$$f_{sl} = \frac{2A_{sl}}{d_{st} s_s} f_{sy} \quad (66)$$

em que

d_{st} - diâmetro do núcleo de betão confinado com os estribos;

Relativamente à resistência à tração do aço, f_{sy} , esta depende da deformação lateral do provete de betão, bem como do módulo de elasticidade, E_s , e é determinada através das seguintes expressões:

$$f_{sy} = \begin{cases} E_s \frac{d_{st}}{D} \varepsilon_l & \text{para } \varepsilon_l < \frac{D}{d_{st}} \varepsilon_{su} \\ f_{sy} = f_y & \text{para } \varepsilon_l \geq \frac{D}{d_{st}} \varepsilon_{su} \end{cases} \quad (67)$$

em que ε_{su} corresponde à extensão axial do aço na rotura.

Autores como Saaman et al. (1998), Lam e Teng (2004) e Matthys (2000) confirmaram, através de resultados experimentais, que a deformação lateral do betão é inferior à deformação da manta de CFRP. Por esta razão, Matthys (2000) propôs um fator de redução de $\beta = 0,6$ de forma a obter uma deformação lateral coerente:

$$\varepsilon_l = \beta \times \varepsilon_j = 0.6\varepsilon_j \quad (68)$$

a extensão axial correspondente à tensão máxima do betão confinado, é obtida através de:

$$\varepsilon_{cc} = k_2 \varepsilon_{co} \left(\frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0.7} \quad (69)$$

e a extensão do betão à compressão não confinado correspondente à tensão máxima é adotada do Eurocódigo 2:

$$\varepsilon_{co} = \frac{0.7}{1000} (f'_{co})^{0.31} \quad (70)$$

Chastre e Silva (2010) desenvolveram ainda a Equação (69) por regressão dos dados experimentais, em pilares de betão com um diâmetro entre 150 e 400 mm confinados com mantas de CFRP, tendo obtido o coeficiente $k_2 = 17.65$.

Curva tensão-extensão do betão confinado com CFRP

O modelo proposto pelos autores referidos anteriormente para os provetes de betão de secção circular confinados com CFRP submetidos à compressão axial é baseado na relação tensão-extensão apresentada na Figura 27.

A relação tensão-extensão para o betão confinado com CFRP é baseada numa expressão com quatro parâmetros (E_{ci}, E_{cA}, f_0, n), inicialmente proposta por Richart e Abbott (1975):

$$f_c(\varepsilon_c) = \frac{(E_{ci} - E_{cA})\varepsilon_l}{\left[1 + \left(\frac{(E_{ci} - E_{cA})\varepsilon_l}{f_0} \right)^n \right]^{\frac{1}{n}}} + E_{cA}\varepsilon_l \leq f_{cc} \quad (71)$$

Ainda de acordo com a calibração dos resultados experimentais obtidos pelos autores, os parâmetros de entrada expressos na Equação (71) são:

$$E_{ci} = 3950 \sqrt{f'_{co}} \quad (72)$$

$$E_{cA} = 0.8 E_{cc} \sqrt{\frac{f_l}{f'_{co}}} \quad (73)$$

$$f_0 = f'_{co} + 1.28 f_l \quad (74)$$

E_{cc} pode ser estimado através da seguinte equação:

$$E_{cc} = \frac{f_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad (75)$$

O modelo apresenta ainda a curva tensão axial-extensão lateral, dada pela Equação (76):

$$f_c = \frac{(E_{1l} - E_{2l})\varepsilon_l}{\left[1 + \left(\frac{(E_{1l} - E_{2l})\varepsilon_l}{f_{0l}}\right)^{n_l}\right]^{\frac{1}{n_l}}} + E_{2l}\varepsilon_l \geq f_{cc} \quad (76)$$

com:

$$E_{1l} = \frac{E_{ci}}{\nu} \quad (77)$$

$$E_{2l} = 510(f_l)^{1.16}(f_{co})^{-0.16} \quad (78)$$

$$f_{0l} = 1.25f_{co} + 0.5f_l \quad (79)$$

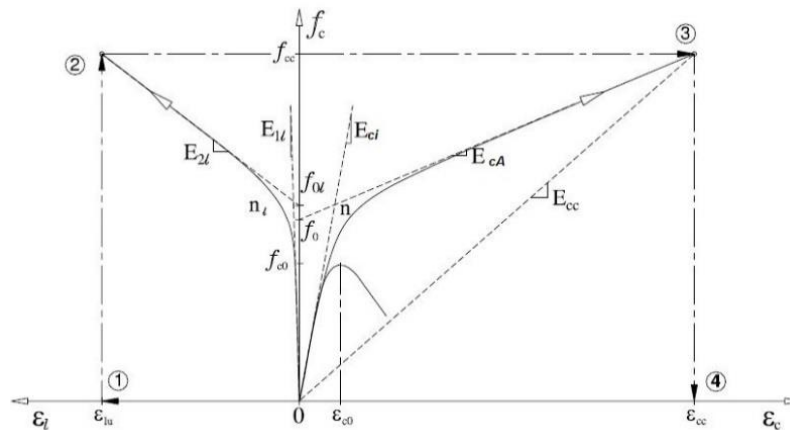


Figura 27 - Modelo proposto para provetes de secção circular sujeitos à compressão monotónica por Chastre e Silva (Adaptado de Chastre & Silva, 2010)

O modelo proposto por Chastre e Silva (2010) apresenta, como principais vantagens, a consideração do confinamento conferido pelas armaduras de aço, do confinamento exercido pelas mantas de CFRP e apresenta a relação tensão-extensão lateral. São ainda tidos em conta alguns parâmetros que influenciam o comportamento dos provetes de betão confinados com mantas de fibras de carbono, tais como a forma e a espessura da manta. Os ensaios foram realizados em vários provetes de betão armado.

No entanto, comparativamente ao modelo de Ferreira (2007), analisado anteriormente, o modelo proposto por estes autores tem a desvantagem de apenas considerar o confinamento total dos provetes. Os ensaios realizados pelos autores resumiram-se a provetes com secção circular.

4.2.7. Modelo de Wei e Wu (2011)

O modelo proposto por Wei e Wu (2011) tem por base uma análise aos modelos existentes na bibliografia em pilares com secção circular ou retangular/quadrada. Na sua revisão bibliográfica, os autores analisaram os poucos modelos que abrangiam de uma forma generalizada pilares com secção circular e retangular/quadrada, tais como os modelos de Lam e Teng (2003), de Harajili et al. (2006), de Wu, Wu e Lu (2007) e de Youssef, Feng e Mosallam (2007). Assim, Wei e Wu (2011) pretenderam com o seu trabalho melhorar os modelos propostos anteriormente.

Após uma análise aprofundada às várias combinações dos dois troços da curva tensão-extensão apresentadas por vários autores, Wei e Wu (2011) optaram por adotar um modelo matemático que compreende uma parábola no troço inicial e uma linha reta, pelas duas seguintes razões:

1. o modelo é simples, contudo suficientemente exato para a curva tensão-extensão do segundo troço ascendente;
2. nos ensaios dos próprios autores foi observado que a variação do formato das curvas com um segundo troço ascendente é frequentemente incoerente. O uso de uma forma não-linear no segundo troço pode não aumentar a precisão dos modelos e resulta num aumento significativo da sua complexidade.

Na perspetiva dos autores, o uso de uma equação linear para a caracterização do segundo troço ascendente da curva tensão-extensão é considerada uma forma simples e eficaz de prever o desempenho de pilares de betão confinados com CFRP. O modelo matemático proposto é então definido pelas Equações (80) a (82), e encontra-se representado graficamente na Figura 28. O modelo apresenta as seguintes particularidades:

- a inclinação da parábola em ε_c é igual ao módulo de elasticidade do betão não confinado, E_{ci} ;
- o declive no ponto de transição (Ponto A) é o mesmo nos dois troços.

$$f_c = \begin{cases} E_{ci}\varepsilon_c + \frac{f_{cA} - E_{ci}\varepsilon_{cA}}{\varepsilon_{cA}^2} \varepsilon_c^2 & \text{para } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cA} \\ f_{cA} + E_{cA}(\varepsilon_c - \varepsilon_{cA}) & \text{para } \varepsilon_{cA} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cc} \end{cases} \quad (80)$$

A extensão de transição no ponto A é calculada através da seguinte equação:

$$\varepsilon_{cA} = \frac{(f_{cA} + f_{cc} + E_{ci}\varepsilon_{cc}) - \sqrt{(f_{cA} + f_{cc} + E_{ci}\varepsilon_{cc})^2 - 8f_{cA}E_{ci}\varepsilon_{cc}}}{2E_{ci}} \quad (81)$$

e o declive do segundo troço ascende da curva tensão-extensão, E_{cA} , é obtido através da seguinte expressão:

$$E_{cA} = \frac{f_{cc} - f_{cA}}{\varepsilon_{cc} - \varepsilon_{cA}} \quad (82)$$

A tensão e a extensão última, bem como a tensão de transição, são determinadas com recurso a uma análise de regressão de resultados experimentais obtidos pelos autores, abordada de seguida.

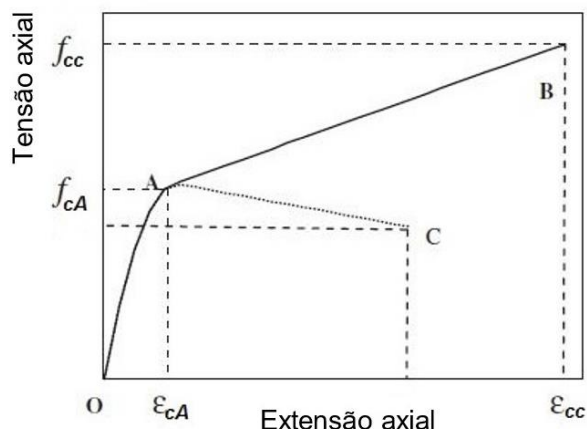


Figura 28 - Curva típica tensão-extensão (Adaptado de Wei e Wu, 2011)

Unificação de Tipologias de Secções de Pilares

O presente modelo tem a particularidade de abordar uma unificação das diferentes tipologias das secções transversais dos pilares, sendo uma maneira rápida e eficiente de com um único modelo avaliar o comportamento de elemento com diferentes tipologias. A unificação apresentada na Figura 29 foi possível através da introdução de dois parâmetros: a relação da secção transversal, B/D e a relação do raio de canto, $2R/D$.

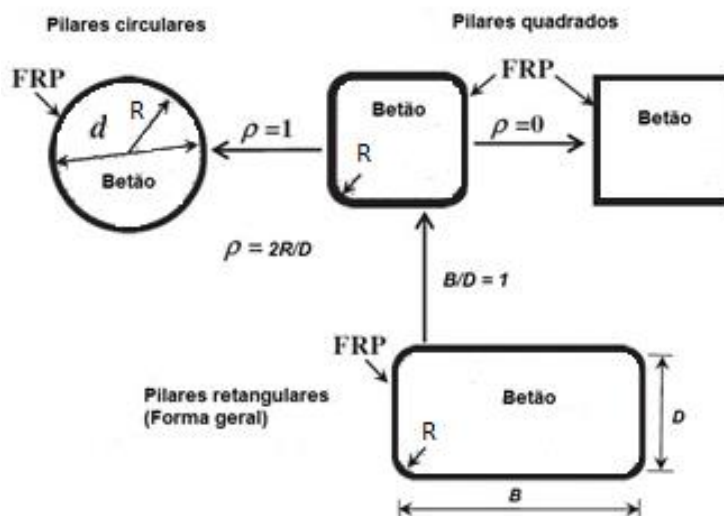


Figura 29 - Unificação do modelo para várias secções de pilares de betão (Adaptado de Wei & Wu, 2011)

Esta unificação faculta uma expressão matemática para todos os tipos de coluna (circular, quadrado e retangular), evita a descontinuidade dos resultados quando há alteração do tipo de pilar ou tipo de curva e leva a que haja uma melhoria na precisão do modelo, dada a variedade de parâmetros calibrados pelos autores.

Definição do Ponto de Ruptura do Betão Confinado

Os autores referidos anteriormente defendem que a definição do ponto de ruptura do betão confinado não é clara, dado que o ponto de ruptura do CFRP pode não ocorrer num único ponto sobre a curva de resposta. Em vez disso, pode ser um processo, tal como é possível observar na Figura 30, onde se constata que a ruptura do CFRP inicia-se no ponto A da curva, e a ruptura definitiva ocorre apenas no ponto B. No seguimento do estudo destes dois autores, o ponto de ruptura do betão confinado foi estabelecido no ponto A, uma vez que o processo de ruptura até ao ponto B apresenta um comportamento irregular.

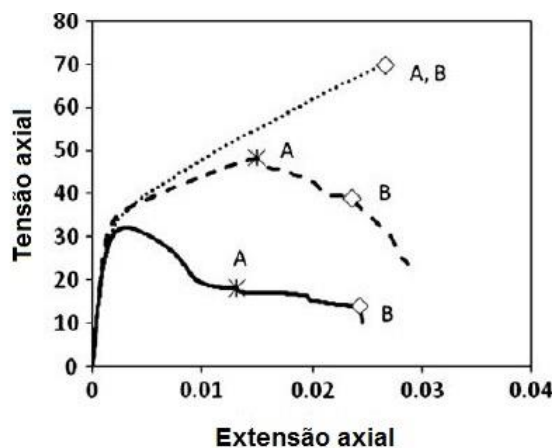


Figura 30 - Definição do ponto de ruptura do betão confinado, para diferentes níveis de confinamento (Adaptado de Wei & Wu, 2011)

Tensão Axial Máxima do Betão Confinado

A tensão máxima do betão confinado com CFRP é a resistência à compressão do betão confinado, f_{cu} , quando a curva tensão-extensão é monotonicamente ascendente.

Com base nos resultados obtidos nas suas investigações, os autores desenvolveram um modelo de tensão unificado, que contém um fator de forma, como função da relação do raio de canto, $\rho = 2R/D$, dado pela seguinte expressão:

$$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = 1 + \alpha \rho^\beta \left(\frac{f_l}{f_{co}} \right)^\gamma \quad (83)$$

em que os coeficientes α , β e γ foram obtidos por regressão linear de dados experimentais. Os valores recomendados por Wu e Wang (2009) para estes coeficientes são 2.2, 0.72 e 0.94, respetivamente.

Quando $\rho = 0$, a Equação (83) aplica-se a pilares quadrados com arestas vivas e, quando $\rho = 1$, aplica-se a pilares de secção circular.

Ainda com base nos resultados dos testes experimentais, os autores decidiram expandir o modelo a pilares de secção retangular, através da inclusão da razão da secção transversal B/D na Equação (83):

$$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = 1 + 2.2 \left(\frac{2R}{D} \right)^{0.72} \left(\frac{f_l}{f_{co}} \right)^{0.94} \left(\frac{B}{D} \right)^{-1.9} \quad (84)$$

É ainda de referir que a Equação (84) refere-se ao pico da tensão, f_{cu} , sendo este distinto da tensão máxima do betão confinado apresentado na curva tensão-extensão, f_{cc} , com um ramo descendente após o seu pico. Consequentemente, é necessário um novo modelo para o cálculo de f_{cc} . A tensão máxima do betão confinado é a expressa pela Equação (85):

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = \alpha + \beta \left(\frac{2R}{D}\right)^\eta \left(\frac{f_l}{f_{co}}\right)^\tau \left(\frac{B}{D}\right)^\gamma \quad (85)$$

em que o cálculo da pressão lateral de confinamento poderá ser efetuado através da seguinte expressão:

$$f_l = \frac{2E_j \varepsilon_j t_j}{D} \quad (86)$$

Os coeficientes η e τ são determinados com base na regressão linear dos dados experimentais, ficando a Equação (85) com a seguinte forma:

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 0.5 + 2.7 \left(\frac{2R}{B}\right)^{0.4} \left(\frac{f_l}{f_{co}}\right)^{0.73} \left(\frac{B}{D}\right)^{-1} \quad (87)$$

Extensão Axial de Compressão

Vários modelos têm sido propostos para prever a extensão axial do betão confinado com CFRP, no entanto, a maioria destes modelos (Fardis & Khalili, 1981; Lam & Teng, 2003; Samaan et al., 1998) não consideram a curva tensão-extensão com um ramo descendente. De acordo com a pesquisa de Ilki, Peker, Karamuk, Demir e Kumbasar (2008), nenhum dos modelos disponíveis consegue fornecer, com um grau de precisão razoável, o valor da extensão axial na rotura.

À semelhança da tensão axial máxima do betão, os três fatores considerados na Equação (87), juntamente com a rigidez da manta de CFRP, afetam a extensão axial última.

Pelas pesquisas bibliográficas realizadas pelos autores, para uma dada tensão axial, o confinamento lateral exercido pela manta de CFRP difere conforme a sua rigidez, acabando por afetar, em alguns casos, a deformação axial. No entanto, análises meticolosas efetuadas pelos autores dos dados experimentais mostram que a rigidez do material de confinamento ($E_j t_j$) não tem um efeito muito significativo na deformação axial e, por esta razão, não foi considerado como um fator determinante.

Tendo por base as considerações referidas acerca destes fatores, os autores identificam então quatro variáveis que podem afetar a extensão axial, sendo representadas pela seguinte equação:

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = \lambda + \alpha \left(\frac{f_l}{f_{co}}; \frac{2R}{D}; \frac{B}{D}; \frac{f_{30}}{f_{co}}\right) \quad (88)$$

em que f_{30} representa a resistência à compressão de um provete de betão não confinado de 30 MPa e λ é uma constante que relaciona extensão axial de pico no betão não confinado. O valor de $\lambda = 1,75$ é o recomendado pelo Eurocódigo 2.

Wei e Wu (2011) referem ainda que para o segundo termo da Equação (88), a tendência causada pela variação dos dois fatores individuais, f_l/f_{co} e f_{30}/f_{co} , é relativamente clara: a tensão última aumenta quando o nível de confinamento aumenta e diminui quando a resistência do betão aumenta. Estas duas tendências foram visíveis com a variação dos resultados obtidos pelos autores. Quando $f_l = 0$ ou $f_{co} = \infty$, a eficácia do confinamento é zero. Consequentemente, os efeitos dos dois termos descritos na Equação (94) podem ser adequadamente descritos pelas duas funções, $(f_l/f_{co})^\beta$ e $(f_{30}/f_{co})^\gamma$, separadamente.

Para além disso, os efeitos destes fatores trabalham em conjunto por forma a fornecer uma combinação do efeito global, aumentando (ou diminuindo) quando os efeitos individuais sofrem acréscimos (ou decréscimos) e tomam o valor zero quando qualquer um dos efeitos é nulo. Estes fatores são assim multiplicáveis, e resulta:

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1.75 + \alpha \left(\frac{f_l}{f_{co}}\right)^\beta \left(\frac{f_{30}}{f_{co}}\right)^\gamma f\left(\frac{2R}{D}\right) f\left(\frac{B}{D}\right) \quad (89)$$

o valor de ε_{co} é determinado aplicando a equação proposta por Popovics (1973):

$$\varepsilon_{co} = 0.000937 \sqrt[4]{f_{co}} \quad (90)$$

Para pilares com secção circular, $f(2R/D) = 1$ e $f(B/D) = 1$. Com base na análise da regressão que inclui os resultados dos pilares de secção circular ensaiados por Wei e Wu (2011), estes autores apresentaram os coeficientes α, β e γ com valores de 12, 0.75 e 0.62, respetivamente.

Para pilares com secção quadrada, substituindo $f(B/D) = 1$ na Equação (89):

$$f\left(\frac{2R}{D}\right) = \frac{\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} - 1.75}{12 \left(\frac{f_l}{f_{co}}\right)^{0.75} \left(\frac{f_{30}}{f_{co}}\right)^{0.62}} \quad (91)$$

Os fatores $f(2R/D)$ e $f(B/D)$ são expressos como:

$$f\left(\frac{2R}{D}\right) = 0.36 \left(\frac{2R}{D}\right) + 0.64 \quad (92)$$

$$f\left(\frac{B}{D}\right) = \left(\frac{B}{D}\right)^{-0.3} \quad (93)$$

em que a equação (93) satisfaz as duas condições de fronteira seguintes:

- $f\left(\frac{B}{D}\right) = 1$, quando $B/D = 1$ para pilares com secção quadrada;
- $e f\left(\frac{B}{D}\right) = 0$, quando B/D tende para infinito.

A extensão axial última proposta pelos autores para pilares com secção circular, quadrada e retangular é, assim, expressa na Equação (94):

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1.75 + 12 \left(\frac{f_l}{f_{co}}\right)^{0.75} \left(\frac{f_{30}}{f_{co}}\right)^{0.62} \left(0.36 \frac{2R}{D} + 0.64\right) \left(\frac{B}{D}\right)^{-0.3} \quad (94)$$

Ponto de Transição

Para um melhor ajuste da Equação (80) à curva tensão-extensão obtida experimentalmente, a tensão axial no ponto de transição pode ser determinada tendo em conta a análise de todos os testes realizados em pilares com secções circulares, quadradas e retangulares, através da Equação (95), apresentada de seguida:

$$f_{cA} = f_{co} + 0.43 \left(\frac{2R}{D} \right)^{0.68} \left(\frac{B}{D} \right)^{-1} f_l \quad (95)$$

Na revisão bibliográfica sobre o modelo apresentado pelos autores Wei e Wu (2011), a grande vantagem incide sobre o facto de estes considerarem para além de secções transversais circulares, possibilitarem, de uma forma simples a sua aplicabilidade a secções quadradas e retangulares. No entanto, uma das principais desvantagens deste modelo prende-se com o facto de não ter sido tida em conta a existência de armaduras em aço no incremento da capacidade de carga fornecido pelo confinamento.

4.3. Vantagens e desvantagens dos modelos

Resumidamente, referem-se na Tabela 6 apresentada de seguida, as principais vantagens e desvantagens dos modelos analíticos apresentados para o confinamento com FRP, que estiveram na base da escolha dos modelos considerados nas análises apresentadas no capítulo que se segue:

Tabela 6 - Vantagens e desvantagens dos modelos de confinamento com FRP

Modelo	Vantagens	Desvantagens
Toutanji (1999)	Inclui a relação tensão/extensão axial e tensão axial - extensão lateral;	Calibração com apenas um tipo de secção (circular) Única calibração em provetes totalmente confinados Não considera a contribuição das armaduras transversais de aço Consideração de tensão lateral de confinamento constante ao longo do carregamento; Considera que a extensão lateral é igual à extensão no FRP;
Spoelstra e Monti (1999)	Inclui a relação tensão/extensão axial e tensão axial – extensão lateral; Permite ter em conta o aumento contínuo da tensão lateral de confinamento; Introdução de um fator de redução, em função das características mecânicas do betão;	Calibração com apenas um tipo de secção (circular); Única calibração em provetes totalmente confinados; Considera que a extensão lateral é igual à extensão no FRP; Não considera a contribuição das armaduras transversais de aço.

Modelo	Vantagens	Desvantagens
Manfredi e Realfonzo (2001)	<p>Vantagens do modelo Spoelstra e Monti (1999);</p> <p>Introdução do coeficiente de eficácia e de redução no modelo de Spoelstra e Monti (1999) para consideração de secções quadradas;</p> <p>Influência das armaduras longitudinais de aço.</p>	<p>Considera que a extensão lateral é igual à extensão no FRP;</p> <p>Única calibração em provetes totalmente confinados;</p> <p>Não considera a contribuição das armaduras transversais de aço.</p>
Ferreira (2007)	<p>Ensaio em provetes de betão armado;</p> <p>Confinamento parcial;</p> <p>Influência de armaduras de aço (longitudinal e transversal).</p>	<p>Calibração com apenas um tipo de secção (circular);</p> <p>Considera que a extensão lateral é igual à extensão no FRP;</p> <p>Intervalo de valores do betão à compressão entre 16 e 32 MPa.</p>
Chastre e Silva (2010)	<p>Ensaio em provetes de betão armado;</p> <p>Inclui a relação tensão/extensão axial e tensão axial – extensão lateral;</p> <p>Introdução de um coeficiente de redução, para consideração de que a extensão lateral é inferior à extensão de FRP;</p> <p>Influência de armaduras de aço (longitudinal e transversal).</p>	<p>Calibração com apenas um tipo de secção (circular);</p> <p>Única calibração em provetes totalmente confinados.</p>
Wei e Wu (2011)	<p>Unificação de tipologias de secções;</p> <p>Simplificação do segundo troço da curva do diagrama.</p>	<p>Apenas totalmente confinado;</p> <p>Não considera a contribuição das armaduras de aço;</p> <p>Apenas inclui a relação tensão - extensão axial;</p> <p>Consideração de tensão lateral confinamento constante ao longo do carregamento.</p>

As análises apresentadas no capítulo seguinte foram realizadas para os três modelos analíticos que se destacaram em relação aos apresentados na presente dissertação, não só pelas vantagens que apresentam, como também pela sua aplicabilidade (por exemplo: tipo de secção transversal e tipo de confinamento), sendo os mesmos: o modelo de Manfredi e Realfonzo (2001), modelo de Ferreira (2007) e o modelo proposto por Wei e Wu (2011).

Para além disso, a escolha deveu-se ainda ao facto de os modelos escolhidos apresentarem características mais abrangentes no que toca à análise pretendida. Fatores preponderantes, tais como, um modelo que procure quantificar o nível de confinamento num dado elemento de betão quando se utilizam compósitos de FRP, que para além da aplicação em secções circulares, permita uma aplicação direta em pilares com secções transversais quadradas e retangulares, como é o caso dos modelos de Manfredi e Realfonzo (2001) e Wei e Wu (2011), a simplificação associada

à precisão de resultados do segundo troço dos diagramas, consideração do aumento contínuo da tensão lateral de confinamento e ainda uma análise com base num confinamento parcial.

4.4. Recomendações - ACI e fib

Após a consulta das recomendações “Guide for the Design and Construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures” – ACI 440.2R-02, do American Concrete Institute Committee (2002), bem como “Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures” (*Fédération Internationale du Béton (fib)*, 2001), verificou-se a existência de alguns parâmetros a considerar no dimensionamento do reforço por confinamento.

A abordagem realizada pelo ACI Committee 440 é baseada na formulação originalmente desenvolvida por Mander et al. (1988) para o betão confinado com armaduras de aço. O documento da *fib* tem em consideração a modelação realizada por Spoelstra e Monti (1999).

De acordo com o constante no ACI, os sistemas de FRP podem ser usados no confinamento de pilares submetidos à compressão monotónica ou cíclica, no sentido de aumentar a sua resistência à compressão axial e a sua ductilidade. Segundo o preconizado neste documento, a resistência axial de um elemento confinado com mantas de FRP é dada por:

$$\phi P_n = 0.8\phi [0.85\psi_f f_{cc} (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (96)$$

Em que, ψ_f é um fator de redução adicional, cujo valor recomendado na norma é 0.95 e relativamente ao valor do coeficiente de segurança ϕ , o valor recomendado na norma é de 0.75.

O documento da *fib* refere a aplicação de fatores parciais de segurança nos materiais: betão, $\gamma_c = 1.50$, aço, $\gamma_s = 1.15$ e por fim no FRP, γ_f , que varia conforme o tipo de FRP, sistema de aplicação, condição de aplicação e controlo de qualidade.

No que concerne às limitações geométricas impostas, o ACI não impõe qualquer limitação em secções circulares, contrariamente ao verificado em elementos quadrados e retangulares que limita:

- B, D ≤ 900 mm;
- B/D ≤ 1.5;
- Raio de canto mínimo (R): 13 mm.

O documento da *fib* recomenda que o raio de canto das secções quadradas e/ou retangulares encontre-se entre 15 e 25 mm, ou o sugerido pelo fabricante.

O ACI impõe ainda que em elementos sujeitos a esforços de compressão e corte a extensão efetiva na rotura do FRP seja limitada a $4\% \leq 0.75 \varepsilon_{su}$. O mesmo documento apresenta ainda equações que visam o cálculo da tensão de compressão do betão não confinado para dimensionamento (Equação (97)) e extensão máxima do betão confinado (Equação (98)):

$$f'_{cc} = f_{co} \left[\sqrt{1 + 7.9 \frac{f_l}{f_{co}}} - 2 \frac{f_l}{f_{co}} - 1.25 \right] \quad (97)$$

$$\varepsilon_{cc} = \frac{1.71(5f'_{cc} - 4f_{co})}{E_{ci}} \quad (98)$$

A *fib* sugere a introdução de um coeficiente de eficácia de reforço, apresentado anteriormente na Equação (9), e fornece igualmente as equações para o cálculo da tensão axial de compressão do betão confinado para dimensionamento e a respetiva extensão axial, através das seguintes equações.

$$f'_{cc} = f_{co} \left(0.2 + 3 \sqrt{\frac{f_l}{f_{co}}} \right) \quad (99)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left(2 + 1.25 \frac{E_{ci}}{f_{co}} \right) \varepsilon_{fu} \sqrt{\frac{f_l}{f_{co}}} \quad (100)$$

De referir ainda que a extensão axial do betão não confinado prevista pelo ACI é 3‰ e que no documento da *fib* é assumido o valor de 3.5‰.

5. Apresentação, Correlação e Análise de Resultados

É objetivo da presente dissertação a análise dos três modelos de confinamento em pilares de betão armado com mantas de CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*), descritos no capítulo anterior. De acordo com o explanado anteriormente, os modelos analíticos selecionados, pelas razões descritas, foram propostos pelos autores Manfredi e Realfonzo (2001), Ferreira (2007) e Wei e Wu (2011). Obtiveram-se curvas tensão-extensão para diversas análises paramétricas, utilizando os modelos avaliados, e compararam-se os resultados de cada um desses modelos.

Foi realizada uma correlação com os resultados dos ensaios experimentais das investigações de Paula (2003) e de Rocca (2007), visando verificar a fiabilidade dos modelos analíticos de confinamento para pilares com secção circular, quadrada e retangular. Posteriormente, apresenta-se uma análise que incidiu sobre a avaliação dos seguintes fatores: influência do boleamento (em secções quadradas e retangulares); influência do número de camadas de CFRP (em secções circulares, quadradas e retangulares); influência da geometria da secção transversal e influência do confinamento parcial na eficácia do confinamento com CFRP (em secções circulares).

5.1. Implementação dos Modelos Analíticos

Para a análise e obtenção dos resultados, foram previamente programados os três modelos analíticos no *software* interativo de cálculo numérico, *Mathworks - Matlab R2015a*.

Foi criada uma página principal para a introdução dos dados e parâmetros iniciais, seguindo-se a criação de uma função para cada um dos três modelos apresentados. Para cada modelo, foram tidas em conta as calibrações realizadas por cada autor, bem como as suas equações propostas. Em suma, a programação final permite a escolha do modelo a aplicar, conforme a secção transversal do pilar em análise, assim como permite a introdução manual da geometria dos pilares, características do tipo de confinamento e, por fim, representa graficamente os respetivos diagramas tensão-extensão obtidos.

5.2. Correlação dos modelos analíticos com resultados experimentais

A presente análise incluiu a verificação da fiabilidade de dois modelos analíticos de confinamento diferentes para pilares de secção circular, quadrada e retangular, comparando-os com os resultados experimentais de pilares de betão armado confinados com CFRP de Paula (2003) e Rocca (2007). Assim, no sentido de verificar qual o modelo analítico com melhor correlação com os resultados experimentais, foi analisado o desenvolvimento das curvas, os valores máximos ou de rotura e as relações tensão-extensão axial e tensão-extensão lateral.

As secções transversais dos pilares analisados encontram-se ilustradas na Figura 31 e as respetivas características encontram-se descritas na Tabela 7.

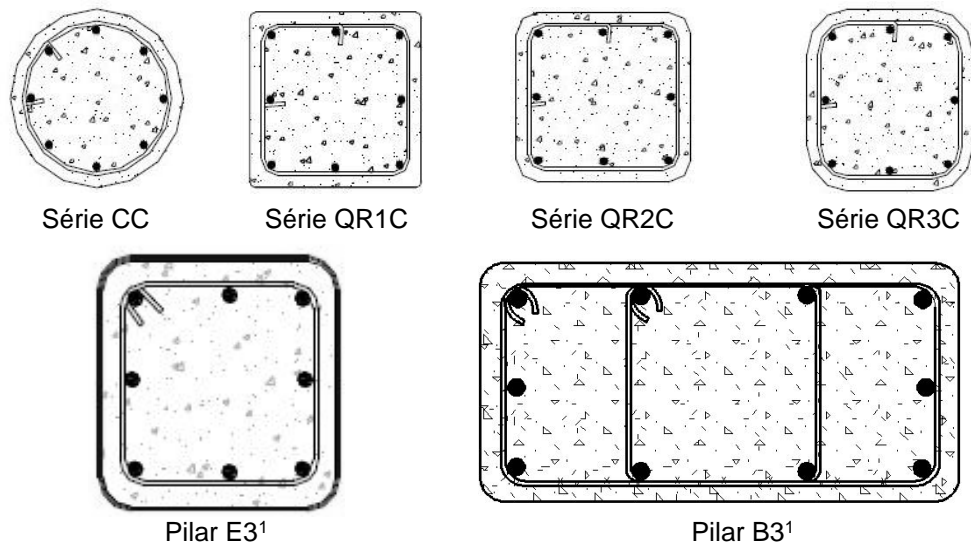


Figura 31 – Secções transversais dos pilares analisados (Faustino & Chastre, 2015; Paula, 2003)

Tabela 7 - Características dos pilares analisados

Pilar	Dimensões (mm)				R/B	Betão		Armadura				Confinamento com CFRP			
	B	R	D	H		f_{co} (MPa)	Longitudinal		Transversal		E_j (MPa)	ϵ_j	Nº cam.	t_j (mm)	
							f_{sy} (MPa)	Φ	f_{sy} (MPa)	Φ					
Série CC	-	-	150	750	-	34.6	587	8Φ6	217	Φ3//0.10	217	1.55	2	0.176	
Série QR1C	150	0	-	750	0.0	34.6	587	8Φ6	217	Φ3//0.10	217	1.55	2	0.176	
Série QR2C	151	20	-	750	0.132	34.6	587	8Φ6	217	Φ3//0.10	217	1.76	2	0.176	
Série QR3C	154	38	-	750	0.247	34.6	587	8Φ6	217	Φ3//0.10	217	1.76	2	0.176	
E3¹	324	30.5	-	686	0.094	30.5	447	$\rho_L=1.53\%$	291	$\rho_V=0.45\%$	291	0.93	3	0.167	
B3¹	635	30.5	318	1370	0.048	30.5	447	$\rho_L=1.56\%$	291	$\rho_V=0.38\%$	291	0.93	2	0.167	

Refira-se que as séries CC, QR1C, QR2C e QR3C correspondem a ensaios experimentais realizados por Paula (2003), sendo os pilares E3 e B3 correspondentes a ensaios experimentais realizados no âmbito das investigações realizadas por Rocca (2007).

5.2.1. Comparação entre os modelos analíticos e os resultados experimentais de Paula (2003)

Na Figura 32 são apresentados os diagramas tensão-extensão obtidos com os modelos analíticos de Manfredi e Realfonzo (2001) e Wei e Wu (2011), previamente programados, e

¹ A representação das armaduras é meramente ilustrativa, dado que Rocca (2007) não apresenta esta pormenorização na sua tese de doutoramento.

comparam-se esses valores com os resultados experimentais dos estudos realizados por Paula (2003) para pilares com a secção transversal circular, denominados pela série CC. Excluiu-se nesta análise a comparação com o modelo de Ferreira (2007), uma vez que este modelo apenas compreende a sua aplicação em pilares cuja tensão de compressão do betão não confinado esteja entre 16 e 32 MPa.

Salienta-se que os dois modelos analíticos consideram que a rotura dos modelos de betão ocorre para uma extensão lateral igual à extensão de rotura à tração do CFRP, obtida em ensaios de provetes planos.

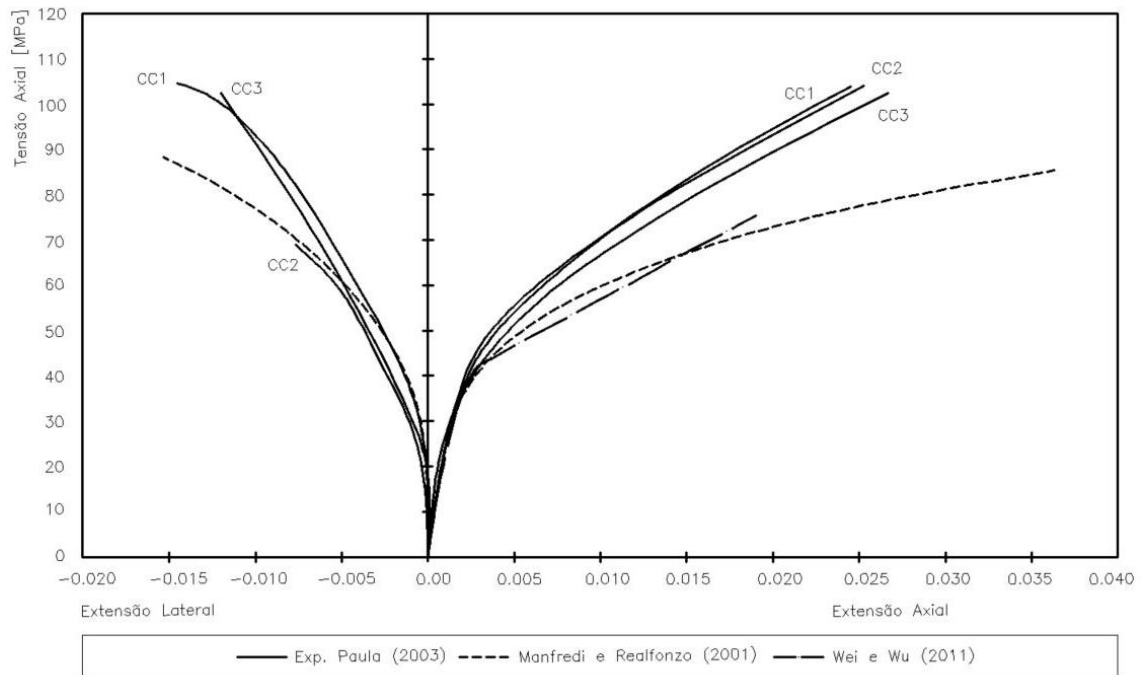


Figura 32 - Ensaios de Paula (2003) versus modelos analíticos em secções circulares: série CC

Comparando os modelos analíticos com os resultados experimentais de Paula (2003), no que concerne aos pilares com secção circular, conclui-se que:

- os modelos representam relativamente bem o primeiro troço ascendente dos diagramas tensão-extensão. Este desempenho resulta do facto de as curvas dependerem unicamente das características do betão não confinado, verificando-se então as principais diferenças no segundo troço, quando o confinamento é ativado;
- o modelo de Manfredi e Realfonzo (2001) apresenta um valor da extensão axial superior aos resultados obtidos nos resultados experimentais, apesar de subestimar o valor da tensão de rotura correspondente;
- o modelo de Wei e Wu (2011) subestima tanto os valores da tensão de rotura como a respetiva extensão axial. Esta disparidade poderá estar relacionada com o facto de os autores deste modelo terem adotado uma simplificação do segundo troço ascendente do diagrama tensão-extensão e, ainda, pelo facto de terem definido um ponto de rotura inicial, conforme ilustrado na Figura 30.

- relativamente à relação tensão axial-extensão lateral (lado esquerdo do diagrama), apenas o modelo de Manfredi e Realfonzo (2001) permite esta análise. Assim, verifica-se que o modelo representa uma curva com um andamento mais baixo comparativamente aos resultados experimentais e, com exceção do pilar CC1, representa uma extensão lateral muito superior (para os pilares CC2 e CC3), que é explicável face ao pressuposto adotado pelos autores, em que a extensão lateral na rotura corresponde à extensão de rotura do CFRP à tração.

Nas Figuras 33-35 apresentam-se os diagramas tensão-extensão dos resultados dos modelos de Manfredi e Realfonzo (2001) e Wei e Wu (2011) para os pilares com a secção quadrada reforçados com mantas de fibras de carbono. Inicia-se com a representação gráfica dos resultados obtidos para o pilar com secção quadrada, com arestas vivas.

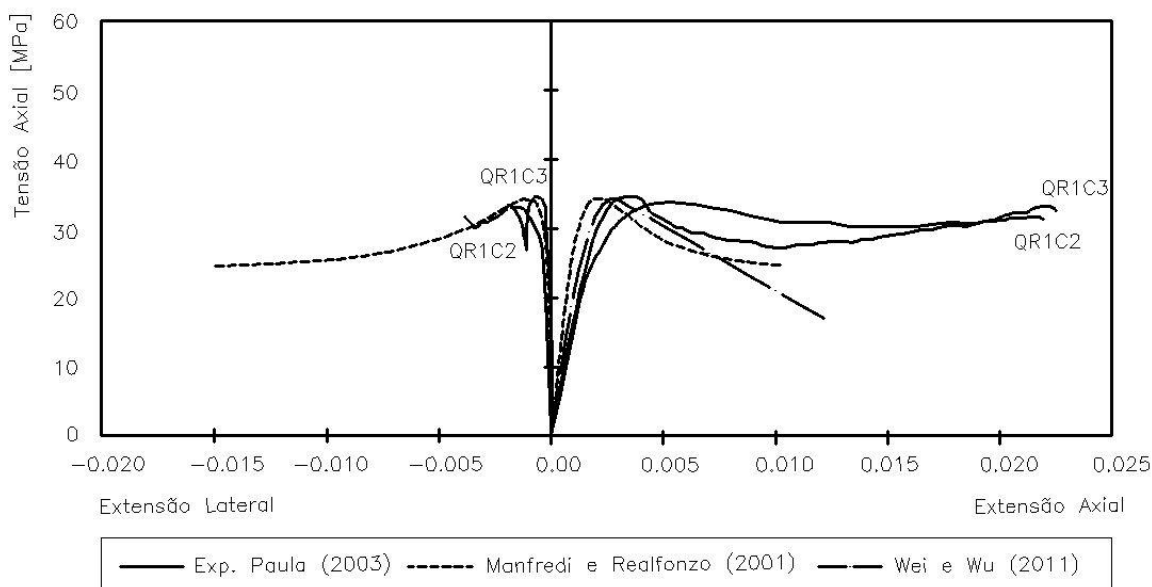


Figura 33 - Ensaio de Paula (2003) versus modelos analíticos em secções quadradas com R = 0 cm

Comparando os modelos analíticos com os resultados experimentais, em pilares de secção quadrada com as arestas vivas, 15x15 cm² e 2 camadas de CFRP, conclui-se que:

- os modelos de Manfredi e Realfonzo (2001) e Wei e Wu (2011) apresentam uma estimativa razoável do andamento dos diagramas experimentais;
- em ambos os modelos verifica-se que a tensão de rotura não coincidiu com a tensão correspondente à extensão máxima atingida, tendo ocorrido amolecimento;
- a respetiva extensão axial foi igualmente muito inferior, comparativamente aos resultados experimentais obtidos, nos dois modelos;
- o modelo de Manfredi e Realfonzo (2001) apresenta uma extensão lateral muito superior comparativamente aos resultados experimentais, sendo que esta disparidade encontra-se relacionada com o facto de os autores assumirem que a

extensão lateral na rotura corresponde à extensão de rotura do CFRP à tração. No entanto, a curva obtida no modelo apresenta uma boa representação até à altura em que ocorre a rotura nos resultados experimentais.

Na sequência deste estudo, foram ainda realizados ensaios experimentais em pilares cujas arestas foram arredondadas com raios de 2.0 e 3.8 cm. Assim, nas Figura 34 e Figura 35 apresentam-se os diagramas obtidos da aplicação dos modelos analíticos, bem como dos resultantes dos ensaios experimentais.

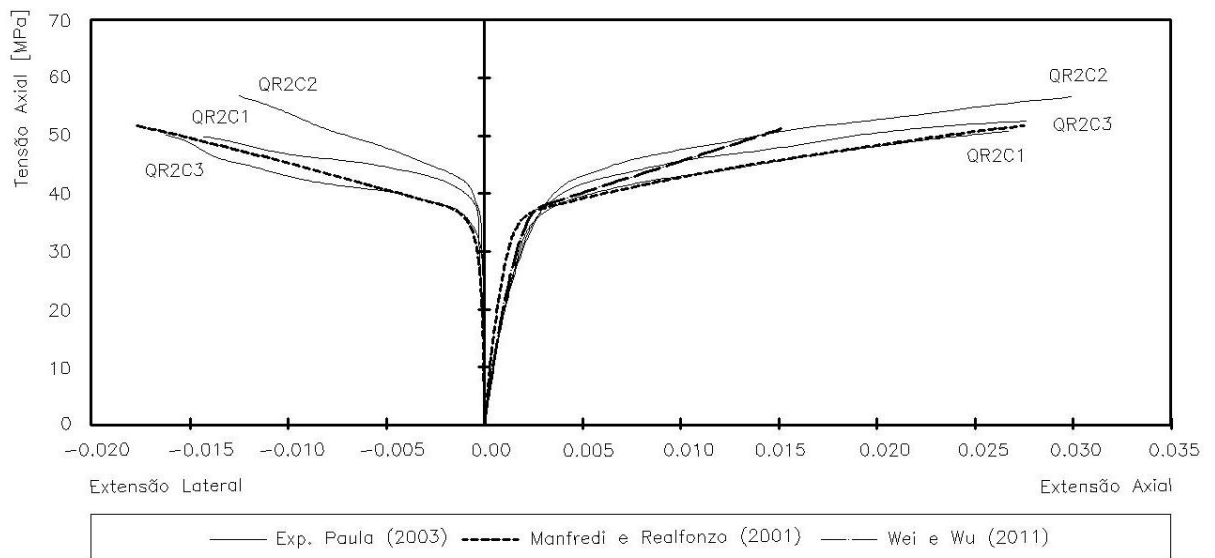


Figura 34 - Ensaios de Paula (2003) versus modelos analíticos em secções quadradas com R = 2.0cm

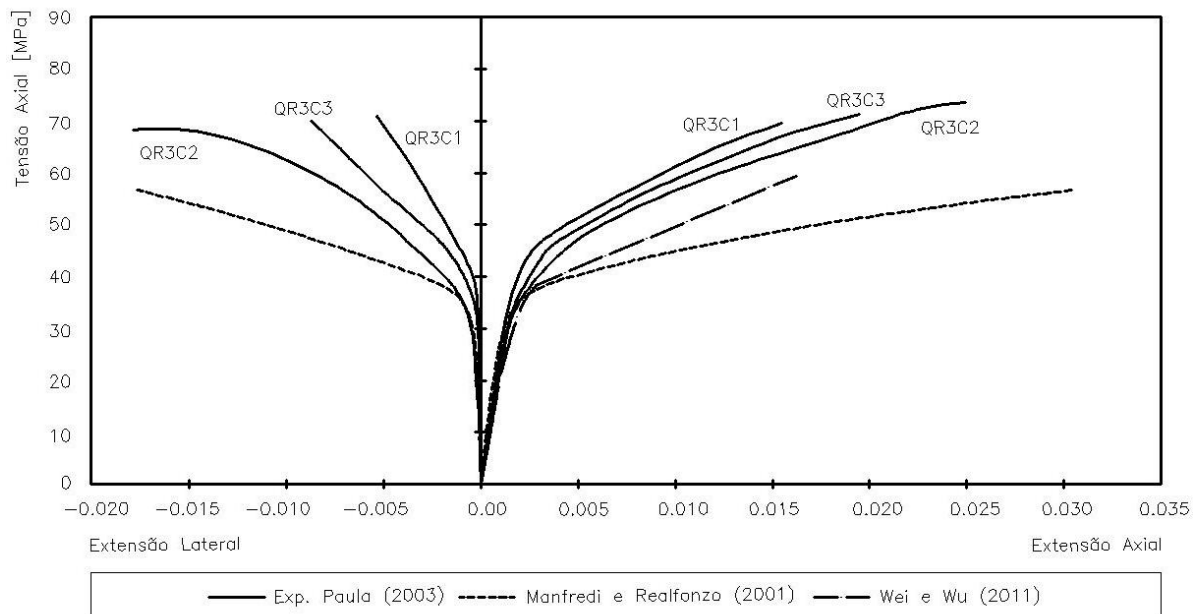


Figura 35 - Ensaios de Paula (2003) versus modelos analíticos em secções quadradas com R = 3.8cm

Comparando os modelos analíticos com os resultados experimentais para o pilar de secção quadrada com os cantos arredondados em 2.0 e 3.8 cm, conclui-se que:

- o modelo de Manfredi e Realfonzo (2001) apresenta uma muito boa aproximação aos valores da tensão e respetiva extensão axial na rotura, quando a secção quadrada tem um boleamento de 2.0 cm, concretamente aos ensaios nos pilares QR2C1 e QR2C3;
- comparativamente aos resultados obtidos com o pilar QR2C2, apesar dos valores da tensão e respetiva extensão axial serem inferiores, o modelo de Manfredi e Realfonzo (2001) apresenta uma estimativa muito boa;
- o modelo de Wei e Wu (2011) subestima os valores da tensão e extensão axial até à sua rotura, apresentando valores inferiores ao verificado nos resultados experimentais. A disparidade é maior, quando a secção tem um boleamento superior ($R = 3.8$ cm);
- relativamente ao boleamento de 3.8 cm, verifica-se que os dois modelos apresentam valores da tensão axial sempre inferiores aos valores obtidos dos ensaios experimentais;
- para um arredondamento das arestas em 3.8 cm, o modelo de Manfredi e Realfonzo (2001) sobrestima o valor da extensão axial na rotura em cerca de 0.5%, contrariamente ao que se verifica com o modelo de Wei e Wu (2011), que com exceção do QR3C1 apresenta valores sempre inferiores aos obtidos dos ensaios experimentais;
- verifica-se ainda que o aumento do raio de canto da secção, aumenta consideravelmente os valores da tensão e respetiva extensão axial na rotura, sendo que os modelos analíticos representam igualmente este aumento;
- analisando a relação R/B, verifica-se que quanto mais o valor deste parâmetro tender para 0.5 (secções circulares), maior o nível de confinamento;
- no que concerne aos resultados obtidos para a relação da tensão axial com a extensão lateral (modelo de Manfredi e Realfonzo, 2001), verifica-se que o modelo representa muito bem o andamento da curva para um arredondamento dos cantos de 2.0 cm, principalmente para o pilar QR2C3. A discrepância observada nos valores da extensão lateral comparativamente aos pilares QR2C1 e QR2C2 prende-se novamente com a consideração efetuada pelos autores, em que a extensão lateral na rotura corresponde à extensão de rotura do CFRP à tração.
- contrariamente ao verificado com um arredondamento das arestas em 2.0 cm, com um boleamento de 3.8 cm o modelo representa um andamento mais discrepante comparativamente aos ensaios experimentais.

Em suma, verifica-se então que o reforço com CFRP aumentou significativamente os valores da tensão e extensão na rotura, sendo o aumento progressivo com o aumento do boleamento da

secção. Os valores da tensão e extensão na rotura obtidos para os modelos com raios de canto de 2.0 e 3.8 é superior, comparativamente ao modelo com arestas vivas (isto é, $R = 0$). Nesta análise, verificou-se ainda que o modelo que melhor prevê o comportamento do betão confinado é o modelo de Manfredi Realfonzo (2001), com um andamento das curvas muito similar ao que se observa com os resultados experimentais. Desta forma, verifica-se que é possível aumentar a eficácia do confinamento em secções quadradas reforçadas com mantas de CFRP, sendo que quanto maior o raio de canto da secção, maior a eficácia deste reforço.

5.2.2. Comparação entre os modelos analíticos e resultados experimentais de Rocca (2007)

Foi ainda possível efetuar uma comparação dos resultados obtidos com os modelos analíticos de Manfredi e Realfonzo (2001) e de Wei e Wu (2011) com os resultados experimentais obtidos no âmbito das investigações realizadas por Rocca (2007). Apesar do modelo de Manfredi e Realfonzo (2001) ter sido calibrado para pilares com secção quadrada, aplicou-se em pilares com a secção retangular, efetuando uma compatibilização do coeficiente de redução. Posteriormente, são ainda realizadas pequenas comparações das principais diferenças observadas no que que concerne à aplicação do confinamento com CFRP em pilares de secção quadrada e retangular.

Nas Figura 36 e Figura 37 apresentam-se os respetivos diagramas tensão-extensão, referentes aos pilares E3 e B3 anteriormente apresentados na Tabela 7.

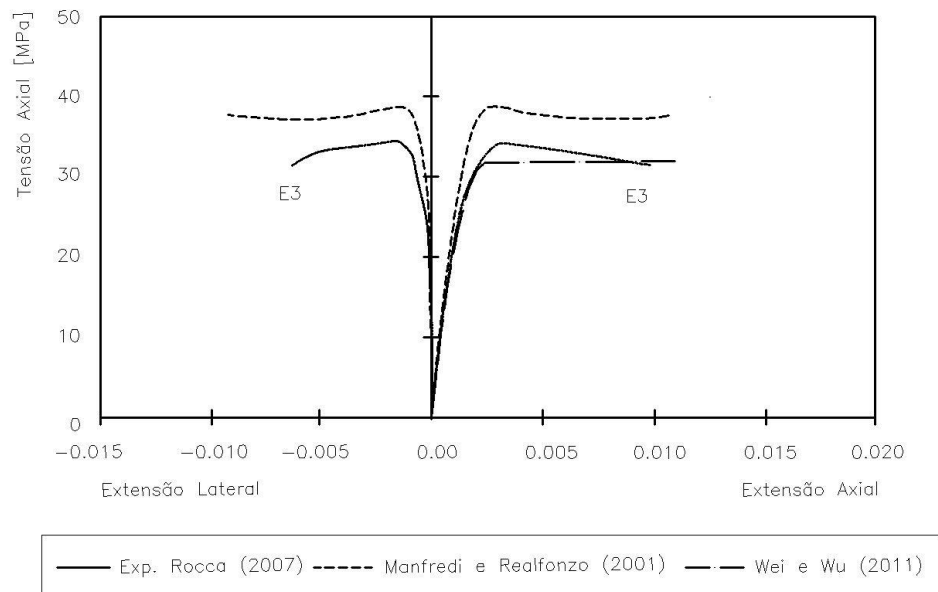


Figura 36 - Ensaio de Rocca (2007) versus modelos analíticos em secção quadrada: Pilar E3 com $R = 3.05$ cm

Comparando os modelos analíticos com os resultados experimentais para o pilar de secção quadrada com os cantos arredondados em 3.05 cm, 32.4x32.4 cm² e 3 camadas de CFRP, conclui-se que:

- os modelos de Manfredi e Realfonzo (2001) e Wei e Wu (2011) apresentam uma boa estimativa do andamento dos diagramas experimentais;
- apesar de o modelo de Manfredi e Realfonzo sobrestimar o valor da tensão axial na rotura, tem uma muito boa aproximação ao valor da respetiva extensão axial;
- o modelo de Wei e Wu (2011) apesar de apresentar um valor ligeiramente superior da tensão axial na rotura, apresenta uma muito boa aproximação ao valor da respetiva extensão axial;
- nesta análise, apesar da ausência de representação da extensão lateral, o modelo que melhor prevê o comportamento do betão confinado, a nível da tensão axial na rotura é o de Wei e Wu (2011).

Na elaboração do presente trabalho, estendeu-se a aplicabilidade do modelo de Manfredi e Realfonzo (2001) a pilares cuja secção é retangular, através da compatibilização do coeficiente de redução apresentado pelos autores, por forma a verificar as principais discrepâncias observadas com a correlação de resultados experimentais. No caso do modelo de Wei e Wu (2011), a sua aplicação foi direta.

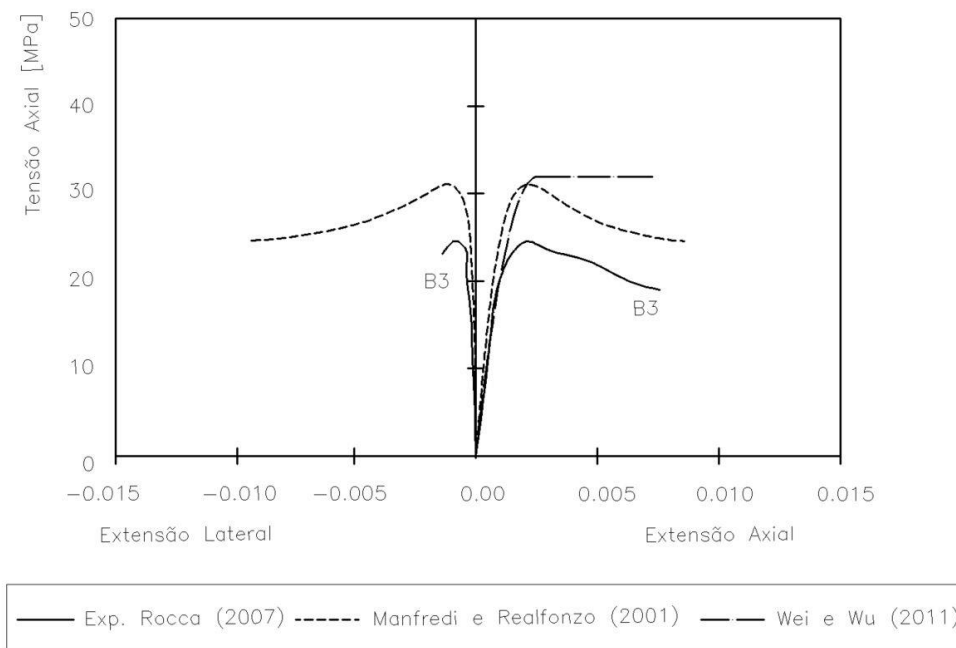


Figura 37 - Ensaio de Rocca (2007) versus modelos analíticos em secção retangular: Pilar B3 com $R = 3.05$ cm

Comparando os modelos analíticos com os resultados experimentais para o pilar de secção retangular com os cantos arredondados em 3.05 cm 63.5×31.8 cm² e 2 camadas de CFRP, conclui-se que:

- à semelhança do observado aquando da aplicação de CFRP em pilares de secção quadrada com arestas vivas, o modelo de Manfredi e Realfonzo (2001) apresenta resultados da extensão lateral muito superiores ao que se observa nos resultados

experimentais. Esta disparidade encontra-se novamente associada à consideração efetuada pelos autores, em que a extensão lateral na rotura corresponde à extensão de rotura do CFRP à tração;

- o modelo de Manfredi e Realfonzo (2001) apesar de sobrestimar o valor da tensão axial na rotura, apresenta uma muito boa aproximação da respetiva extensão axial. No entanto, tem uma representação muito boa relativamente ao andamento das curvas (lateral e axial) comparativamente com os resultados experimentais;
- o modelo de Wei e Wu (2011), também sobrestima o valor axial na rotura, apesar da discrepância ser maior do que o observado para o modelo de Manfredi e Realfonzo (2001). Este modelo (Wei e Wu) tem ainda uma muito boa aproximação aos resultados da extensão axial na rotura.

Da observação efetuada aos diagramas de tensão-extensão axial entre as duas secções (quadrada e retangular) com o mesmo boleamento ($R = 3.05$ cm), verifica-se que o confinamento com CFRP é mais eficaz nas secções quadradas. Verifica-se que, a relação R/B no pilar retangular é cerca de metade do valor do mesmo parâmetro na secção quadrada (0.048 vs 0.094), que, permite concluir que quanto menor este valor, menor a eficácia do confinamento, quer a nível de capacidade resistente, quer a nível de ductilidade.

Para além da observação efetuada nestas duas secções, foi ainda possível confirmar dos ensaios efetuados anteriormente (testes experimentais de Paula, 2003), que o confinamento é tanto maior quanto o parâmetro R/B tender para 0.5 (secções circulares). Acresce ainda que, nos pontos seguintes são efetuadas análises de fatores que influenciam o confinamento com CFRP, sendo que um dos parâmetros analisado é precisamente as diferenças observadas com as diferentes geometrias das secções dos pilares, e conseqüente aumento do parâmetro R/B.

Acresce ainda referir que, apesar do modelo de Wei e Wu (2011) ter previsto com maior precisão os resultados da tensão para o pilar E3, o modelo de Manfredi e Realfonzo (2001) demonstra sempre um andamento dos diagramas mais aproximado ao que se verifica com os resultados experimentais.

5.3. Análise de parâmetros que influenciam o confinamento com CFRP

Como referido, a análise incidiu sobre a avaliação dos seguintes fatores: influência do boleamento (em secções quadradas e retangulares); influência do número de camadas de CFRP (em secções circulares, quadradas e retangulares); influência da geometria da secção transversal e influência do confinamento parcial na eficácia do confinamento com CFRP (em secções circulares).

5.3.1. Influência do boleamento na eficácia do confinamento

De entre os parâmetros que serão avaliados, a presente secção aborda a influência do boleamento em pilares de secção quadrada e retangular. Para esta análise, utilizou-se pilares com as dimensões e características descritas na Tabela 7, respetivamente os pilares E3 e B3, com três camadas de CFRP.

Secção Quadrada

Para ter em consideração a influência do boleamento na eficácia do confinamento, os resultados serão apresentados separadamente pelos modelos analíticos de Manfredi e Realfonzo (2001) e Wei e Wu (2011), ilustrados nas Figura 38 e 39, em que, os raios de canto variaram entre 0 e 5.5 cm.

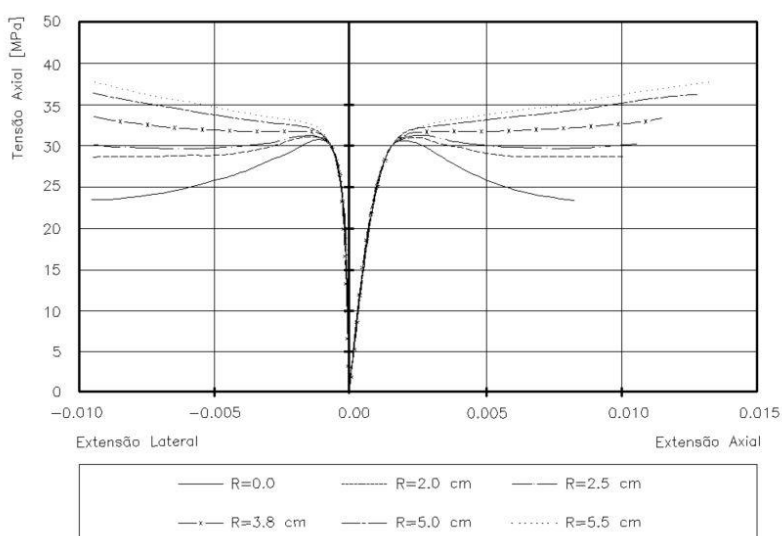


Figura 38 - Influência do boleamento em secção quadrada com modelo de Manfredi e Realfonzo (2001)

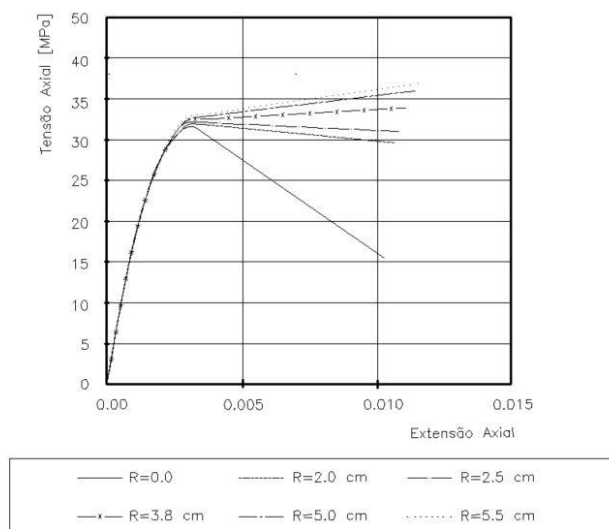


Figura 39 - Influência do boleamento em secção quadrada com modelo de Wei e Wu (2011)

Comparando os diagramas de tensão-extensão obtidos com os modelos analíticos para uma secção transversal quadrada com um aumento dos raios de canto, conclui-se que:

- com os dois modelos analíticos considerados, os valores da tensão axial e respetiva extensão axial aumentam com o aumento do arredondamento das arestas, isto é, verifica-se um aumento destes valores com um aumento da relação R/B;
- o aumento da extensão axial é mais notório no modelo de Manfredi e Realfonzo (2001), onde se verifica um acréscimo em cerca de 60% entre a aplicação de CFRP em secções com arestas vivas, e a aplicação com um boleamento de 5.5 cm. Por sua vez, o modelo de Wei e Wu (2011) demonstra um acréscimo de cerca de 12% para os mesmos parâmetros do boleamento;
- a variação da tensão axial, entre uma secção com arestas vivas e um boleamento de 5.5 cm, no modelo de Wei e Wu (2011) é maior (136% vs 60%), dado o baixo valor da tensão axial na rotura, obtido neste modelo para uma secção com arestas vivas.
- os valores de tensão axial na rotura são semelhantes nos dois modelos apresentados, com exceção do observado para as secções com arestas vivas, em que, o modelo de Manfredi e Realfonzo (2001) apresenta um valor de tensão axial 54% superior ao observado no modelo de Wei e Wu (2011);
- as extensões axiais na rotura do betão confinado diferem ligeiramente, sendo mais discrepante quando o pilar tem arestas vivas. Verifica-se neste caso, um aumento da tensão e extensão axial em cerca de 60%;
- apesar do aumento da capacidade resistente e ductilidade com o aumento do boleamento das arestas da secção transversal, a partir de um boleamento de 3.8 cm não se justificará aumentar mais o raio de canto, associado a dificuldades de construtivas, tal como a existência de armaduras longitudinais.

Secção Retangular

Os modelos analíticos avaliados nesta secção, à semelhança da secção anterior, foram os de Manfredi e Realfonzo (2001) e de Wei e Wu (2011). Nesta análise, o raio de canto variou entre 0 e 5.5 cm, de forma a verificar a influência deste parâmetro em pilares cuja secção transversal é retangular e os respetivos diagramas encontram-se ilustrados nas Figura 40 e 41.

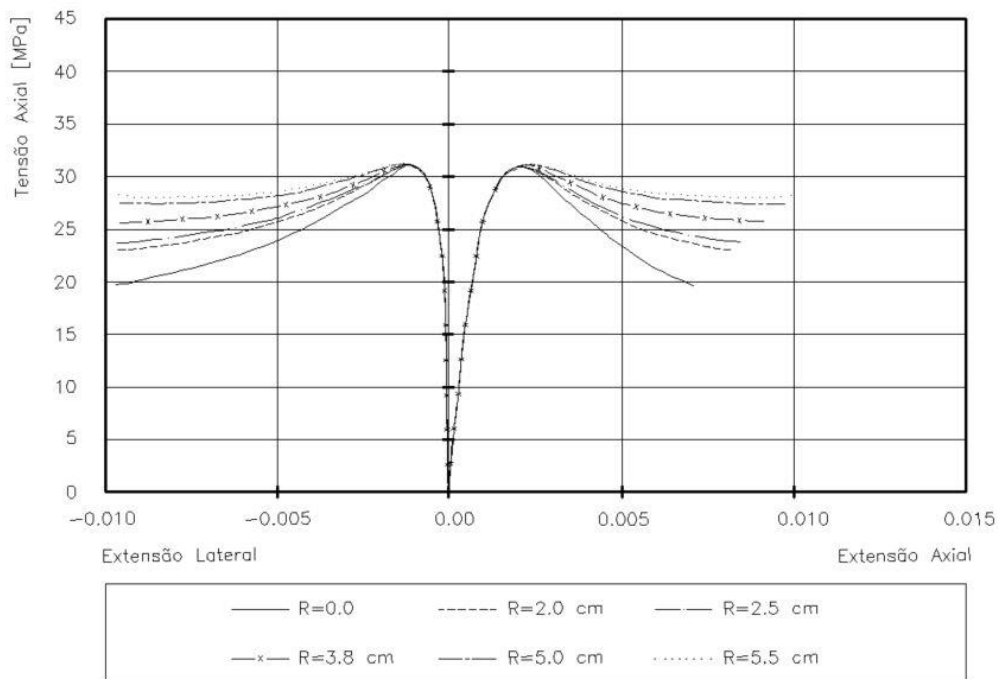


Figura 40 - Influência do boleamento em secção retangular com modelo de Manfredi e Realfonzo (2001)

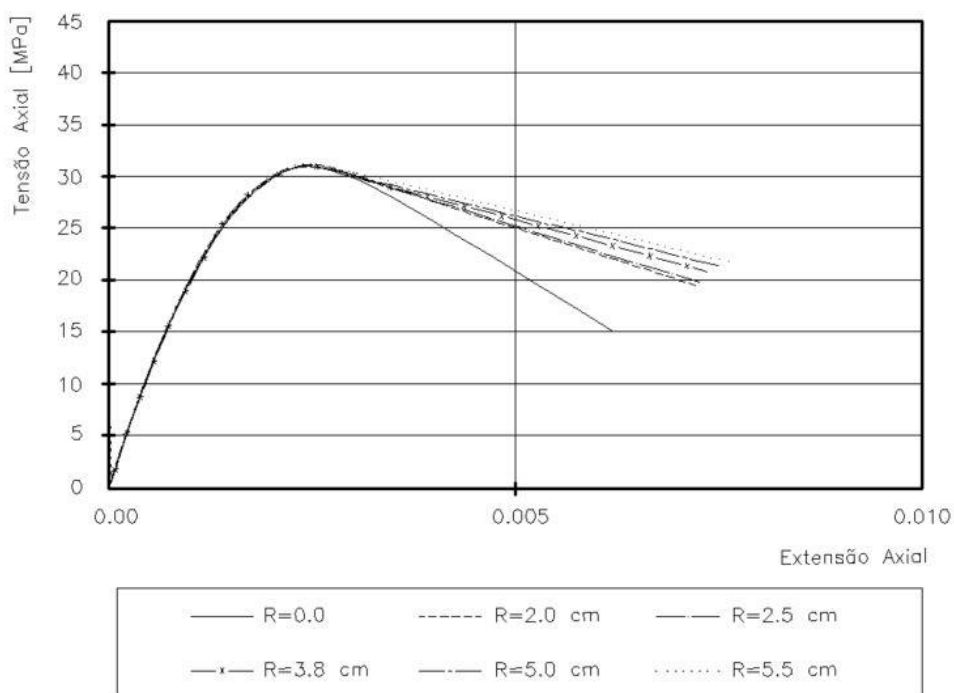


Figura 41 - Influência do boleamento em secção retangular com modelo de Wei e Wu (2011)

Comparando os diagramas de tensão-extensão obtidos dos modelos analíticos para uma secção transversal retangular com um aumento dos raios de canto, conclui-se que:

- em ambos os modelos analíticos, os valores da tensão axial e respetiva extensão axial, aumentam com o aumento do arredondamento das arestas, à semelhança do observado para as secções transversais quadradas, embora com um aumento menor;
- o aumento gradual da tensão e respetiva extensão axial é maior no modelo de Manfredi e Realfonzo (2001), principalmente os valores da extensão axial, onde se verifica um aumento de cerca de 40% (vs 23%) desde a aplicação de CFRP em secções com arestas vivas, para a aplicação com um boleamento de 5.5 cm;
- os valores de tensão axial na rotura diferem nos dois modelos apresentados, sendo que os valores obtidos no modelo teórico de Manfredi e Realfonzo (2001) são sempre superiores aos observados no modelo de Wei e Wu (2011). Com um arredondamento das arestas de 5.5 cm, verifica-se uma discrepância de cerca de 30%;
- à semelhança do verificado nas secções quadradas, apesar do aumento gradual com o aumento do boleamento das arestas da secção transversal, a partir de um boleamento de 3.8 cm não se justificará aumentar mais este arredondamento, dado que o acréscimo de tensão e extensão axial é de 6% (de 3.8 para 5.0 cm) e 2% (de 5.0 para 5.5 cm) no modelo de Manfredi e Realfonzo (2001) e de 1% no modelo de Wei e Wu (2011), para os mesmos aumentos.

Em suma, verifica-se, por observação dos diagramas de tensão-extensão apresentados nas figuras anteriores, relativos ao boleamento das arestas das secções quadradas e retangulares, que o aumento do raio de canto das secções permite aumentar a eficácia do confinamento conferido aos elementos verticais. Apesar do aumento ser visível para os dois tipos de secção transversal, o confinamento em elementos de secção quadrada é mais eficaz, dado que, o confinamento é tanto maior, quanto a secção tender para uma secção circular, tal como verificado nas diversas investigações realizadas pelos vários autores mencionados anteriormente.

5.3.2. *Influência do número de camadas de CFRP na eficácia do confinamento*

Um dos fatores analisados foi também a influência do número de camadas na eficácia do confinamento. Para esta análise, foram analisados os pilares com secção quadrada e retangular mencionados no subcapítulo anterior, de forma a verificar a influência deste parâmetro no aumento da capacidade de carga e ductilidade de um elemento vertical confinado. Assim, utilizou-se pilares com as dimensões e características descritas na Tabela 7, respetivamente os pilares E3 e B3, com um arredondamento dos cantos de 3.8 cm.

Secção Quadrada

Como referido, a secção quadrada considerada apresenta um raio de canto de 3.8 cm, e consideraram-se vários números de camadas de mantas de CFRP, com um mínimo de três e um máximo de oito. Os respetivos diagramas encontram-se ilustrados nas Figura 42 e 43, separados

pelos modelos analíticos em análise, nomeadamente Manfredi e Realfonzo (2001) e Wei e Wu (2011).

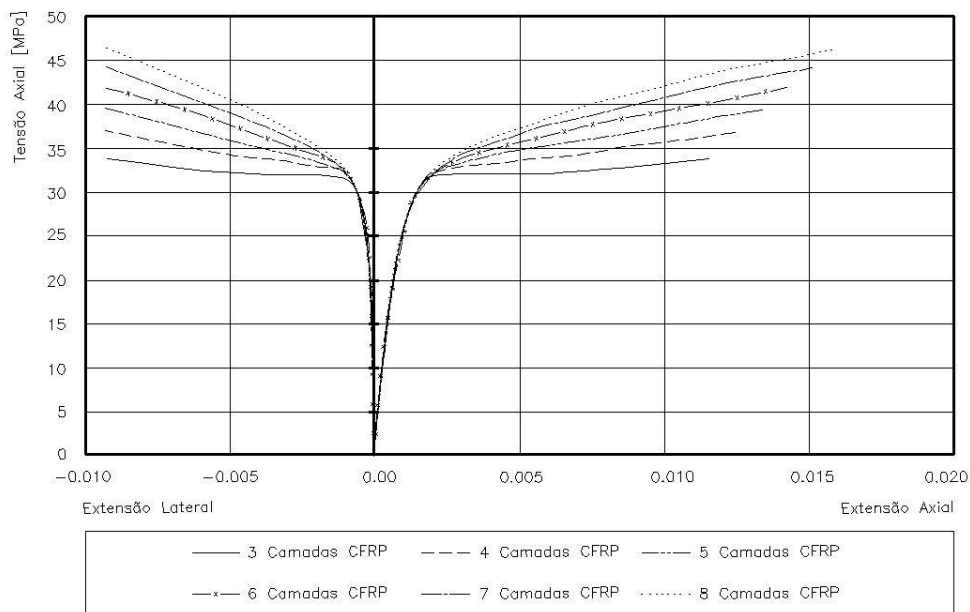


Figura 42 - Influência do número de camadas de CFRP com o modelo de Manfredi e Realfonzo (2001) em pilar com secção quadrada

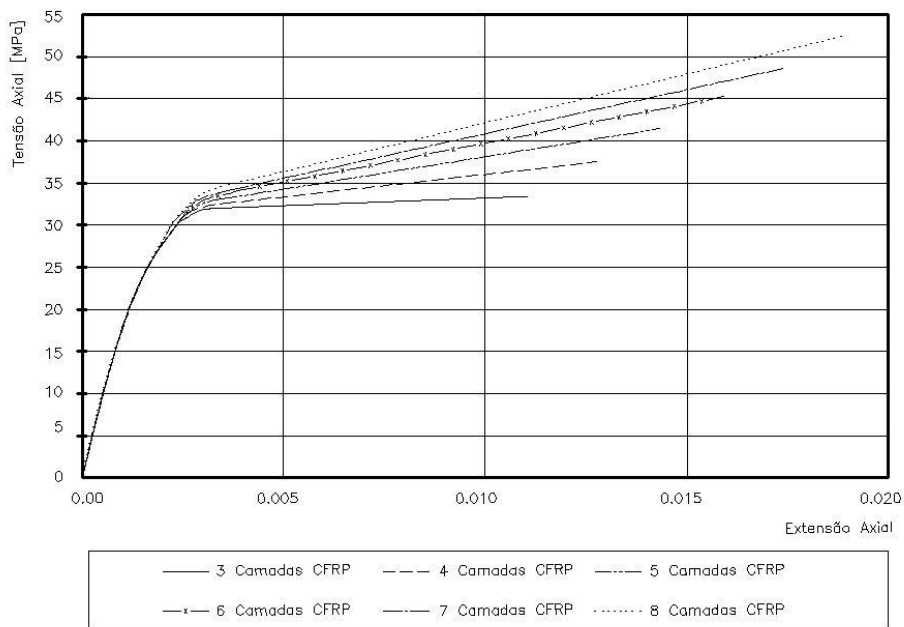


Figura 43 - Influência do número de camadas de CFRP com o modelo de Wei e Wu (2011) em pilar com secção quadrada

Comparando os diagramas de tensão-extensão obtidos, com um aumento no número de camadas do CFRP aplicado, conclui-se que:

- em ambos os modelos analíticos, os valores da tensão axial e respetiva extensão axial, aumentam com o aumento do número de camadas de material compósito;
- o modelo de Wei e Wu (2011) apresenta um aumento muito superior nos resultados obtidos com a aplicação de 3 e 8 camadas, sendo estes aumentos de cerca de 71% (vs 36% - Manfredi e Realfonzo, 2001) para a extensão axial, e 57% (vs 37% - Manfredi e Realfonzo, 2001) nos valores da respetiva tensão axial;
- o incremento de capacidade de carga e ductilidade facultado com o aumento do número de camadas, é menor, à medida em que se aumenta o número de camadas. Este incremento é sempre superior no modelo de Wei e Wu (2011) comparativamente ao modelo de Manfredi e Realfonzo (2001), onde por exemplo, de uma passagem de 3 para 4 camadas há um aumento no valor da extensão axial de 16% (vs 8%) e tensão axial de 13% (vs 9%). Os aumentos da extensão axial na passagem de 7 para 8 camadas são de 8% vs 5% e na tensão axial de 7% para 5%;
- com 8 camadas de CFRP, o modelo de Wei e Wu (2011) apresenta uma discrepância de resultados da tensão e respetiva extensão axial comparativamente ao modelos de Manfredi e Realfonzo (2001) em cerca de 12 e 16%, respetivamente.

Secção Retangular

À semelhança da análise realizada em pilares com secção quadrada, nos pilares cuja secção é retangular considerou-se um aumento do número de camadas, agora com um mínimo de três e um máximo de nove. O raio de canto considerado é de 3.8 cm.

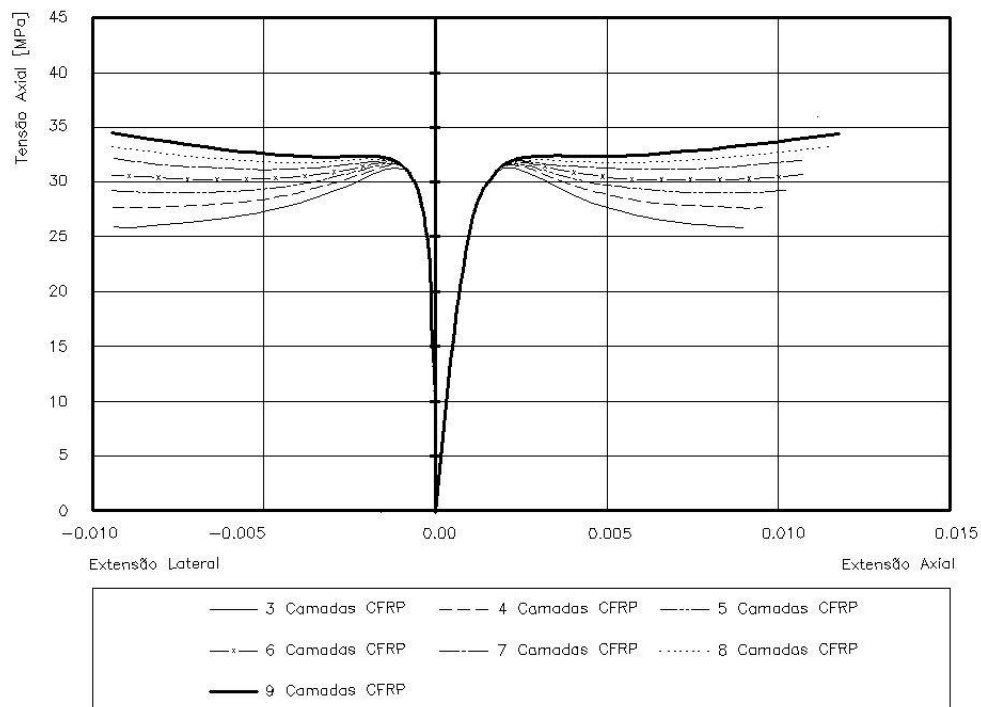


Figura 44 - Influência do número de camadas de CFRP com modelo de Manfredi e Realfonzo (2001) em pilar com secção retangular

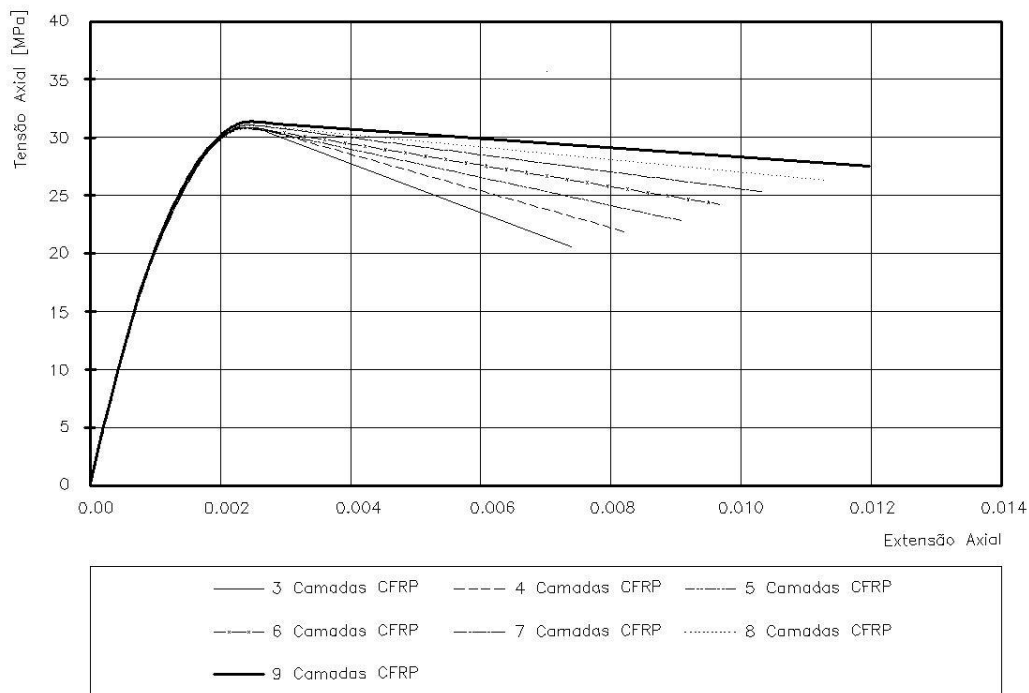


Figura 45 - Influência do número de camadas de CFRP com modelo de Wei e Wu (2011) em pilar com secção retangular

Comparando os diagramas de tensão-extensão obtidos dos modelos analíticos para uma secção transversal retangular com um aumento do número de camadas de CFRP, conclui-se que:

- à semelhança do verificado em secções transversais quadradas, em ambos os modelos analíticos, os valores da tensão axial e respetiva extensão axial aumentam com o aumento do número de camadas de material compósito, embora com um aumento menor;
- os valores da tensão axial e extensão axial na rotura, como expectável, são inferiores aos valores observados para uma secção quadrada;
- os valores da tensão axial na rotura nos dois modelos analíticos diferem significativamente, sendo o modelo de Wei e Wu (2011) o que apresenta os valores mais baixos, onde se verifica uma diferença de 23% quer para os valores de tensão na rotura com 3 camadas, quer para as 9 camadas. No entanto, à medida que há um aumento no número de camadas, o valor da respetiva extensão axial na rotura no modelo de Wei e Wu (2011) tende a igualar o mesmo valor obtido no modelo de Manfredi e Realfonzo (2001), verificando-se uma discrepância entre eles de 0.4% com a aplicação de 9 camadas de material compósito.
- com o modelo de Manfredi e Realfonzo (2001) verificou-se que com um aumento do número de camadas, o segundo troço do diagrama poderá ser crescente. O mesmo não se verifica apenas com um boleamento das arestas.

Secção Circular

A influência do número de camadas na eficácia do confinamento também foi analisada num pilar cuja secção transversal é circular. Para esta análise, foi utilizado o modelo de Ferreira (2007), tendo sido considerado um pilar com secção circular de diâmetro de 32.4 cm, dado que a aplicação deste modelo apenas permite esta tipologia de secção. As características dos materiais e do confinamento são as descritas para o pilar E3 da Tabela 7. Refira-se que o teste foi efetuado tendo em conta um confinamento total do pilar. No subcapítulo seguinte é apresentada uma análise considerando confinamento parcial.

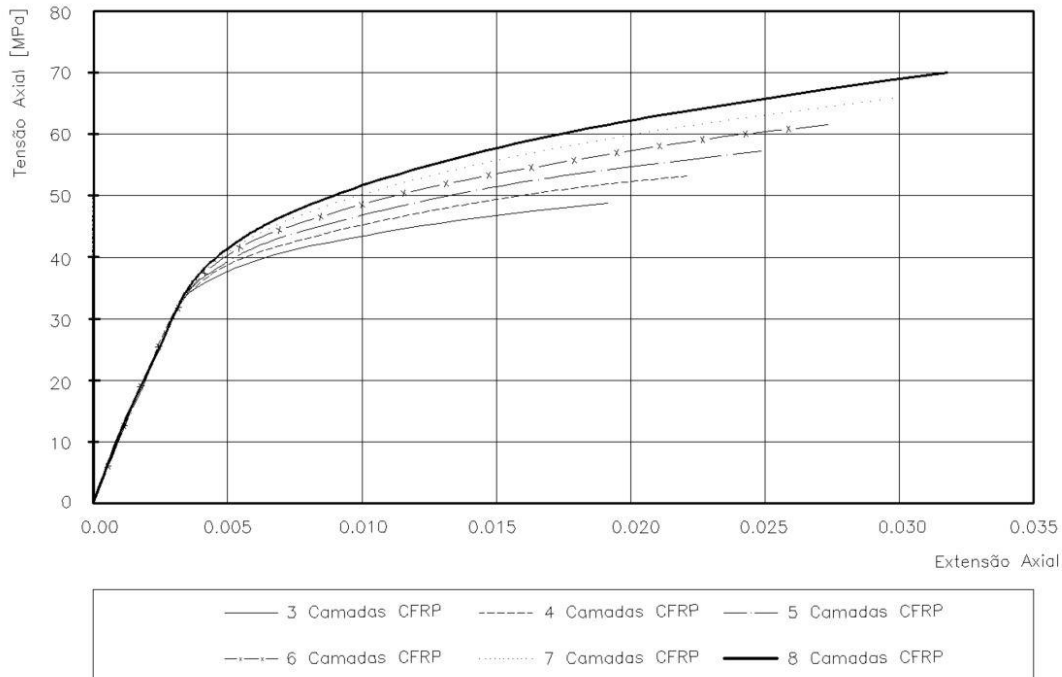


Figura 46 - Influência do número de camadas de CFRP com modelo de Ferreira (2007) em pilar com secção circular

Comparando os diagramas de tensão-extensão obtidos dos modelos analíticos para uma secção transversal circular com um aumento do número de camadas de CFRP, conclui-se que:

- à semelhança do verificado para as secções transversais quadradas e retangulares, os valores da tensão axial e respetivas extensões axiais, aumentam com o aumento do número de camadas de material compósito;
- os valores da tensão e extensão axial são muito superiores aos valores observados em secções quadradas ou retangulares;

5.3.3. Influência da geometria da secção transversal na eficácia do confinamento

A influência da geometria da secção do pilar é também avaliada e comparada. Neste sentido, optou-se por considerar o pilar B3, apresentado na Tabela 7, reduzindo o lado maior do seu comprimento até atingir uma secção quadrada com 31.8 cm de lado, e uma secção circular com

um diâmetro de 31.8 cm. Para uma melhor visualização do exposto, na Tabela 8 discriminam-se as geometrias das secções transversais adotadas. As características do confinamento e dos materiais mantêm-se.

Tabela 8 - Geometria dos pilares adotados

Secção	B [cm]	D [cm]	R [cm]	R/B	B/D
Retangular 1	63.5	31.8	3.8	0.06	2.0
Retangular 2	45.0	31.8	3.8	0.08	1.4
Quadrado	31.8	31.8	3.8	0.12	1.0
Circular	-	31.8	-	-	-

Nas Figura 47 e 48 apresentam-se os diagramas de tensão-extensão obtidos com os modelos analíticos de Manfredi e Realenzo (2001) e de Wei e Wu (2011).

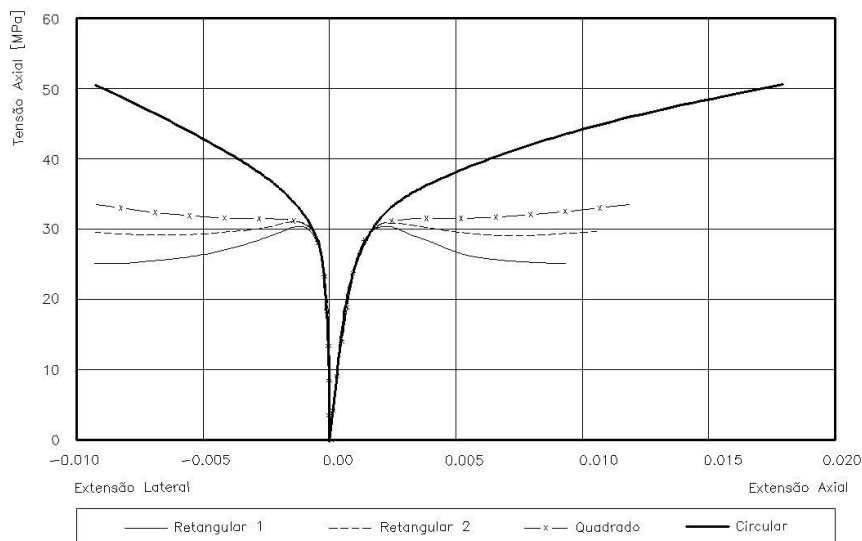


Figura 47 - Influência da geometria com modelo de Manfredi e Realenzo (2001)

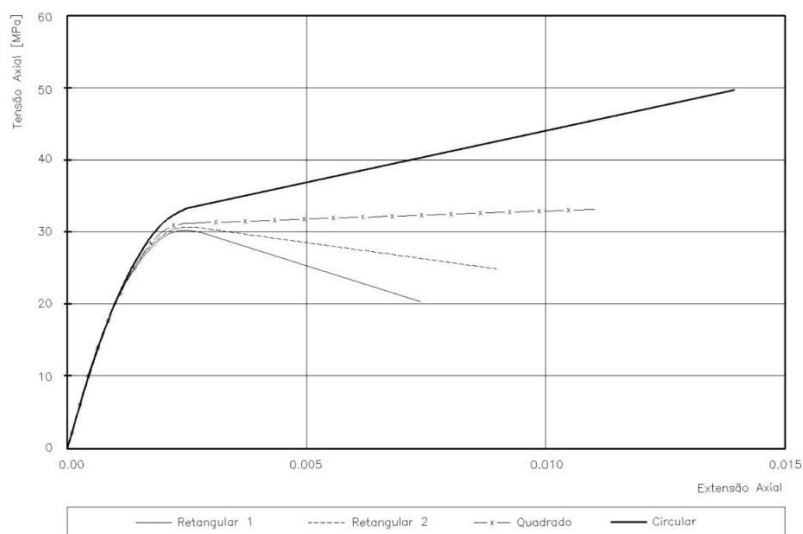


Figura 48 - Influência da geometria com modelo de Wei e Wu (2011)

Analisando os diagramas de tensão-extensão obtidos dos modelos analíticos para a influência da geometria, verifica-se que:

- nos dois modelos analíticos há um aumento da tensão axial e respetiva extensão, à medida que a secção tende para circular, ou seja, à medida que a relação R/B tende para 0.5;
- como expectável, e tendo em consideração as análises anteriormente efetuadas, a maior discrepância dos valores da tensão e extensão axial na rotura entre os dois modelos analíticos surge para os pilares cuja secção é retangular, em que o modelo de Wei e Wu (2011) é o que apresenta os menores valores;
- os valores da tensão axial na rotura nos dois modelos são idênticos quando as secções dos pilares são quadradas (com boleamento dos cantos) e circulares, contrariamente ao que se observa para a respetiva extensão axial;
- em ambos os modelos, verifica-se um grande aumento da capacidade resistente e ductilidade em pilares confinados com secção circular, comparativamente às restantes tipologias de secções transversais analisadas;

Das limitações geométricas constantes nas recomendações efetuadas pelo ACI e apresentadas no subcapítulo 4.4, verifica-se para o efeito que, relativamente à recomendação de adoção de uma relação de $B/D \leq 1.5$, esta encontra-se associada à melhoria na capacidade resistente e ductilidade facultadas ao elemento de betão confinado. No entanto, na análise efetuada, verifica-se que apesar de uma melhoria menor, os resultados obtidos para uma secção com $B/D = 2.0$ são razoáveis. O ACI recomenda ainda a adoção de um raio de canto mínimo de 1.3 cm, que, tendo em conta as análises anteriormente efetuadas verifica-se ser aceitável, uma vez que os valores da tensão e extensão axial aumentam com o aumento do boleamento do raio de canto, embora a partir de um determinado boleamento não se justifique o seu aumento. Para além deste fator, nos casos em que não exista qualquer arredondamento dos cantos, poderá ocorrer uma rotura prematura da manta com o carregamento, causada pela concentração de tensões nestes pontos. Relativamente à recomendação de adoção de secções com valores de B e D inferiores a 90 cm, não foi efetuada uma análise em que se pudesse comparar as principais diferenças com a adoção de secções com estas dimensões.

Das recomendações nas limitações impostas pela *fib*, existe apenas uma limitação do raio de canto da secção. Neste caso, a *fib* recomenda então a adoção de um raio de canto entre 1.5 e 2.5 cm, que, apesar de se verificar um maior aumento nos casos em que o raio de canto varia com estes valores, são também muito bons os resultados com um raio de canto superior, tal como é o caso da adoção de raios de canto de 3.8 cm constantes nos estudos experimentais de Paula (2003), e ainda da adoção de um raio de canto de 3.05 cm adotado nos ensaios experimentais de Rocca (2007).

5.3.4. Confinamento Parcial

O nível de confinamento parcial será o fator abordado no presente subcapítulo. Para esta avaliação, foi utilizado o modelo de Ferreira (2007), tendo sido considerado um pilar com secção circular de diâmetro de 32.4 cm, e mencionado no ponto 5.3.2. As características dos materiais e do confinamento são as descritas para o pilar E3 da Tabela 7.

Esta análise consiste na verificação da eficácia do confinamento parcial, fazendo uma variação do número de faixas de CFRP ao longo da altura do pilar, na largura das faixas distribuídas, e ainda na variação do número de camadas de material compósito por cada faixa aplicada.

Por fim, refira-se que na presente avaliação, não foram realizadas correlações com resultados experimentais, dado que o modelo de Ferreira (2007) foi validado com os ensaios experimentais realizados.

Varição do número de faixas de CFRP

No sentido de verificar a influência do aumento do número de faixas de CFRP na eficácia do confinamento, nomeadamente com 4, 5 e 6 faixas, a respetiva largura do material compósito foi fixada em 45, 60 e 80 mm. Importa salientar que nos estudos realizados por Ferreira (2007), a autora realizou análises com 5 e 6 faixas de material compósito e larguras de 45 e 60 mm, sendo que, na presente dissertação estenderam-se as análises para 4 faixas e larguras de 80 mm, no sentido de avaliar a sua variação.

Nas figuras seguintes, apresentam-se os sistemas de confinamento parcial adotados, com a variação do número de faixas, divididos pela largura destas, seguidos da apresentação dos valores obtidos para cada um dos sistemas de confinamento parcial e do total. Consideraram-se 3 camadas de CFRP, por cada faixa.

Faixas de 45 mm

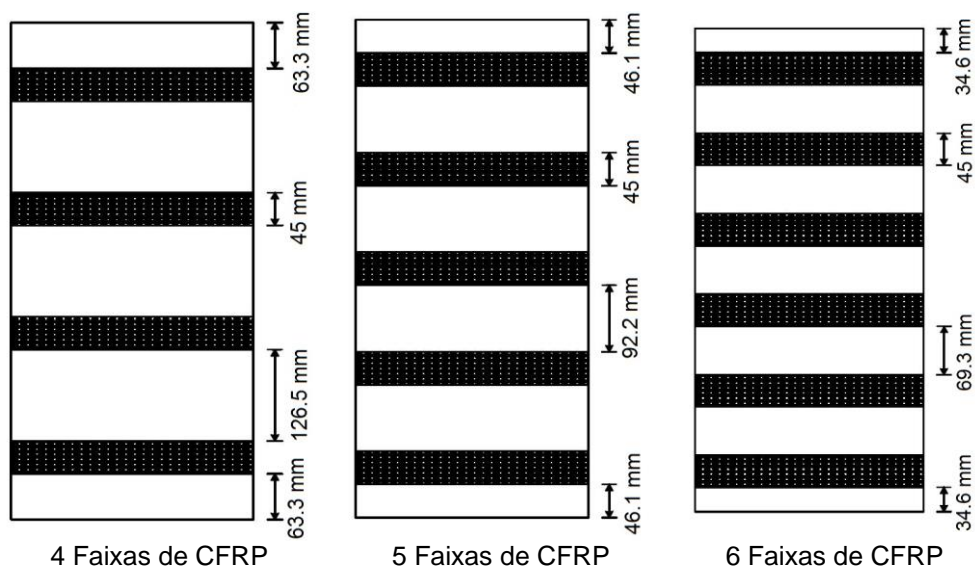


Figura 49 - Sistemas de confinamento parcial (faixas com 45 mm)

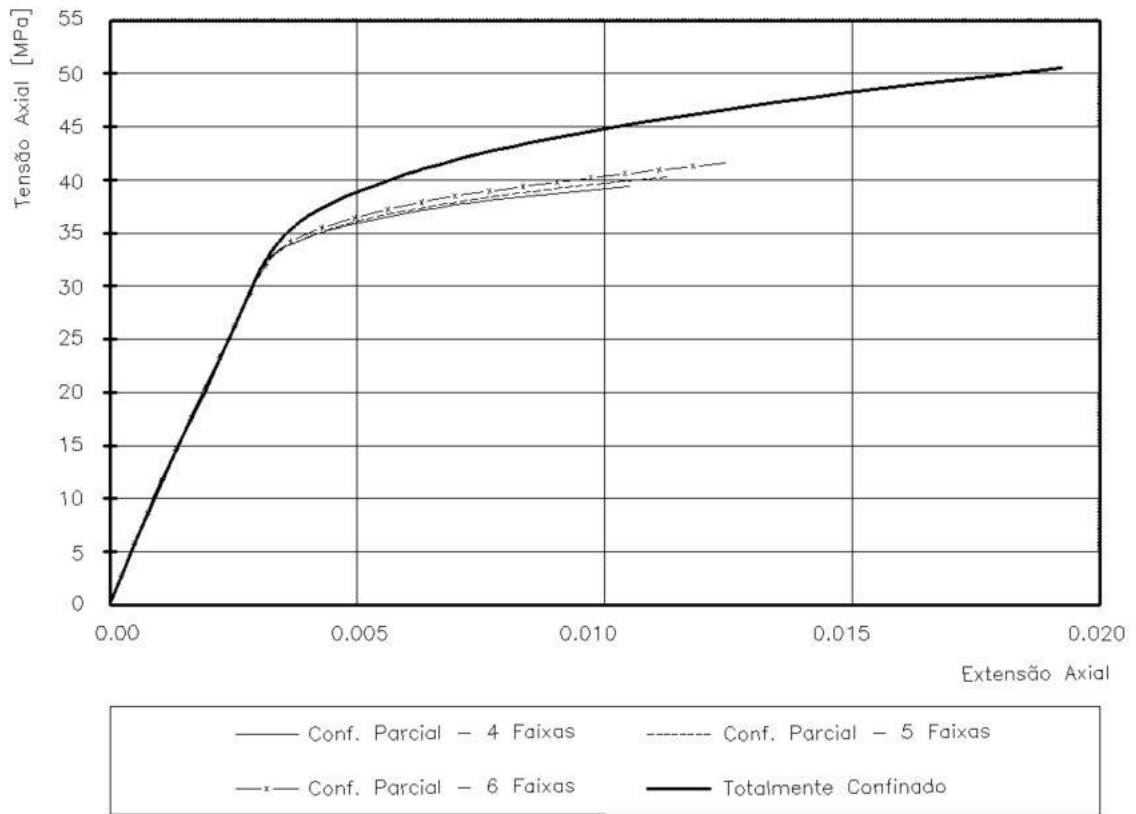


Figura 50 - Variação do número de faixas de 45 mm no confinamento parcial, comparativamente ao confinamento total

Faixas de 60 mm

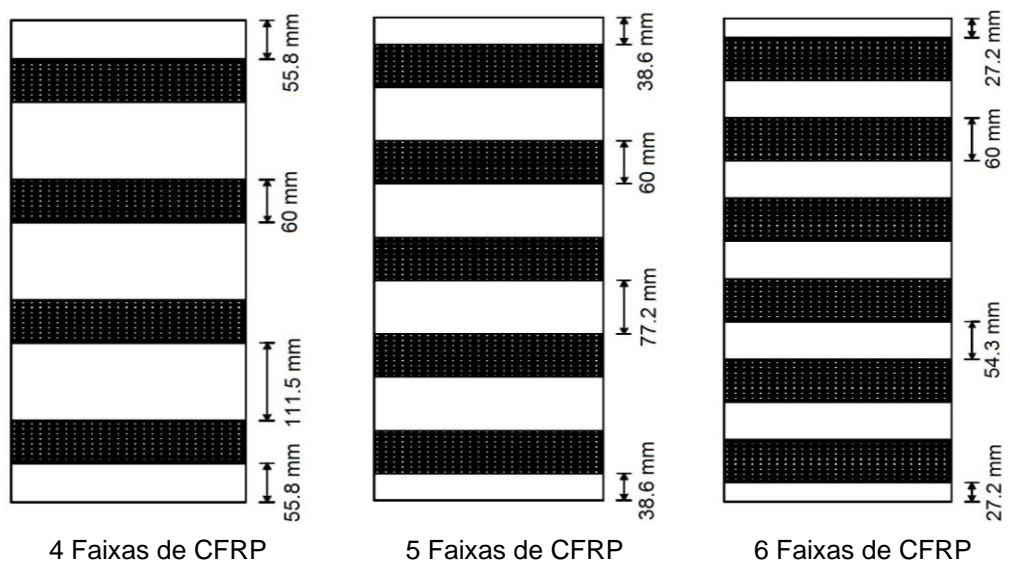


Figura 51 - Sistemas de confinamento parcial (faixas com 60 mm)

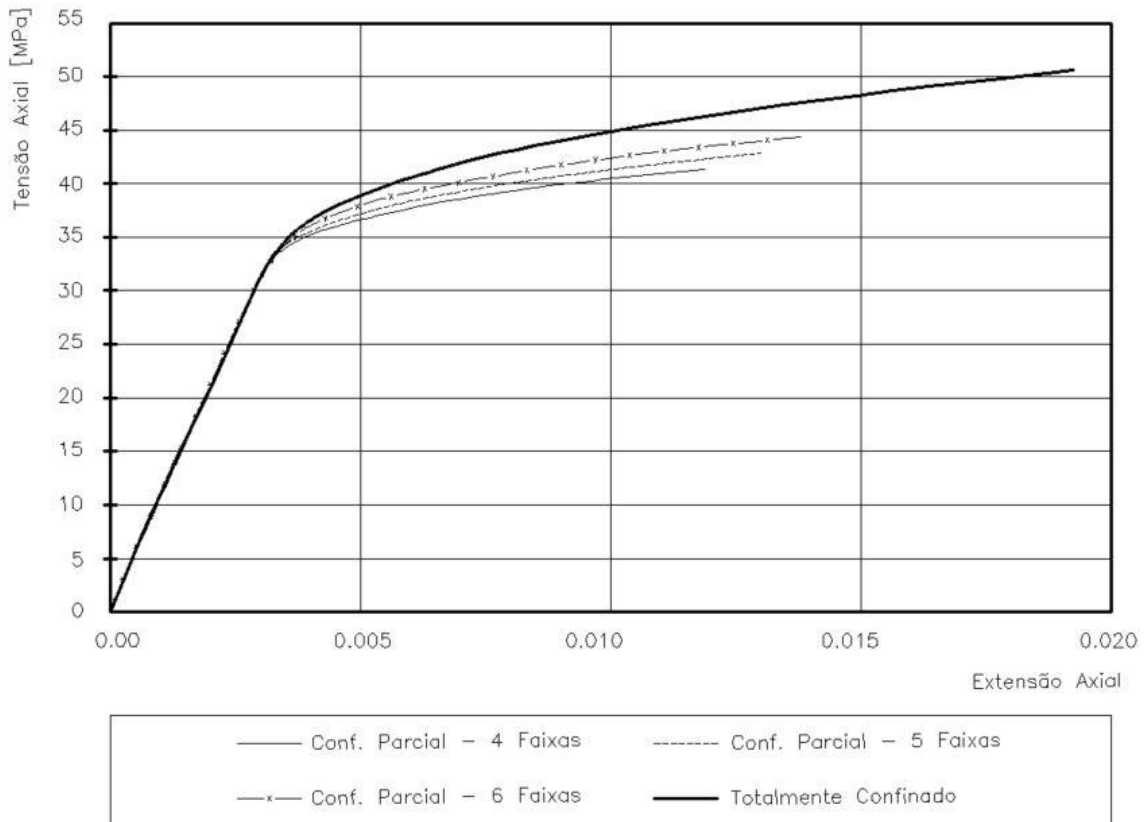


Figura 52 - Variação do número de faixas de 60 mm no confinamento parcial, comparativamente ao confinamento total

Faixas de 80 mm

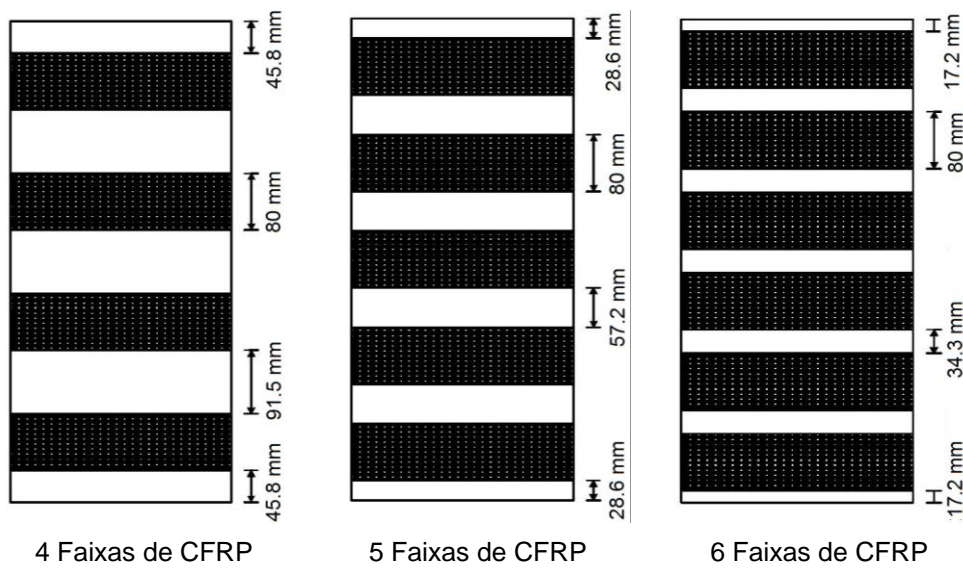


Figura 53 - Sistemas de confinamento parcial (faixas com 80 mm)

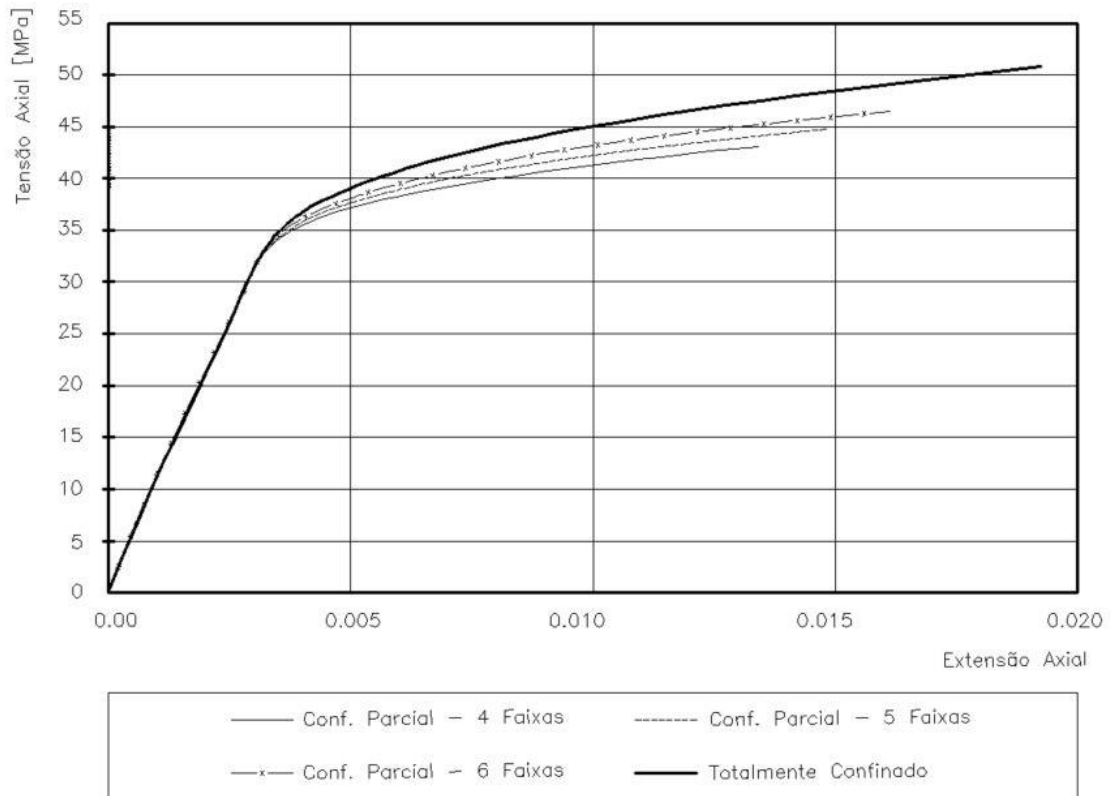


Figura 54 - Variação do número de faixas de 80 mm no confinamento parcial, comparativamente ao confinamento total

Analisando os diagramas de tensão-extensão obtidos do modelo teórico para a aplicação de um confinamento parcial com variação do número de faixas de CFRP, verifica-se que:

- com o aumento do número de faixas com a mesma largura, verifica-se um aumento da capacidade resistente e ductilidade do betão confinado, no entanto, e como seria de esperar, o confinamento parcial apresenta valores da tensão e extensão axial inferiores aos observados com um confinamento total do elemento;
- são maiores os aumentos da tensão axial, e respetiva extensão, nos modelos que dispunham de menor espaço livre entre as faixas de CFRP, isto é, nos modelos em que a percentagem de CFRP é maior (6 faixas de 80 mm).

Varição da largura das faixas de CFRP

No sentido de verificar a variação nos resultados obtidos, durante uma variação da largura das faixas de CFRP na eficácia do confinamento, seguem-se os diagramas de tensão-extensão separados pelo número de faixas em que foram parcialmente confinados.

Esta análise não é realizada separadamente no âmbito das investigações realizadas por Ferreira (2007), sendo que surge no sentido de dar um contributo na verificação das principais diferenças observadas com esta variação.

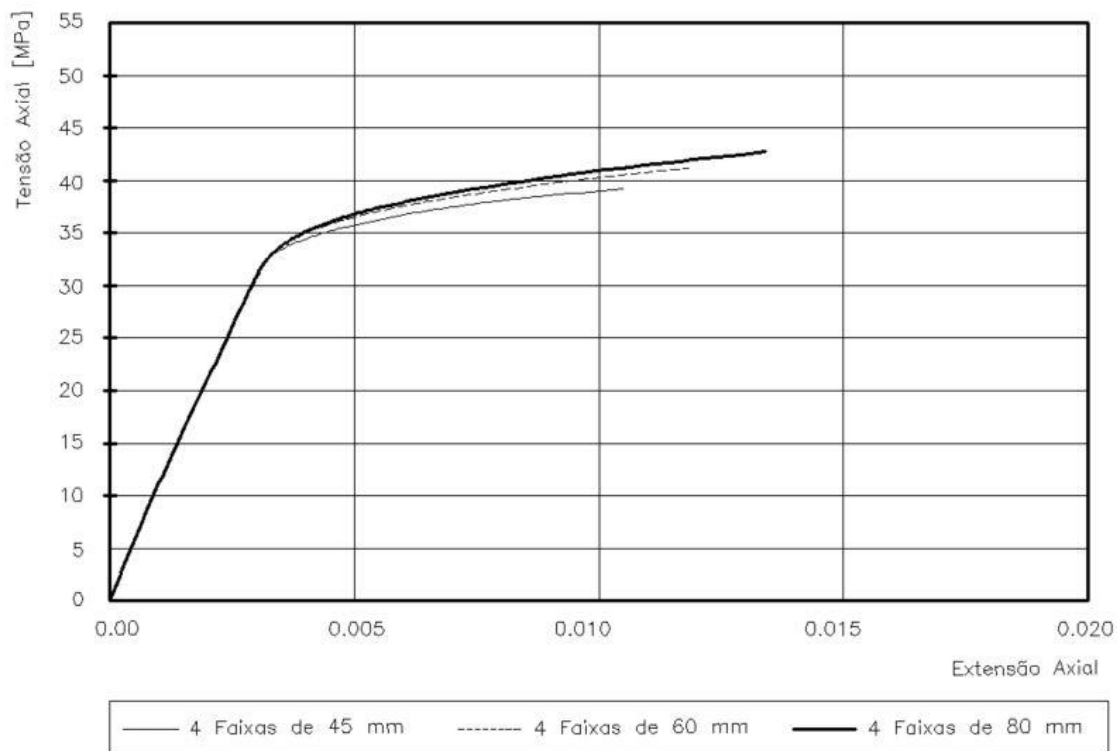


Figura 55 - Eficácia do confinamento parcial com 4 faixas com larguras de 45, 60 e 80 mm

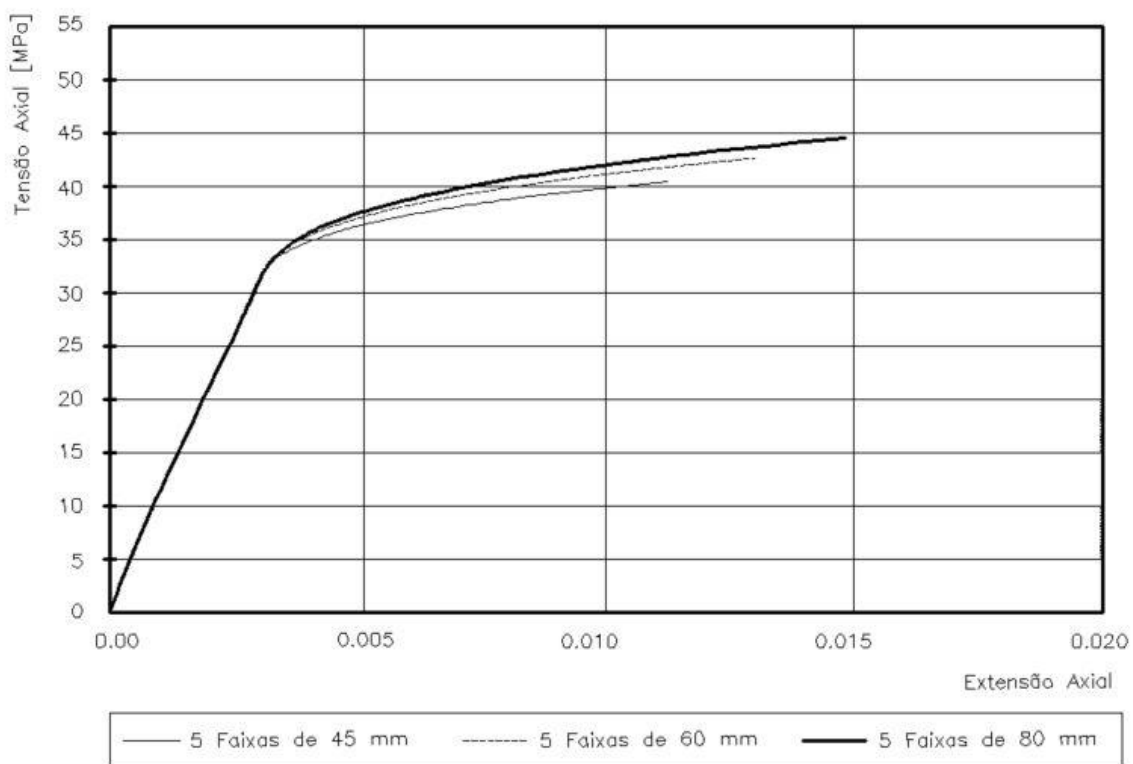


Figura 56 - Eficácia do confinamento parcial com 5 faixas com largura de 45, 60 e 80 mm

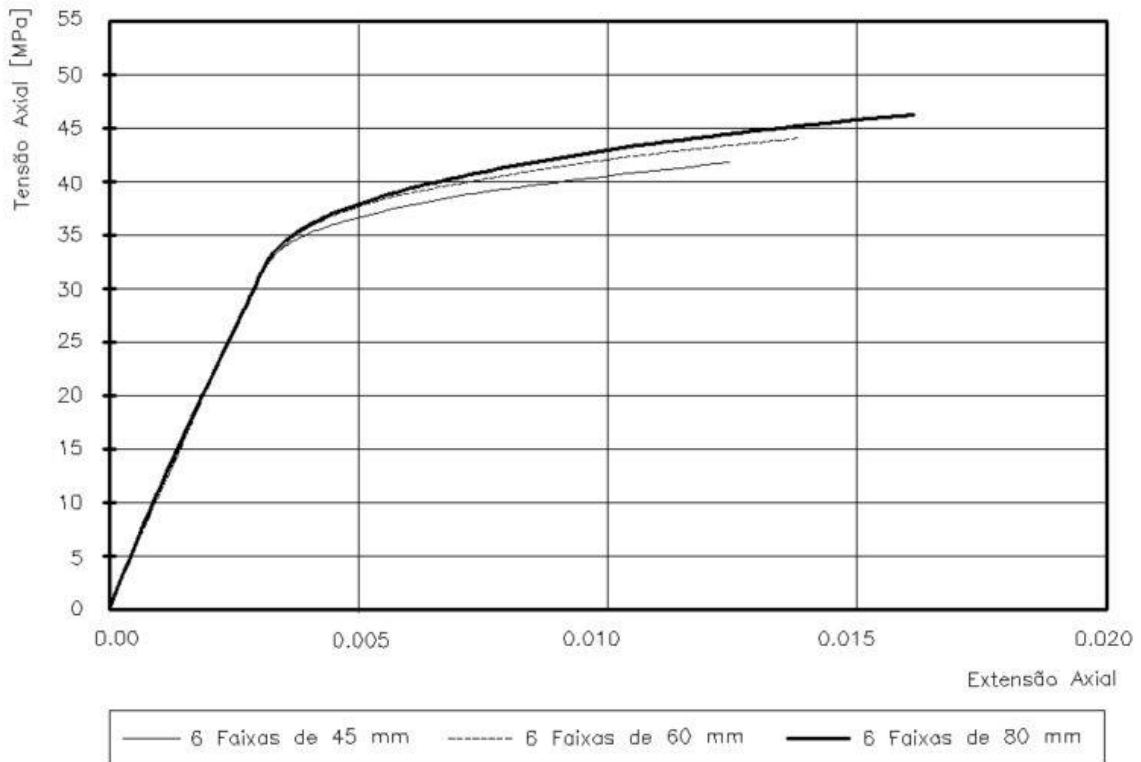


Figura 57 - Eficácia do confinamento parcial com 6 faixas com largura de 45, 60 e 80 mm

Analisando os diagramas de tensão-extensão obtidos do modelo teórico para a aplicação de um confinamento parcial com variação da largura das faixas de CFRP em 45, 60 e 80 mm, verifica-se que à semelhança do observado anteriormente com a variação do número de faixas, há um aumento na eficácia do confinamento (quer a nível de capacidade de carga, quer a nível de ductilidade) quanto maior for a percentagem confinada do pilar (através da variação da largura das faixas).

No entanto, verifica-se que a forma que Ferreira (2007) adotou para considerar o nível de confinamento é simples, embora aparentemente seja suficiente para modelar casos correntes em que, a tensão de compressão do betão não confinado se encontre entre 16 e 32 MPa. Neste caso, seria ainda necessário desenvolver mais análises experimentais para validação deste modelo, incluindo inclusive uma extensão do mesmo para pilares com diferentes tipologias (quadrada e retangular). Salienta-se no entanto, o facto de o modelo proposto incluir na sua análise a existência de armaduras transversais em aço.

6. Considerações Finais

Neste capítulo, apresentam-se os principais aspetos e conclusões, referidos ao longo da presente dissertação, e referem-se ainda sugestões de temas que poderão ser objeto de análises e desenvolvimentos futuros.

6.1. Conclusões

Foram apresentados vários modelos de comportamento do betão confinado, onde se incluíram modelos de confinamento com armaduras de aço e, posteriormente, com materiais compósitos. Verificou-se que a maior parte dos modelos analíticos de confinamento com compósitos de FRP foram desenvolvidos para modelos cilíndricos de betão simples, sem armadura, e que surgem de alterações aos modelos de confinamento com aço.

Dos modelos propostos na bibliografia consultada verifica-se que uns apenas apresentam equações para estimar a tensão na rotura e a respetiva extensão axial, e que outros propõem equações que possibilitam a definição da curva de comportamento do betão ao longo do carregamento, até à rotura. Alguns modelos propõem equações para representar todo o comportamento, com a inclusão da relação tensão axial-extensão lateral.

De entre os modelos discutidos, selecionaram-se três para avaliação, comparando os resultados obtidos com a aplicação dessas relações constitutivas com resultados experimentais. Para a obtenção das curvas tensão-extensão axial e tensão axial-extensão lateral, os modelos foram implementados numericamente, em ambiente *Mathworks - Matlab R2015a*, desenvolvendo-se para tal uma ferramenta numérica, especificamente para os trabalhos da presente dissertação.

A análise incluiu secções circulares, quadradas e retangulares confinadas com mantas de CFRP, sendo que estes materiais possuem um comportamento elástico linear até à rotura e que fornecem um confinamento passivo às colunas de betão, na medida em que apenas são ativados quando ocorre expansão lateral do betão.

Pela análise dos resultados experimentais de Paula (2003), verificou-se que um adequado sistema de confinamento com mantas de CFRP permite aumentar significativamente a tensão e a respetiva extensão de rotura do betão à compressão. Os níveis de tensão atingidos dependem da geometria da secção transversal, salientando-se que, independentemente deste parâmetro, a correspondente extensão axial é sempre muito superior à extensão de rotura dos modelos sem confinamento, o que resulta num aumento significativo da ductilidade dos elementos estruturais.

Os ensaios experimentais mostram claramente que o confinamento em pilares com secção circular apresenta um resultado superior (valores de tensão e extensão axial na rotura mais elevados), quando comparados com colunas de secção retangular, e que existe uma evidente influência na relação R/D. Quanto maior for esta relação, maiores são os valores de tensão axial atingidos.

Os resultados experimentais de Paula (2003) e Rocca (2007) foram comparados com os diagramas de tensão-extensão obtidos com os modelos de Manfredi e Realfonzo (2001) e de Wei e Wu (2011), concluindo-se que, em geral, estes modelos representaram relativamente bem o traço

inicial dos diagramas, dado que dependem unicamente das características do betão não confinado. As principais diferenças verificam-se no andamento do segundo troço do diagrama e nos valores de tensão e extensão de rotura do betão confinado.

Na sequência desta correlação de resultados, verificou-se que, apesar de subestimar os valores da tensão axial em pilares com secção circular, o modelo que melhor representa o comportamento do betão confinado sujeito a compressão monotónica, neste caso, é o proposto por Manfredi e Realfonzo (2001). No entanto, este modelo não considera a contribuição das armaduras transversais de aço, pelo que a subestimação de resultados poderá estar associada a este facto. Dos resultados obtidos nos pilares com secção quadrada, e tendo em consideração a dificuldade associada à quantificação de parâmetros associados ao seu comportamento, verifica-se que as curvas dos diagramas com o modelo de Manfredi e Realfonzo (2001) simulam muito bem o efeito do boleamento, observando-se um aumento dos valores de tensão e extensão na rotura com o aumento deste parâmetro. No que concerne à correlação de resultados realizada para as colunas com secção retangular, verificou-se que o modelo de Manfredi e Realfonzo (2001), apesar de sobrestimar os valores de tensão-extensão axial, permite uma melhor estimativa do comportamento do betão confinado quando comparado ao modelo de Wei e Wu (2011), em que a sua aplicação é direta. O modelo representa uma curva semelhante ao andamento observado nos resultados experimentais.

A análise paramétrica consistiu na avaliação da influência do boleamento de arestas em pilares com secção quadrada e retangular, com cantos arredondados de 2.0 a 5.5 cm, no número de camadas de CFRP em pilares com secção transversal circular, quadrada e retangular, com uma variação de três a nove camadas, na geometria da secção transversal dos pilares e ainda no confinamento parcial em pilares com secção transversal circular.

De acordo com os resultados obtidos com os modelos analíticos de confinamento, apresentados em 5.3.1, e à semelhança dos resultados experimentais analisados anteriormente, verificou-se ser possível aumentar a tensão de rotura das secções quadradas e retangulares, efetuando um adequado boleamento dos cantos dessas secções, sendo que o aumento é tanto maior quanto maior o raio de canto aplicado. No entanto, ressalva-se que não se justificará o aumento do raio de canto a partir de um determinado ponto, dado que, nesse caso, existem implicações construtivas, nomeadamente a existência de armaduras longitudinais. Observa-se, com efeito, uma influência na relação R/D, na medida em que quanto maior for esta relação maiores são os efeitos do confinamento. À medida que esta relação aumenta, o segundo troço do diagrama pode passar de uma curva descendente para uma curva ascendente, sendo este efeito mais significativo em secções quadradas, comparativamente às secções retangulares.

Conclui-se ainda que a eficácia do confinamento pode aumentar com um aumento do número de camadas de CFRP no elemento vertical. No entanto, verifica-se que acima de seis camadas de CFRP, nas condições consideradas, os benefícios são diminutos, quer a nível de capacidade de carga do elemento, quer a nível de ductilidade. À semelhança do que se verifica para um adequado boleamento das secções, o aumento dos valores de tensão e extensão na rotura são mais significativos em secções quadradas. Importa ainda mencionar que se verificou nesta análise que,

com um aumento do número de camadas, o segundo troço do diagrama do betão confinado em secções retangulares torna-se ascendente. O mesmo não se verifica apenas com um aumento do boleamento das arestas neste tipo de secção.

Da análise da geometria das secções transversais, verifica-se que os pilares com secção circular são os que registam o maior aumento da tensão máxima de compressão, enquanto os modelos de secção retangular registam o menor aumento dessa tensão. Novamente, e com base no mencionado anteriormente, verifica-se que a relação R/D assume grande importância no efeito do confinamento de pilares de betão, sendo o confinamento mais eficaz quanto maior for esta relação.

No que se refere à utilização de um confinamento parcial em alternativa a um confinamento total do elemento, verifica-se que, apesar de a sua utilização aumentar os valores de tensão e extensão axial, os mesmos valores são maiores quando é aplicado um sistema de confinamento total do elemento. No entanto, a sua aplicação é viável, sendo tanto melhor quanto maior o número de faixas ao longo da altura do pilar, bem como com um menor espaçamento livre entre as faixas de CFRP. Associado ao confinamento parcial, é também de grande importância a disposição das armaduras transversais, que conferem algum confinamento ao elemento.

6.2. Trabalhos Futuros

Relativamente a desenvolvimentos futuros, e na sequência do trabalho desenvolvido na presente dissertação, sugere-se:

- análise e implementação de outros modelos analíticos, que considerem explicitamente a relação tensão-extensão lateral, e que incluam a contribuição de armaduras transversais de aço, para além das longitudinais, tal como é, por exemplo, o caso dos modelos propostos por Chastre e Silva (2010) e Faustino, Chastre e Paula (2014). Este último, validado por comparação com resultados experimentais em pilares de grandes dimensões;
- realização de ensaios experimentais e análise de modelos capazes de prever o comportamento de pilares parcialmente confinados, aplicáveis a secções transversais quadradas e retangulares, com um mais abrangente intervalo no que toca ao valor da tensão de compressão do betão não confinado, uma vez que no presente trabalho são avaliadas apenas secções circulares com tensões de compressão do betão confinado entre 16 e 32 MPa;
- será também pertinente avaliar o comportamento de pilares de betão confinados com mantas de fibras de carbono sujeitos a ações cíclicas.

7. Referências Bibliográficas

- American Concrete Institute (ACI) Committee (2002) – “*Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*”, ACI 440.2R-02. Farmington Hills, Mich.
- Appleton, J. (2010, Abril). *Reabilitação de Edifícios Antigos e Sustentabilidade*. Trabalho apresentado no VI Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Civil.
- Appleton, J. & Gomes, A. (1997). Reforço de estruturas de betão armado por adição de armaduras exteriores. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estrutura (RPEE)*, 41, 15-20.
- Barros, J. A. O. (2007). *Materiais Compósitos no Reforço de Estruturas de Betão – Parte I: Propriedades e Técnicas*. Research Group on Composite Materials for Structural Strengthening and Fiber Reinforced Concrete, Universidade do Minho.
- Brás, M. F. P. (2013). *Reabilitação Estrutural de Edifícios Escolares: Estudo de soluções de reforço estrutural implementadas em duas escolas industriais* (Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal).
- Braga, A. (2005). *Reforço de pilares de betão simples com mantas de CFRP-influência do diâmetro do pilar, das características do betão existente e da quantidade de fibras no efeito de confinamento*. (Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal).
- Carrazedo, R. (2002). *Mecanismos de Confinamento e suas Implicações no Reforço de Pilares de Concreto por Encamisamento com Compósito de Fibras de Carbono* (Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil).
- Chastre, C. & Silva, M. A. G. (2010). Monotonic axial behavior and modeling of RC circular columns confined with CFRP. *Engineering Structures*, 32, 2268-2277.
- Chen, Q., Shin, M., & Andrawes, B. (2014). Experimental study of non-circular concrete elements actively confined with shape memory alloy wires. *Construction and Building Materials* 61, 303-311.
- Cladera, A., Weber, B., Leinenbach, C., Czaderski, C., Shahverdi, M., & Motavalli, M. (2014). Iron-based shape memory alloys for civil engineering structures: An overview. *Construction and Building Materials* 63, 281-293.
- Correia, J. R. (2012). Compósitos de Matriz Polimérica. Em M. C. Gonçalves, & F. Margarido, *Ciência e Engenharia de Materiais de Construção* (pp. 573 – 631). Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- Costa, A. G. C. & Juvandes, L. F. P. (2002, Abril). *Reforço e Reabilitação de Estruturas – Módulo 2*. Trabalho apresentado na Formação Profissional – Ordem dos Engenheiros, Secção Regional da Madeira.
- Costa, R. (2009). *Durabilidade de perfis pultrudidos de poliéster reforçado com fibras de vidro (GFRP)*. (Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal).

- Custódio, J. (2012). Colas Estruturais. Em M. C. Gonçalves, & F. Margarido, *Ciência e Engenharia de Materiais de Construção* (pp. 813 – 890). Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- Dolce, M., Cardone, D., Marnetto, R. (2000). Implementation and testing of passive control devices based on shape memory alloys. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 29, 945-968.
- Faustino, P. M. & Chastre, C. (2015). Analysis of load-strain models for RC square columns confined with CFRP. *Composites Part B*, 74, 23-41.
- Faustino, P. M., Chastre, C. & Paula, R. (2014). Design model for square RC columns under compression confined with CFRP. *Composites Part B*, 57, 187-198.
- Fardis, M. N. & Khalili, H. (1981). Concrete encased in fiber glass reinforced plastic. *ACI Structural Journal*, 78(6), 440-6.
- Fardis, M. N. & Khalili, H. (1982). FRP-encased concrete as a structural material. *Magazine of Concrete Research*, 34(121), 191-202.
- Fédération Internationale du Béton (FIB). (2001). Externally bonded FRP reinforcement fo RC structures. *Bulletin No. 14, Technical Rep.*, Lausanne, Switzerland.
- Ferreira, D. R. S. M. (2007). *Confinamento de Elementos de Pilar de Betão de Secção Circular com Manta de CFRP – Investigação Experimental e Analítica* (Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Minho, Portugal).
- Fiorelli, J. (2002). *Utilização de fibras de carbono e de fibras de vidro para reforço de vigas de madeira* (Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil).
- Gomes, A., & Appleton, J. (1997). Reforço de Estruturas de Betão Armado por Encamisamento das Secções. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas (RPEE)*, 42, 7-14.
- Harajli, M. H. (2006). Axial stress-strain relationship for FRP confined circular and rectangular concrete columns. *Journal Cement & Concrete Composites*, 28, 938-948.
- Harajli, M. H., Hantouche, E., & Soudki, K. (2006). Stress-strain model for fiber-reinforced polymer jacket concrete columns. *ACI Structural Journal*, 103(5), 672-682.
- Ilki, A. Peker, O., Karamuk, E. Demir, C. & Kumbasar, N. (2008). FRP retrofit of low and medium strength circular and rectangular reinforced concrete columns. *Journal Mater Civil Engineering*, 20(2), 169-88.
- Janke, L., Czaderski, C., Motavalli, M. & Ruth, J. (2005). Applications of shape memory alloys in civil engineering structures – Overview, limits and new ideas. *Materials and Structures*, 38, 578-592.
- Juandes, L. F. P. (1999). *Reforço e Reabilitação de Estruturas de Betão Usando Materiais Compósitos de “CFRP”* (Dissertação de Doutoramento, Universidade do Porto – Faculdade de Engenharia, Porto, Portugal).
- Krstulovic-Opara, N., & Thiedeman, P. D. (2000). Active confinement of concrete members with self-stressing composites. *ACI Materials Journal*, 97(3), 297-308.
- Lam, L., & Teng, J. G. (2003). Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete. *Construction and Building Materials*, 17(6), 471-489.

- Lam, L., & Teng, J. G. (2004). Ultimate condition of fiber reinforced polymer-confined concrete. *Journal of Composites for Construction*, 11(2), 201-210.
- Lobo, P. S., Almeida, J., & Guerreiro, L. (2015). Shape memory alloys behaviour: A review. *Procedia Engineering* 114, 776-783.
- Luca, L. C. S. (2006). *Cisalhamento em Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibras de Carbono: Avaliação de Critérios de Projeto* (Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil).
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., & Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 144(8), 1804-1826.
- Manfredi, G. & Realfonzo, R. (2001, Março). Models of Concrete by Fiber Composites. FRPRCS-154, 1-11.
- Matthys, S. (2000). *Structural Behavior and Design of Concrete Members Strengthened with Externally Bonded FRP Reinforcement*. Ghent University, Dep. Of Structural Engineering.
- Matthys, S., Toutanji, H., & Taerwe, L. (2006). Stress-Strain Behavior of Large-Scale Circular Columns Confined with FRP Composites. *Journal of Structural Engineering*, 132, 123-133.
- Mirmiran, A., & Shahawy, M. (1997). Behavior of concrete columns confined by fiber composites. *Journal of Structural Engineering*, 123(5), 583-590.
- Moreira, A. M. (2009). *Materiais Compósitos [Notas de Aulas]*. Tomar, Portugal: Instituto Politécnico de Tomar.
- Otsuka, K. & Ren, X. (2005). Physical metallurgy of Ti-Ni-based shape memory alloys. *Progress in Materials Science* 50, 511-678.
- Pantazopoulou, S. J., & Mills, R. H. (1995). Microstructural Aspects of the mechanical response of plain concrete. *ACI Materials Journal*, 92, 605-616.
- Paula, R. F., & Silva, M. G. (2002). Sharp edge effects on FRP confinement of RC square columns. ICCI 02-third international conference on composites in infrastructure.
- Paula, A. R. F. R. (2003). *Influência da Geometria das Seções no Confinamento de Pilares de Betão Armado com Compósitos de CFRP* (Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal).
- Pereira, B. M. G. (2012). *Modelos Analíticos para a Previsão do Desempenho de Pilares Confinados com Fibras de Carbono* (Relatório Final de Mestrado, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal).
- Pinheiro, L. M., Muzardo, C. D., & Santos, S. P. (2004, Março). Estruturas de Concreto – Capítulo 2 [Notas de Aula]. USP – EESC: Departamento de Engenharia de Estruturas.
- Popovics, S. (1973). Numerical approach to the complete stress-strain relation for concrete. *Cement and Concrete Research*, 3(5), 583-599.
- Richart, R. M., & Abbott, B. J. (1975). Versatile elastic-plastic stress-strain formula. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, 101(4), 511-5.
- Richart, F. E., Brandtzaeg, A., & Brown, R. L. (1928, November). A study of the Failure of Concrete Under Combined Compressive Stresses. *Bulletin No. 185, Engineering Experiment Station*, University of Illinois, Urbana.

- Rocca, S., Galati, N., & Nanni, A. (2006). *Experimental evaluation of FRP strengthening of large size reinforced concrete columns*. Center for Infrastructure Engineering Studies (CIES), Rep. No. 06-63, University of Missouri-Rolla, Rolla.
- Rocca, S. (2007). *Experimental and analytical evaluation of FRP-confined large size reinforced concrete columns* (PhD Thesis. University of Missouri-Rolla).
- Rochette, P. F. & Labossiere, P. (1996). Confinement of Concrete Cylinders with CFRP. *Proceedings of the First International Conference on Composites for Infrastructure*, Arizona, U.S.A., 829-841.
- Rochette, P. F. & Labossiere, P. (2000). Axial testing of rectangular column models confined with composites. *Journal of Composites for Construction*, 11(2).
- Rodrigues, C. M. C. (2005). *Comportamento às Ações Cíclicas de Pilares de Betão Armado Reforçados com Materiais Compósitos* (Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia/Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal).
- Saafi, M., Toutanji, H., & Zongjin, L. (1999). Behavior of concrete columns confined with fiber reinforced polymer tubes. *ACI Materials Journal*, 96(4), 500-509.
- Sadeghian, P. & Fam, A. (2015). Improved design-oriented confinement models for FRP-wrapped concrete cylinders based on statistical analyses. *Engineering Structures*, 87, 162-182.
- Samaan, M., Mirmiran, A., & Shahawy, M. (1998). Model of concrete confined by fiber composites. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 124(9), 1025-1031.
- Silva, J. F. M. G. (2005). *Pré-Impregnados de Matriz Termoplástica: Fabrico e Transformação por Compressão a Quente e Enrolamento Filamentar* (Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia do Porto/Universidade do Porto, Porto, Portugal).
- Silva, A. D. L. (2013). *Reforço de Estruturas de Betão Armado com CFRP* (Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal).
- Slater, S. E. (2008). *Development of a Rapid Design Procedure for Emergency Repairo f Bridge Columns Using Fiber-Reinforced Polymers* (Thesis submitted for Master of Science, University of California, San Diego).
- Spoelstra, M. R., & Monti, G. (1999). FRP-Confined Concrete Model. *Journal of Composites for Construction*, 143-150.
- Sudano, A. L., & Hanai, J. B. (2007). Distribuição da pressão de confinamento em pilares de concreto encamisados com polímeros reforçados com fibras de carbono. *Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural*, 4(1), 45-60.
- Toutanji, H. A. (1999). Stress-Strain Characteristics of Concrete Columns Externally Confined with Advanced Composite Sheets. *ACI Materials Journal*, 96(3), 397-404.
- Varma, R. K. (2012). *Numerical models for the simulation of the cyclic behavior of RC structures incorporating new advanced materials* (Tese de Doutoramento, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Minho, Portugal).
- Wei, Y. & Wu, Y. (2011). Unified stress-strain model of concrete for FRP-confined columns, *Construction and Building Materials* 26, 381-392.

- Wu, Y. F., & Wang, L. M. (2009). Unified strength model for square and circular concrete columns confined by external jacket. *Journal of Structural Engineering*, 135(3), 253-61.
- Wu, G. Wu, Z. S., & Lu, Z. T. (2007). Design-oriented stress-strain model for concrete prisms confined with FRP composites. *Construction and Building Materials*, 21, 1107-1121.
- Youssef, M. N., Feng, M. Q., & Mosallam, A. S. (2007). Stress-strain model for concrete confined by FRP composites. *Composites: Part B*, 38, 614-628.