

**Universidade do Minho**

Escola de Engenharia

Débora Rodrigues de Sousa Macanjo Ferreira

**Confinamento de Elementos de Pilar de  
Betão de Secção Circular com Manta de  
CFRP – Investigação Experimental e  
Analítica**

Tese de Doutoramento

Grau de Doutor em Engenharia Civil

Área de Conhecimento em Estruturas

Trabalho efectuado sob a orientação de

**Professor Doutor Joaquim António Oliveira de Barros**

Novembro de 2007

## DECLARAÇÃO

Nome: **Débora Rodrigues de Sousa Macanjo Ferreira**

Endereço electrónico: **debora@ipb.pt** Telefone: 273 303061

Número do Bilhete de Identidade: **10430272**

Título: **Confinamento de Elementos de Pilar de Betão de Secção Circular com Mantas de CFRP - Investigação Experimental e Analítica**

Orientador:

**Professor Doutor Joaquim António Oliveira de Barros**

Ano de conclusão: **2007**

Designação do Ramo de Conhecimento do Doutoramento:

**Doutor em Engenharia Civil**

**Área de Conhecimento em Estruturas**

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE/TRABALHO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, **01/ 11 / 2007**

Assinatura: \_\_\_\_\_

## **AGRADECIMENTOS**

---

Esta tese foi desenvolvida no Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Universidade do Minho, estando integrada num projecto de investigação envolvendo a aplicação de materiais compósitos de fibras de carbono no reforço de elementos estruturais. A parte experimental deste trabalho foi realizada com o apoio do Laboratório Estruturas (LEST) da Universidade do Minho e do laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais (LERM) do Instituto Politécnico de Bragança. A estas instituições agradeço os meios colocados à minha disposição para a elaboração da tese.

Agradeço o financiamento pelo PRODEP acção 5.3/N/199.014/01 da medida 5 de doutoramento.

Ao Prof. Joaquim Barros, orientador científico deste trabalho, manifesto um especial agradecimento pelo apoio constante, pelos ensinamentos prestados, pelo rigor científico e pela amizade demonstrada.

Ao Sr. Matos e ao Marco, técnicos do Laboratório de Engenharia Civil, da Universidade do Minho, os meus sinceros agradecimentos pela ajuda prestada, pelo interesse demonstrado na realização do trabalho e pela amizade dispendida.

Aos técnicos dos Laboratório Materiais de Construção e de Estruturas e Resistência dos Matérias, do Instituto Politécnico de Bragança, estou grata pela ajuda prestada na realização dos provetes de betão e dos ensaios de caracterização da manta de CFRP.

Deixo expresso o meu reconhecimento a todos os meus colegas de trabalho da Escola Superior de Tecnologia e de Gestão, que de algum modo contribuíram para a realização desta tese.

À direcção da Escola Superior de Tecnologia e de Gestão e do Instituto Politécnico de Bragança, deixo o meu agradecimento pelo apoio que sempre manifestaram para a realização deste trabalho.

Agradeço a colaboração prestada pelas empresas: *degussa* (na pessoa do Eng<sup>o</sup> Henrique Recto) e S&P, pelo fornecimento das mantas de CFRP e das resinas. À Sika (na pessoa da Dr<sup>a</sup>. Nidia), pelo fornecimento do ICOSIT K101. Ao INESC (na pessoa do Eng<sup>o</sup> Francisco Araújo) e FiberSensing, na colagem dos extensómetros de fibra óptica.

À Luisa Cordeiro o meu agradecimento pela preciosa ajuda na revisão do texto.

Por último o meu maior agradecimento vai para a minha família, pela paciência e compreensão que todos demonstraram ao longo destes anos.

À minha filha, Carolina e ao meu marido, Nuno dedico esta tese.

#### **Apoio Financeiro:**

Trabalho de investigação co-financiado pelo Fundo Social Europeu, através do Programa de Desenvolvimento Educativo para Portugal, Medida 5 / Acção 5.3 – Formação Avançada de Docentes do Ensino Superior, e pela Escola Superior de Tecnologia e de Gestão do Instituto Politécnico de Bragança.



## RESUMO

Confinamento de elementos de pilar de betão de secção circular com manta de CFRP  
– Investigação experimental e analítica

A preocupação com a vulnerabilidade sísmica dos edifícios é um tema que vem merecendo preocupação crescente, dada a natureza catastrófica que tem uma ocorrência sísmica de elevado amplitude, quer em termos de dimensão humana como material. Para minimizar os riscos sísmicos sobre a segurança das pessoas e da economia em geral, torna-se indispensável proceder ao reforço das construções mais vulneráveis.

Podendo, de forma simplificada, considerar-se a acção sísmica como de carácter cíclica, e sendo os pilares elementos fulcrais na garantia da estabilidade global de uma estrutura porticada de betão armado, será de todo interesse estudarem-se os benefícios proporcionados por sistemas de reforço que aumentem a capacidade de absorção de energia deste tipo de elementos, quando submetidos a acções cíclicas.

É objectivo deste trabalho o estudo de sistemas de confinamento constituídos por manta de fibra de carbono (CFRP) envolvendo toda a superfície exterior do elemento ou apenas certas partes deste. Ao primeiro sistema atribuiu-se a designação de “sistema de confinamento contínuo”, enquanto ao segundo sistema, constituído por faixas de manta de CFRP, foi dada a designação de “sistema de confinamento discreto”.

O aumento da capacidade de carga e de absorção de energia de elementos de betão confinados com sistemas de CFRP é influenciado por diversos parâmetros, nomeadamente, a resistência do betão, a percentagem de CFRP, a configuração geométrica dos sistemas de confinamento, entre outros. A avaliação qualitativa e quantitativa da influência dos parâmetros admitidos como mais significativos para o fenómeno em estudo foi efectuada no âmbito do presente trabalho. Para tal, elementos de pilar foram submetidos a carregamentos monotónicos e cíclicos de compressão.

Especial enfoque foi dado na avaliação da eficácia dos sistemas de reforço adoptados, quando aplicados a elementos de pilar submetidos a carregamentos monotónicos de compressão, dado existir, à data do início do presente trabalho, alguma investigação indiciando que a envolvente da resposta cíclica tensão-extensão nos elementos de pilar poderia ser razoavelmente simulada pela resposta monotónica em homólogos elementos. Faz ainda parte deste trabalho o desenvolvimento de um modelo analítico para simular o comportamento à compressão monotónica de provetes de betão armado, de secção circular, confinados parcial e totalmente com CFRP.

## ABSTRACT

---

Confinement of concrete column elements of circular cross section with CFRP sheets  
– Experimental and analytical research

The preoccupation with the seismic vulnerability of buildings is a subject that has been deserving an increasing attention given the catastrophic nature that a seismic incident of high amplitude has, both in terms of human and material dimension. To minimize the seismic risks on the security of the persons and of the economy in general, it is essential to proceed with the strengthening of the most vulnerable constructions.

Preserve the resistance and ductility of concrete columns is fundamental to assure the stability of frame RC structures, mainly when subjected to a seismic event. Since the seismic action can be assumed, in a simplified way, as a cyclic loading, it is opportune to assess the benefits that distinct strengthening systems can provide in terms of the load carrying and the energy absorption capacities of these structural elements, when submitted to cyclic loading.

The goal of this research is the study of concrete columns' confinement systems with strips of wet lay-up carbon fibre reinforced polymer sheets (CFRP) or full confinement. The first system was named "partial confinement", while the second system was designated as "full confinement".

The increase of the load and energy absorption ability of concrete elements when confined with CFRP is influenced by several parameters, namely, the concrete strength, the percentage of CFRP and the geometrical configuration of the confinement systems. In the ambit of the present work, it was carried the qualitative and quantitative evaluation of these parameters' influence, admitted as the most important in the phenomenon's study.

For this purpose, columns' elements were submitted to monotonic and cyclic compressive loading. Special attention was given to the evaluation of the confinement systems' efficacy, when applied to column's elements that were submitted to monotonic and cyclic compressive loading, once, in general, the stress-strain curve corresponding to the monotonic test can be considered to envelop the curve of the cyclic test. An analytical model was also developed to simulate the compressive stress-strain relationship of concrete columns confined by discrete and continuous CFRP arrangements.

## **PALAVRAS CHAVE**

---

Pilares de betão armado

Confinamento contínuo

Confinamento discreto

Configurações de Confinamento

CFRP

Carregamentos monotónicos de compressão

Carregamentos cíclicos de compressão



## **KEY WORDS**

---

Reinforced concrete columns

Full confinement

Partial confinement

Confinement arrangements

CFRP

Monotonic compressive loading

Cyclic compressive loading



---

# ÍNDICE

---

<b>Agradecimentos</b>	<b>i</b>
<b>Resumo</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract</b>	<b>v</b>
<b>Palavras-chave</b>	<b>vii</b>
<b>Key words</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xxi</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>xxiii</b>
<b>1. Introdução</b>	
1.1 Considerações iniciais.....	1
1.2 Reforço de estruturas.....	2
1.3 Objectivos da tese.....	3
1.4 Organização da tese.....	4
<b>2. Caracterização dos materiais e técnicas de confinamento</b>	
2.1 Betão.....	7
2.2 Mantas de CFRP.....	8
2.2.1 Ensaios experimentais das mantas de CFRP.....	8
2.3 Aço.....	11
2.4 Preparação dos provetes.....	13
<b>3. Programa experimental e instrumentação</b>	
3.1 Sistemas de confinamento e séries de ensaios.....	17
3.1.1 Geometria dos provetes.....	17
3.1.2 Parâmetros avaliados.....	17
3.2 Equipamento e procedimentos de ensaio.....	30
3.3 Instrumentação.....	32
<b>4. Selecção de sistemas de confinamento efectivo</b>	
4.1 Ensaios do grupo C23S300.....	35

4.2 Ensaio do grupo C23S200.....	41
4.3 Ensaio do grupo C16S200.....	43
4.4 Ensaio do grupo C16S300.....	44
<b>5. Confinamento de elementos de pilar submetidos à compressão monotónica</b>	
5.1 Ensaio do grupo C16S200φ8.....	47
5.1.1 Curvas tensão versus extensão e síntese dos resultados mais relevantes.....	47
5.1.2 Curvas $\sigma_c/f_{co}$ versus $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$ .....	51
5.1.3 Relação entre $\sigma_c/f_{co}$ e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ).....	53
5.1.4 Relação entre a variação de energia ( $\Delta U/U_c$ ) e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ).....	54
5.2 Ensaio do grupo C16S200Φ10.....	55
5.2.1 Curvas tensão versus extensão e síntese dos resultados mais relevantes.....	56
5.2.2 Curvas $\sigma_c/f_{co}$ versus $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$ .....	58
5.2.3 Relação entre $\sigma_c/f_{co}$ e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ).....	59
5.2.4 Relação entre a variação de energia ( $\Delta U/U_c$ ) e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ).....	60
5.3 Ensaio do grupo C16S300Φ8.....	61
5.3.1 Curvas tensão versus extensão e síntese dos resultados mais relevantes.....	62
5.3.2 Curvas $\sigma_c/f_{co}$ versus $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$ .....	64
5.3.3 Relação entre $\sigma_c/f_{co}$ e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ).....	65
5.3.4 Relação entre a variação de energia ( $\Delta U/U_c$ ) e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ).....	66
5.4 Ensaio do grupo C16S300φ10.....	67
5.4.1 Curvas tensão versus extensão e síntese dos resultados mais relevantes.....	67
5.4.2 Curvas $\sigma_c/f_{co}$ versus $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$ .....	70
5.4.3 Relação entre $\sigma_c/f_{co}$ e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ).....	71
5.4.4 Relação entre a variação de energia ( $\Delta U/U_c$ ) e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ).....	72
5.5 Modos de rotura típicos dos provetes C16/20.....	73
5.6 Síntese das principais observações registadas nos provetes C16/20.....	75
5.7 Ensaio do grupo C32S200φ8.....	75
5.7.1 Curvas tensão versus extensão e síntese dos resultados mais relevantes.....	76
5.7.2 Curvas $\sigma_c/f_{co}$ versus $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$ .....	78
5.7.3 Relação entre $\sigma_c/f_{co}$ e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ).....	79
5.7.4 Relação entre a variação de energia ( $\Delta U/U_c$ ) e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ).....	80
5.8 Ensaio do grupo C32S200φ10.....	80
5.8.1 Curvas tensão versus extensão e síntese dos resultados mais relevantes.....	81
5.8.2 Curvas $\sigma_c/f_{co}$ versus $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$ .....	84
5.8.3 Relação entre $\sigma_c/f_{co}$ e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ).....	86

5.8.4 Relação entre a variação de energia ( $\Delta U/U_c$ ) e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ).....	86
5.9 Ensaio do grupo C32S300 $\phi$ 8.....	87
5.9.1 Curvas tensão versus extensão e síntese dos resultados mais relevantes.....	87
5.9.2 Curvas $\sigma_c/f_{co}$ versus $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$ .....	90
5.9.3 Relação entre $\sigma_c/f_{co}$ e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ).....	91
5.9.4 Relação entre a variação de energia ( $\Delta U/U_c$ ) e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ).....	91
5.10 Ensaio do grupo C32S300 $\phi$ 10.....	92
5.10.1 Curvas tensão versus extensão e síntese dos resultados mais relevantes.....	92
5.10.2 Curvas $\sigma_c/f_{co}$ versus $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$ .....	95
5.10.3 Relação entre $\sigma_c/f_{co}$ e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ).....	96
5.10.4 Relação entre a variação de energia ( $\Delta U/U_c$ ) e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ).....	96
5.11 Modos de rotura típicos dos provetes C30/35.....	97
5.12 Síntese das principais observações registadas nos provetes C30/35.....	98
5.13 Influência do tipo de betão na eficácia do confinamento.....	99
5.14 Influência do tipo de manta na eficácia do confinamento.....	101
5.15 Influência da percentagem de armadura longitudinal na eficácia do confinamento.....	103
<b>6. Confinamento de elementos de pilar de betão armado submetidos à compressão cíclica</b>	
6.1 Introdução .....	107
6.2 Séries de ensaios e sistemas de confinamento .....	108
6.3 Procedimento de ensaio e monitorização .....	109
6.4 Apresentação e discussão dos resultados.....	110
6.4.1 Modos de rotura.....	110
6.4.2 Extensões ao longo do provete.....	112
6.4.3 Síntese dos resultados mais relevantes.....	114
<b>7. Modelo analítico de pilares reforçados com CFRP</b>	
7.1 Introdução .....	121
7.2 Modelo proposto.....	122
7.3 Comparação com modelos de outros autores.....	133
<b>8. Conclusões</b>	
8.1 Ensaio da primeira fase do programa experimental.....	135
8.2 Ensaio da segunda fase do programa experimental.....	136
8.2.1 Modos de rotura.....	136
8.2.2 Incremento da capacidade de carga proporcionada pelo CFRP.....	136
8.2.3 Índice de ductilidade.....	137
8.2.4 Incremento da capacidade de absorção de energia proporcionada pelo CFRP.....	137
8.2.5 Influência do tipo de betão na eficácia do confinamento.....	138
8.2.6 Influência do tipo de manta na eficácia do confinamento.....	138
8.2.7 Influência da percentagem de armadura longitudinal na eficácia do confinamento.....	138

8.2.8 Influência do numero de camadas da CFRP na eficácia do confinamento.....	139
8.3 Sistemas de confinamento discretos em comparação com os sistemas de confinamento contínuos.....	141
8.4 Ensaio da terceira fase do programa experimental.....	141
8.5 Modelo analítico.....	142
8.6 Desenvolvimentos futuros.....	142
<b>A. Curvas tensão versus extensão nos varões de aço.....</b>	<b>143</b>
<b>B. Modos de rotura do provetes.....</b>	<b>153</b>
<b>C. Extensões axiais obtidas nos extensómetros de fibra óptica.....</b>	<b>173</b>
<b>Referência bibliográficas.....</b>	<b>187</b>

## Lista de Figuras

---

Figura 2.1 – Rolo de fibra de carbono .....	8
Figura 2.2 – Primário.....	8
Figura 2.3 – Resina epoxy.....	8
Figura 2.4 – Esquema dos provetes de CFRP ensaiados a tracção uniaxial.....	9
Figura 2.5 – Prensa servo-controlada, INSTRON modelo 4485.....	9
Figura 2.6 – Ensaio de tracção em provetes de manta de CFRP.....	9
Figura 2.7 – Aspecto do provete de CFRP após ter sido ensaiado.....	10
Figura 2.8 – Gráfico força versus deslocamento para a manta CF 120 (S&P) 240.....	11
Figura 2.9 - Gráfico força versus deslocamento para a manta CF 130 (S&P) 240.....	11
Figura 2.10 – Diagrama tensão-deformação do ensaio dos provetes de aço de $\phi 6$ .....	12
Figura 2.11 – Diagrama tensão-deformação do ensaio dos provetes de aço de $\phi 8$ .....	12
Figura 2.12 – Diagrama tensão-deformação do ensaio dos provetes de aço de $\phi 10$ .....	12
Figura 2.13 – Esquema das armaduras.....	13
Figura 2.14 – Execução das armaduras.....	13
Figura 2.15 – Betonagem dos provetes.....	14
Figura 2.16 – Rectificação do topo superior dos provetes.....	14
Figura 2.17 – Aplicação do reforço.....	15
Figura 3.1 – Sistema genérico de confinamento.....	18
Figura 3.2 – Fotos de alguns dos sistemas de confinamento adoptados na primeira fase do programa experimental.....	18
Figura 3.3 – Sistema genérico de confinamento da segunda fase do programa experimental.....	22
Figura 3.4 – Fotos de alguns dos sistemas de confinamento adoptados na segunda fase do programa experimental.....	23
Figura 3.5 – Sistema genérico de confinamento da terceira fase do programa experimental.....	29
Figura 3.6 – Prensa de compressão uniaxial utilizada no grupo de ensaios C23S300.....	30
Figura 3.7 – Bastidor de ensaios à compressão uniaxial utilizados nos grupos de ensaios C23S200, C16S200 e C16S300, e nos restantes provetes da 2 <sup>a</sup> e 3 <sup>a</sup> fases do programa experimental.....	30
Figura 3.8 – Posição dos 3 LVDTs.....	31
Figura 3.9 – Esquema do equipamento de ensaio.....	31
Figura 3.10 – Disposição dos extensómetros.....	32
Figura 3.11 – Aplicação dos extensómetros nas faixas de CFRP.....	32

Figura 3.12 – Disposição dos extensómetros de fibra óptica.....	33
Figura 3.13 – Aplicação dos extensómetros de fibra óptica às faixas de CFRP.....	34
Figura 4.1 – Curvas tensão versus extensão axial nas séries W15S1 e W15S5 do grupo C23S300.....	36
Figura 4.2 – Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries: W15S3; W30S3; W30S4; W45S4; W60S3; W300S1 do grupo C23S300.....	36
Figura 4.3 – Gráfico tipo tensão-extensão.....	37
Figura 4.4 – Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP para um provete tipo.....	39
Figura 4.5 – Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries: a) W45S4; b) W60S3; c)W300S1 do grupo C23S200.....	42
Figura 4.6 – Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries: a) W45S4; b) W60S3; c) W300S1 do grupo C16S200.....	43
Figura 4.7 – Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries: a) W45S4; b) W60S3; c) W300S1 do grupo C16S300.....	45
Figura 5.1 – Curvas tensão versus extensão axial para a série C16S200 $\phi$ 8.....	48
Figura 5.2 – Gráfico tipo tensão versus extensão nos varões de aço.....	50
Figura 5.3 – Curvas $\sigma_c/f_{co}$ versus $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$ nas séries de ensaios do grupo C16S200 $\phi$ 8.....	52
Figura 5.4 – Relação entre $\sigma_c/f_{co}$ e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) nas séries de ensaios do grupo C16S200 $\phi$ 8.....	53
Figura 5.5 – Representação para a determinação de $\Delta U$ .....	54
Figura 5.6 – Relação entre $\Delta U/U_c$ e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) nas séries de ensaio do grupo C16S200 $\phi$ 8.....	55
Figura 5.7 – Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries do grupo C16S200 $\phi$ 10.....	56
Figura 5.8– Curvas $\sigma_c/f_{co}$ versus $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$ nas séries de ensaios de grupo C16S200 $\phi$ 10.....	58
Figura 5.9 – Relação entre $\sigma_c/f_c$ e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) nas séries de ensaios do grupo C16S200 $\phi$ 10.....	60
Figura 5.10 – Relação entre ( $\Delta U/U_c$ ) e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) nas séries de ensaios de grupo C16S200 $\phi$ 10.....	61
Figura 5.11 – Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries do grupo C16S300 $\phi$ 8 .....	62
Figura 5.12 – Curvas $\sigma_c/f_{co}$ versus $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$ nas séries de ensaios do grupo C16S300 $\phi$ 8 ...	64
Figura 5.13 – Relação entre $\sigma_c/f_{co}$ e percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) nas séries de ensaios do grupo C16S300 $\phi$ 8.....	66
Figura 5.14 – Relação entre a variação de energia ( $\Delta U/U_c$ ) e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) nas séries de ensaios do grupo C16S300 $\phi$ 8 .....	67
Figura 5.15 – Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries do grupo C16S300 $\phi$ 10.....	68
Figura 5.16 - Curvas $\sigma_c/f_{co}$ versus $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$ para as séries do grupo C16S300 $\phi$ 10. ....	70
Figura 5.17 – Relação entre $\sigma_c/f_{co}$ e percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) para as séries do grupo C16S300 $\phi$ 10.....	71
Figura 5.18 – Relação entre a variação de energia ( $\Delta U/U_c$ ) e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) para as séries do grupo C16S300 $\phi$ 10.....	72
Figura 5.19– Modos de rotura dos provetes do grupo C16S200 $\phi$ 8.....	74
Figura 5.20 – Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries do grupo C32S200 $\phi$ 8.....	76

Figura 5.21 – Curvas $\sigma_c/f_{co}$ versus $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$ nas séries do grupo C32S200 $\phi$ 8.....	78
Figura 5.22 – Relação entre $\sigma_c/f_{co}$ e percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) nas séries do grupo C32S200 $\phi$ 8 .....	79
Figura 5.23 – Relação entre a variação de energia ( $\Delta U/U_c$ ) e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) nas séries do grupo C32S200 $\phi$ 8.....	80
Figura 5.24 - Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries do grupo C32S200 $\phi$ 10.....	81
Figura 5.25 – Curvas tensão versus extensão para o provete W45S5L3 do grupo C32S200 $\phi$ 10 (ver figura 3.12).....	83
Figura 5.26 - Curvas $\sigma_c/f_{co}$ versus $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$ para as séries do grupo C32S200 $\phi$ 10.....	85
Figura 5.27 - Relação entre $\sigma_c/f_{co}$ e percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) para as séries do grupo C32S200 $\phi$ 10.....	86
Figura 5.28 – Relação entre a variação de energia ( $\Delta U/U_c$ ) e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) para as séries do grupo C32S200 $\phi$ 10.....	86
Figura 5.29 – Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries do grupo C32S300 $\phi$ 8.....	88
Figura 5.30 – Curvas $\sigma_c/f_{co}$ versus $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$ para as séries do grupo C32S300 $\phi$ 8.....	90
Figura 5.31 – Relação entre $\sigma_c/f_{co}$ e percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) para as séries do grupo C32S300 $\phi$ 8.....	91
Figura 5.32 – Relação entre a variação de energia ( $\Delta U/U_c$ ) e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) para as séries do grupo C32S300 $\phi$ 8.....	92
Figura 5.33 – Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries do grupo C32S300 $\phi$ 10.....	93
Figura 5.34 – Curvas $\sigma_c/f_{co}$ versus $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$ para as séries do grupo C32S300 $\phi$ 10.....	95
Figura 5.35 – Relação entre $\sigma_c/f_{co}$ e percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) para as séries do grupo C32S300 $\phi$ 10.....	96
Figura 5.36 – Relação entre a variação de energia ( $\Delta U/U_c$ ) e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ).....	96
Figura 5.37– Modos de rotura dos provetes do grupo C16S200 $\phi$ 8.....	97
Figura 5.38 – Relação entre $\sigma_c/f_c$ e $\rho_f$ referente aos grupos de ensaios C16S200 $\phi$ 8 e C32S200 $\phi$ 8.....	99
Figura 5.39 – Relação entre $\Delta U/U_c$ referente aos grupos de ensaios C16S200 $\phi$ 8 e C32S200 $\phi$ 8 .....	100
Figura 5.40 – Relação entre $\sigma_c/f_c$ e $\rho_f$ referente aos grupos de ensaios C16S200 $\phi$ 8 e C16S300 $\phi$ 8.....	102
Figura 5.41 – Relação entre $\Delta U/U_c$ referente aos grupos de ensaios C16S200 $\phi$ 8 e C16S300 $\phi$ 8.....	102
Figura 5.42 – Relação entre $\sigma_c/f_c$ e $\rho_f$ referente aos grupos de ensaios C16S200 $\phi$ 8 e C16S200 $\phi$ 10.....	104
Figura 5.43 – Relação entre $\Delta U/U_c$ referente aos grupos de ensaios C16S200 $\phi$ 8 e C16S200 $\phi$ 10.....	105
Figura 6.1 – História de carga utilizada nos ensaios.....	109
Figura 6.2 – Modos de rotura dos provetes.....	111
Figura 6.3 – Extensões últimas no CFRP dos provetes.....	113
Figura 6.4 – Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP.....	116
Figura 6.5 – Módulo de deformabilidade para cada 3 ciclos de recarga e descarga.....	117
Figura 6.6 – Evolução da rigidez dos ramos de descarga e recarga registada nos ensaios	119

cíclicos.....	
Figura 6.7 – Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries com mesma percentagem de confinamento: W60L5 e W600L3.....	120
Figura 7.1 – Gráfico tensão versus extensão para o betão confinado com aço e com CFRP (Samaan et al. [1998]).....	122
Figura 7.2 – Modelo para a relação tensão - extensão proposto para o betão confinado com CFRP.....	123
Figura 7.3 – Variação do parâmetro de confinamento $k_1$ com a pressão lateral de confinamento para: (a) C16, (b) C32 .....	125
Figura 7.4 – Variação do parâmetro de confinamento $k_2$ com a extensão axial para.....	127
Figura 7.5 – Comparação entre os resultados experimentais e o modelo analítico para os provetes C16S200 $\phi$ 8: (a) W45L3, (b) W45L5, (c) W60L3, (d) W60L5, (e) W600L3, (f) W600L5 .....	129
Figura 7.6 – Comparação entre os resultados experimentais e o modelo analítico para os provetes C16S300 $\phi$ 8: (a) W45L3, (b) W45L5, (c) W60L3, (d) W60L5, (e) W600L3, (f) W600L5.....	129
Figura 7.7 – Comparação entre os resultados experimentais e o modelo analítico para os provetes C32S200 $\phi$ 8: (a) W45L3, (b) W45L5, (c) W60L3, (d) W60L5, (e) W600L3, (f) W600L5 .....	130
Figura 7.8 – Comparação entre os resultados experimentais e o modelo analítico para os provetes C32S300 $\phi$ 8: (a) W45L3, (b) W45L5, (c) W60L3, (d) W60L5, (e) W600L3, (f) W600L5 .....	130
Figura 7.9 – Comparação entre os resultados experimentais e o modelo analítico para os provetes C16S200 $\phi$ 10: (a) W45L3, (b) W45L5, (c) W60L3, (d) W60L5, (e) W600L3, (f) W600L5.....	131
Figura 7.10 – Comparação entre os resultados experimentais e o modelo analítico para os provetes C16S300 $\phi$ 10: (a) W45L3, (b) W45L5, (c) W60L3, (d) W60L5, (e) W600L3, (f) W600L5. ....	131
Figura 7.11 – Comparação entre os resultados experimentais e o modelo analítico para os provetes C32S200 $\phi$ 10: (a) W45L3, (b) W45L5, (c) W60L3, (d) W60L5, (e) W600L3, (f) W600L5.....	132
Figura 7.12 – Comparação entre os resultados experimentais e o modelo analítico para os provetes C32S300 $\phi$ 10: (a) W45L3, (b) W45L5, (c) W60L3, (d) W60L5, (e) W600L3, (f) W600L5.....	132
Figura 7.13 – Comparação do modelo proposto com os modelos apresentados por Lam&Teng e Triantafillou.....	133
Figura A. 1.1 – Curvas tensão versus extensão para a série do grupo C16S200 $\phi$ 8.....	145
Figura A. 1.2 – Curvas tensão versus extensão para a série do grupo C16S200 $\phi$ 10.....	146
Figura A. 1.3 – Curvas tensão versus extensão para a série do grupo C16S300 $\phi$ 8.....	147
Figura A. 1.4 – Curvas tensão versus extensão para a série do grupo C16S300 $\phi$ 10.....	148
Figura A. 2.1 – Curvas tensão versus extensão para a série do grupo C32S200 $\phi$ 8.....	149
Figura A. 2.2 – Curvas tensão versus extensão para a série do grupo C32S200 $\phi$ 10.....	150
Figura A. 2.3 – Curvas tensão versus extensão para a série do grupo C32S300 $\phi$ 8.....	151
Figura A. 2.4 – Curvas tensão versus extensão para a série do grupo C32S300 $\phi$ 10.....	152
Figura B. 1.1 – Esquema do modo de rotura dos provetes de betão simples.....	155
Figura B 1.2 – Esquema do modo de rotura dos provetes reforçados com	155

$\phi 8$ .....	
Figura B 1.3 – Esquema do modo de rotura dos provetes reforçados com $\phi 10$ .....	155
Figura B.2.1 – Esquema do modo de rotura das séries W45S6Ln.....	156
Figura B.2.2 – Esquema do modo de rotura das séries W60S6Ln.....	157
Figura B.2.3 – Esquema do modo de rotura das séries W600S1Ln.....	157
Figura B 3.1 – Esquema do modo de rotura das séries W45S5Ln.....	158
Figura B 3.2 – Esquema do modo de rotura das séries W60S5Ln.....	159
Figura B 3.3 – Esquema do modo de rotura das séries W600S1Ln.....	159
Figura B 4.1 – Esquema do modo de rotura das séries W45S6Ln.....	160
Figura B 4.2 – Esquema do modo de rotura das séries W60S6Ln.....	161
Figura B 4.3 – Esquema do modo de rotura das séries W600S1Ln.....	161
Figura B 5.1 – Esquema do modo de rotura das séries W45S5Ln.....	162
Figura B 5.2 – Esquema do modo de rotura das séries W60S5Ln.....	163
Figura B 5.3 – Esquema do modo de rotura das séries W600S1Ln.....	163
Figura B. 6.1 – Esquema do modo de rotura dos provetes de betão simples.....	164
Figura B 6.2 – Esquema do modo de rotura dos provetes reforçados com $\phi 8$ .....	164
Figura B 6.3 – Esquema do modo de rotura dos provetes reforçados com $\phi 10$ .....	164
Figura B 7.1 – Esquema do modo de rotura das séries W45S6Ln.....	165
Figura B 7.2 – Esquema do modo de rotura das séries W60S3Ln.....	166
Figura B 7.3 – Esquema do modo de rotura das séries W600S1Ln.....	166
Figura B 8.1 – Esquema do modo de rotura das séries W45S5Ln.....	167
Figura B 8.2 – Esquema do modo de rotura das séries W60S5Ln.....	168
Figura B 8.3 – Esquema do modo de rotura das séries W600S1Ln.....	168
Figura B. 9.1 – Esquema do modo de rotura das séries W45S6Ln.....	169
Figura B. 9.2 – Esquema do modo de rotura das séries W60S3Ln.....	170
Figura B. 9.3 – Esquema do modo de rotura das séries W600S1Ln.....	170
Figura B. 10.1 – Esquema do modo de rotura das séries W45S5Ln.....	171
Figura B. 10.2 – Esquema do modo de rotura das séries W60S5Ln.....	172
Figura B 10.3 – Esquema do modo de rotura das séries W600S1Ln.....	172
Figura C.1 – Proвете W45S5L3 do grupo C32S200 $\phi 10$ .....	175
Figura C.2 – Proвете W60S5L5 do grupo C32S200 $\phi 10$ .....	176
Figura C.3 – Proвете W60S6L3_1 do grupo C32S300 $\phi 8$ .....	177
Figura C.4 – Proвете W60S6L3_2 do grupo C32S300 $\phi 8$ .....	178
Figura C.5 – Proвете W600S1L3 do grupo C32S300 $\phi 8$ .....	179
Figura C.6 – Proвете W600S1L5 do grupo C32S300 $\phi 8$ .....	180
Figura C.7 – Proвете W45S5L5 do grupo C32S300 $\phi 10$ .....	181
Figura C.8 – Proвете W60S5L3 do grupo C32S300 $\phi 10$ .....	182
Figura C.9 – Proвете W60S5L5 do grupo C32S300 $\phi 10$ .....	183
Figura C.10 – Proвете W600S1L3 do grupo C32S300 $\phi 10$ .....	184
Figura C.11 – Proвете W600S1L5 do grupo C32S300 $\phi 10$ .....	185



## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Propriedades da manta de CFRP mediante ensaios de tracção uniaxial (média de 5 provetes).....	10
Tabela 2.2 – Propriedades da manta de CFRP segundo as fichas técnicas do distribuidor, degussa.....	10
Tabela 2.3 - Ensaios de caracterização das armaduras.....	11
Tabela 3.1 – Designação adoptada para os grupos de ensaios da primeira fase do trabalho experimental.....	19
Tabela 3.2 – Séries de ensaios do grupo C23S300.....	20
Tabela 3.3 – Séries de ensaios do grupo C23S200 e C16S200.....	21
Tabela 3.4 – Séries de ensaios do grupo C16S300.....	21
Tabela 3.5 – Designação adoptada para os grupos de ensaios da segunda fase do trabalho experimental.....	24
Tabela 3.6 – Campanha de ensaios para o grupo de séries de ensaio C16S200 $\phi$ 8.....	24
Tabela 3.7 – Campanha de ensaios para o grupo de séries de ensaio C16S200 $\phi$ 10.....	25
Tabela 3.8 – Campanha de ensaios para o grupo de séries de ensaio C16S300 $\phi$ 8.....	25
Tabela 3.9 – Campanha de ensaios para o grupo de séries de ensaio C16S300 $\phi$ 10.....	26
Tabela 3.10 – Campanha de ensaios para o grupo de séries de ensaio C32S200 $\phi$ 8.....	26
Tabela 3.11 – Campanha de ensaios para o grupo de séries de ensaio C32S200 $\phi$ 10...	27
Tabela 3.12 – Campanha de ensaios para o grupo de séries de ensaio C32S300 $\phi$ 8.....	27
Tabela 3.13 – Campanha de ensaios para o grupo de séries de ensaio C32S300 $\phi$ 10...	28
Tabela 3.14 – Campanha de ensaios cíclicos e monotónicos.....	29
Tabela 3.15 – Provetes instrumentados com extensómetros de fibra óptica.....	34
Tabela 4.1 – Indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento referentes ao grupo de ensaios C23S300.....	38
Tabela 4.2 – Indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento referentes ao grupo de ensaios C23S200.....	42
Tabela 4.3 – Indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento referentes ao grupo de ensaios C16S200.....	44
Tabela 4.4 – Indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento referentes ao grupo de ensaios C16S300.....	45
Tabela 5.1 – Indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento referentes ao grupo C16S200 $\phi$ 8.....	50

---

Tabela 5.2 – Indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento referentes ao grupo C16S200φ10.....	57
Tabela 5.3 – Indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento referentes ao grupo C16S300φ8.....	63
Tabela 5.4 – Indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento referentes ao grupo C16S300φ10.....	69
Tabela 5.5 – Indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento referentes ao grupo C32S200φ8.....	77
Tabela 5.6 – Indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento referentes ao grupo C32S200φ10.....	82
Tabela 5.7 – Extensões últimas registadas no CFRP referentes ao provete W45S5L3 do grupo C32S200φ10.....	84
Tabela 5.8 – Indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento referentes ao grupo C32S300φ8.....	89
Tabela 5.9 – Indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento referentes ao grupo C32S300φ10.....	94
Tabela 6.1 – Características das séries de ensaios.....	108
Tabela 6.2 – Valores dos indicadores de eficácia registados nos ensaios efectuados.....	114
Tabela 8.1 – Incremento da capacidade de carga entre provetes confinados com 3 e 5 camadas.	140
Tabela C.0 – Provede instrumentados com extensómetros de fibra óptica .....	175
Tabela C.1 – Provede W45S5L3 do grupo C32S200φ10.....	175
Tabela C.2 – Provede W60S5L5 do grupo C32S200φ10.....	176
Tabela C.3 – Provede W60S6L3_1 do grupo C32S300φ8.....	177
Tabela C.4 – Provede W60S6L3_2 do grupo C32S300φ8.....	178
Tabela C.5 – Provede W600S1L3 do grupo C32S300φ8.....	179
Tabela C.6 – Provede W600S1L5 do grupo C32S300φ8.....	180
Tabela C.7 – Provede W45S5L5 do grupo C32S300φ10.....	181
Tabela C.8 – Provede W60S5L3 do grupo C32S300φ10.....	182
Tabela C.9 – Provede W60S5L5 do grupo C32S300φ10.....	183
Tabela C.10 – Provede W600S1L3 do grupo C32S300φ10.....	184
Tabela C.11 – Provede W600S1L5 do grupo C32S300φ10.....	185

---

## Lista de Simbolos

---

### Notações

- $A_c$  – área da secção de betão
- $A_f$  – área da secção de betão efectivamente confinado
- $A_g$  – área total da secção de betão
- $A_{sl}$  – área total de armaduras longitudinais
- BS – betão simples
- CFRP – polímeros reforçados com fibras de carbono (carbon fiber reinforced polymers)
- $D$  – diâmetro da secção de betão
- $d_{st}$  – diâmetro dos estribos de aço
- $E_{ci}$  – módulo de elasticidade tangente do betão
- $E_f$  – módulo de elasticidade à tracção do CFRP
- $f_{cA}$  – tensão de compressão do betão no ponto A
- $f_{cc}$  – tensão máxima de compressão do betão confinado
- $f_{cm}$  – valor médio da tensão de rotura à compressão do betão em provetes cilíndricos
- $f_{co}$  – tensão máxima de compressão do betão não confinado
- $f_{fl}$  – tensão lateral de confinamento exercida pelo CFRP
- $f_l$  – tensão lateral de confinamento
- $f_{sl}$  – tensão lateral de confinamento exercida pelos estribos
- $H$  – altura do provete
- $k_1, k_2$  – coeficientes de confinamento
- $k_{2R}$  – valores de  $k_2$  obtidos para  $\varepsilon_f=0.3\%$
- $L_k$  – numero de camadas de CFRP por faixa
- LVDT – transdutor de deslocamentos (linear voltage displacement transformer)

- $s_f$  – espaço livre entre faixas de CFRP.
- $S_j$  – numero de faixas de CFRP ao longo do comprimento do provete
- SG – Strain gauge (extensómetros)
- $s_s$  – espaço livre entre os estribos de aço
- $t_f$  – espessura da manta de CFRP
- $U_{cc}$  – energia dissipada na fase de amolecimento do betão confinado
- $U_{co}$  – energia dissipada na fase de amolecimento do betão não confinado
- $W_i$  – Largura das faixas de CFRP
- $\varepsilon_c$  – extensão axial de compressão do betão
- $\varepsilon_{cA}$  – extensão axial de compressão do betão no ponto A
- $\varepsilon_{cc}$  – extensão axial de compressão do betão confinado correspondente a tensão axial de compressão do betão confinado ( $f_{cc}$ )
- $\varepsilon_{co}$  – extensão axial de compressão do betão não confinado correspondente a tensão axial de compressão do betão não confinado ( $f_{co}$ )
- $\varepsilon_f$  – extensão do CFRP na direcção das fibras
- $\varepsilon_{fmax}$  – extensão máxima do CFRP na direcção das fibras
- $\varepsilon_{fu}$  – extensão de rotura à tracção do CFRP
- $\rho_f$  – relação volumétrica do CFRP de confinamento
- $\rho_{f,ef}$  – relação volumétrica efectiva do CFRP de confinamento
- $\rho_{st}$  – relação volumétrica dos estribos
- $\sigma_c$  – tensão de compressão do betão
- $\alpha_{fe}, \alpha_{fv}$  – coeficientes de confinamento do betão que tem em conta os sistemas de confinamento com CFRP
- $\alpha_{se}, \alpha_{sv}$  – coeficientes de confinamento do betão que tem em conta os sistemas de confinamento com estribos

# CAPÍTULO 1

---

## INTRODUÇÃO

Neste capítulo expõem-se os aspectos gerais sobre estruturas de betão armado, em particular sobre estruturas em que o reforço ou a reabilitação com materiais compósitos constituam soluções competitivas no quadro do reforço estrutural. No final, apresenta-se a organização dos assuntos descritos na tese.

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No século XX deu-se a consolidação do betão armado como um dos mais importantes materiais da Engenharia Civil. O desenvolvimento do betão, em conjunto com novas tecnologias construtivas, bem como a implementação de ferramentas computacionais capazes de reproduzir com grande precisão o comportamento do betão armado permitiram explorar plenamente as suas potencialidades.

Apesar de o betão ser um material muito versátil, está sujeito à ocorrência de alguns problemas ignorados até alguns anos, pois o betão apresenta dificuldades de reajuste, sobretudo de capacidade de carga, após a consolidação da estrutura, Juvandes [1999]. A necessidade de reparar e reforçar estruturas de betão armado é cada vez mais frequente. Como causas principais que motivam uma intervenção podem referir-se as seguintes:

- deterioração dos materiais estruturais, provocada por acções externas (envelhecimento dos materiais, incêndios, sismos ou acidentes);
- defeitos de construção;
- erros de projecto;
- alteração do tipo de utilização para que a estrutura havia sido projectada.

Para além destes factores, a imposição de um nível de segurança mais elevado às acções sísmicas é uma necessidade cada vez mais frequente, sobretudo em pontes e edifícios construídos há mais de trinta anos, Rodrigues [2005]. Os sismos actuam sobre os edifícios, causando uma vibração que se transmite das fundações até à estrutura na superfície. Os esforços desenvolvidos nas componentes estruturais do edifício podem ultrapassar o seu limite de resistência, provocando-lhes danos e, eventualmente, levá-los a colapsar.

O comportamento dos edifícios durante um sismo depende, para além da magnitude do fenómeno, dos materiais e técnicas utilizadas na construção.

As técnicas de reparação e reforço relacionadas com a acção sísmica são um enorme campo de investigação. Esta relevância advém do enorme património edificado em que se terá de intervir na eventualidade da ocorrência de um sismo de média/elevada intensidade, ou mesmo na execução de intervenções de reforço anti-sísmico.

## **1.2 REFORÇO DE ESTRUTURAS**

O reforço de estruturas de betão armado recorrendo à aplicação de tubos de aço, Pantazapoulou [1998], Aboutaha et al. [1999], Rodrigues et al. [1999], Susantha et al. [2001], de encamisamento com betão armado, Gomes [1992], ou de chapas metálicas coladas com resina de epóxido, Watson et al. [1994], Coffman et al. [1993], é já considerado tradicional. No entanto, em algumas circunstâncias, o projectista é confrontado com condicionantes de projecto que limitam a solução de reforço estrutural a ser adoptada, bem como a natureza dos materiais a serem seleccionados, devendo ser encontradas soluções alternativas aos materiais tradicionais, desde que competitivas e sustentáveis.

Deste modo, tem-se assistido ao crescente uso de materiais compósitos, Meier [1987], Saadatmanesh e Ehsani [1990], Triantafillou e Plevris [1992], Nanni [1993], Juvandes [1999], Ferreira [2001], Pessiki et al. [2001], Carrazedo [2003], Campione [2003], Rodrigues [2005], Green et al. [2006].

O modo como o material compósito é aplicado nos elementos a reforçar é determinante no desempenho do reforço de uma estrutura. Dada a sua flexibilidade e, desde que previamente à aplicação do reforço, as superfícies dos elementos a reforçar sejam

devidamente tratadas, a utilização de materiais compósitos pode ser uma alternativa eficaz no reforço de um espectro alargado de elementos estruturais. No caso dos pilares, o seu envolvimento, total ou parcial, com mantas de material compósito constitui uma técnica de reforço bastante eficaz para o reforço de estruturas em regiões sísmicas, uma vez que permite aumentar a ductilidade e resistência ao corte dos elementos, sendo particularmente eficiente em pilares de secção circular, Seible et al. [1997]. Diversas configurações de materiais compósitos podem ser utilizadas no reforço estrutural, quer do ponto de vista da sua geometria (tecidos, folhas ou laminados) como da sua constituição material (fibras de carbono, vidro, aramida, etc., embebidas em resinas de distintas propriedades). Estes materiais podem ser aplicados manualmente ou por intermédio de meios mecânicos de distinto grau de sofisticação, Ferreira [2001].

### **1.3 OBJECTIVOS DA TESE**

Das diversas formas de confinar pilares, a técnica baseada na colagem de mantas de CFRP (carbon fiber reinforced polymers) nas faces exteriores destes elementos será a estudada no âmbito do presente trabalho.

Nos últimos anos têm sido estudados sistemas de confinamento constituídos por manta de fibra de carbono (CFRP), envolvendo toda a superfície exterior do elemento ou apenas certas partes deste, Ferreira e Barros, [2004]. Nesta última estratégia pretendeu-se tirar partido da existência de cintas metálicas nos pilares a confinar que, por si só, já proporcionam algum confinamento ao betão e resistência à encurvadura das armaduras longitudinais. Ao primeiro sistema atribuiu-se a designação de “sistema de confinamento contínuo”, enquanto ao segundo, constituído por faixas de manta de CFRP, foi dada a designação de “sistema de confinamento discreto”.

Assim, os objectivos essenciais do presente trabalho são comparar a eficácia de sistemas de confinamento discretos e contínuos em elementos de pilar, e desenvolver uma formulação analítica que simule o comportamento deste tipo de elementos. Para tal, foram desenvolvidas as seguintes principais tarefas:

- I. avaliação do desempenho de vários sistemas de confinamento por intermédio da execução de ensaios de compressão monotónica em provetes de betão de 150x300mm. Com estes ensaios pretendeu-se seleccionar quais os sistemas de confinamento mais vantajosos, em

- termos de incremento de capacidade de carga, a adoptar para o confinamento de provetes de betão armado;
- II. análise experimental do comportamento de provetes de betão armado de 200x600mm, confinados parcial e totalmente, sujeitos a carregamento monotónico de compressão. Com estes resultados pretendeu-se comparar o confinamento contínuo com o confinamento discreto em termos de custos versus capacidade resistente;
  - III. análise experimental de provetes de betão armado de 200x600mm, confinados parcial e totalmente, sujeitos a carregamentos cíclico e monotónico de compressão;
  - IV. desenvolvimento de um modelo analítico para prever o comportamento de pilares de betão armado confinados parcial e totalmente e sujeitos a carregamento monotónico de compressão.

#### **1.4 ORGANIZAÇÃO DA TESE**

A estrutura desta tese consta de oito capítulos, incluindo as considerações finais e as referências, acrescida de três anexos, sendo organizada da forma que a seguir se descreve.

Após esta introdução, no Capítulo 2 os resultados de ensaios experimentais efectuados para caracterizar as propriedades dos materiais aplicados nos ensaios experimentais são apresentados e analisados: betão, armaduras longitudinais e mantas de CFRP. Descreve-se pormenorizadamente a construção dos provetes, o reforço neles aplicado, o tratamento dado à superfície do provetes, bem como as técnicas para a aplicação do reforço.

No Capítulo 3 apresenta-se o programa de investigação experimental, incluindo os procedimentos dos ensaios, os sistemas de confinamento, os parâmetros analisados e o equipamento utilizado nos ensaios monotónicos e nos ensaios cíclicos. A aplicação de extensómetros colados nas mantas também é descrita neste capítulo.

O trabalho experimental foi dividido em três fases. Os resultados referentes à primeira fase são apresentados no capítulo 4. Nesta primeira fase, foram efectuados ensaios de compressão directa em 156 provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, confinados por distintos sistemas de confinamento. Com estes ensaios pretendeu-

se avaliar a influência do número e da largura das faixas de CFRP, bem como do número de camadas por faixa, no aumento da resistência e da capacidade de absorção de energia de elementos de betão submetidos à compressão. A influência da resistência à compressão do betão e da rigidez da manta foram também avaliadas, tendo-se, para tal, efectuado séries de ensaios com provetes de betão de baixa e moderada resistência, confinados com manta de 200 e 300 g de fibra por m<sup>2</sup> de manta. Estes ensaios permitiram seleccionar sistemas de confinamento discreto, utilizados nos ensaios apresentados nos capítulos 5 e 6, cujo desempenho em termos de aumento de capacidade de carga última e de absorção de energia, bem como de custo de aplicação, poderão competir com os sistemas de confinamento contínuo.

No capítulo 5 são apresentados os resultados da segunda fase do trabalho experimental, referentes aos ensaios de compressão directa em 108 provetes cilíndricos de betão armado de 600 mm de altura por 200 mm de diâmetro. Nesta fase do trabalho experimental foram avaliados os mesmos parâmetros que na primeira fase, para além da influência da percentagem de armadura longitudinal.

No capítulo 6, terceira e última fase do trabalho experimental, discutem-se os resultados obtidos na avaliação da influência do carregamento cíclico de compressão em comparação com o carregamento monotónico de compressão no comportamento de provetes de betão armado confinados com sistemas discretos e contínuos em manta de CFRP.

No capítulo 7 apresenta-se o modelo analítico desenvolvido para simular o comportamento à compressão monotónica de provetes de betão armado, de secção circular, reforçados parcial e totalmente com CFRP.

No Capítulo 8 apresentam-se as considerações finais sobre a experiência de confinamento de elementos de pilares com sistemas contínuos ou discretos com mantas de CFRP, sujeitos a carregamento cíclicos e monotónicos de compressão. Ainda são propostas sugestões para futuros desenvolvimentos de trabalhos de investigação nesta área.

A tese termina com as referências bibliográficas pesquisadas para a elaboração desta tese e com a exposição de um conjunto de anexos, todos eles, referentes aos resultados dos ensaios apresentados no capítulo 5, identificados de A a C. No anexo A apresentam-se as curvas tensão versus extensão registadas nos extensómetros eléctricos colocados

nos varões longitudinais de aço. O anexo B é dedicado à caracterização dos modos de rotura e no anexo C incluem-se os resultados obtidos nos extensómetros de fibra óptica.

## CAPÍTULO 2

---

### CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E TÉCNICAS DE CONFINAMENTO

Neste capítulo apresentam-se os resultados dos ensaios de caracterização das propriedades mecânicas dos materiais utilizados nos modelos experimentais, nomeadamente os betões, as mantas de CFRP e os aços das armaduras. Os ensaios de caracterização dos materiais foram realizados no laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais (LERM) da Escola Superior de Tecnologia e de Gestão do Instituto Politécnico de Bragança e no Laboratório de Estruturas (LEST) da Universidade do Minho.

#### 2.1 BETÃO

Um dos objectivos do presente trabalho de investigação é desenvolver sistemas de reforço em elementos estruturais com mais de 30 anos. Assim, o betão a ensaiar deve ser semelhante ao empregue na construção daquela época. O betão dessas estruturas que não sofreu danos consideráveis poderá ter actualmente uma resistência superior à sua resistência na altura da construção. Contudo, é provável que o betão dessas estruturas apresente algum grau de deterioração, pelo que no âmbito do presente trabalho foram considerados dois tipos de betão, um de baixa e outro de moderada resistência à compressão. Para determinar a resistência à compressão deste betões foram efectuados ensaios de compressão aos 28 dias com provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, tendo-se obtido 16 MPa e 32 MPa de resistência média para o betão de baixa e moderada resistência, respectivamente (num universo de 3 provetes, para cada uma das classes resistentes de betão). Nos provetes ensaiados na primeira fase do programa experimental o betão de moderada resistência, o seu valor médio foi de 23 MPa, aos 28 dias.

## 2.2 MANTAS DE CFRP

Neste trabalho foram utilizados dois tipos de manta flexível de fibras de carbono curadas “in situ”, uma designada comercialmente por CF130 S&P 240, com 300 g de fibra por m<sup>2</sup> de manta, com 0.176 mm de espessura, e outra com referência CF120 S&P 240, de 200 g de fibra por m<sup>2</sup> de manta, com 0.113 mm de espessura. Segundo o distribuidor e o fabricante, *degussa* e S&P, respectivamente, ambas as mantas teriam resistência à tracção superior a 3800 MPa, módulo de elasticidade segundo a direcção das fibras de 240 GPa e extensão última próxima de 1.55 %. As mantas foram fornecidas em rolos de 50 m de comprimento por 0.6 m de largura (ver Figura 2.1).

Para tratamento da superfície dos provetes foi aplicado um primário designado por Mbrace primário, transparente e de baixa viscosidade (ver Figura 2.2) que, segundo o fabricante, *degussa*, desenvolve 12 MPa de resistência à tracção.

O saturante aplicado era constituído por uma resina de epóxico de alto conteúdo de sólidos e de fácil aplicação, para aderência e colocação de mantas à base de fibras de carbono (ver Figura 2.3). Segundo o fabricante, *degussa*, esta resina apresenta valores de resistência à tracção da ordem dos 54 MPa.



Figura 2.1 – Rolo de fibra de carbono



Figura 2.2 – Primário



Figura 2.3 – Resina de epóxico

### 2.2.1 Ensaios experimentais das mantas de CFRP

Os valores das propriedades da manta de CFRP foram determinados segundo as recomendações da norma ISO TC 71/SC 6 N. Os ensaios de tracção uniaxial foram realizados numa prensa servo-controlada da marca INSTRON, modelo 4485, no Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais da Escola Superior de Tecnologia e de Gestão de

Bragança (ver Figura 2.5). A prensa inclui uma célula de carga de 200 kN com precisão de 0.5%. A deformação no CFRP foi determinada por intermédio de um extensómetro eléctrico (clip-gauge) fixado na parte central do provete. O campo de leitura deste extensómetro era de 50 mm, tendo este aparelho uma precisão de 0.5%. O ensaio foi efectuado com uma velocidade de deslocamento de 1 mm/min. Na Figura 2.6 pode ver-se o sistema de fixação do laminado às amarras da máquina, bem como o clip-gauge aplicado no provete.

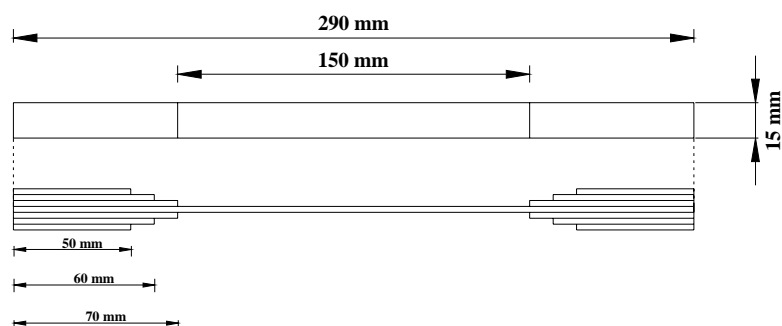


Figura 2.4 – Esquema dos provetes de CFRP ensaiados a tracção uniaxial.



Figura 2.5 – Prensa servo-controlada, INSTRON modelo 4485.

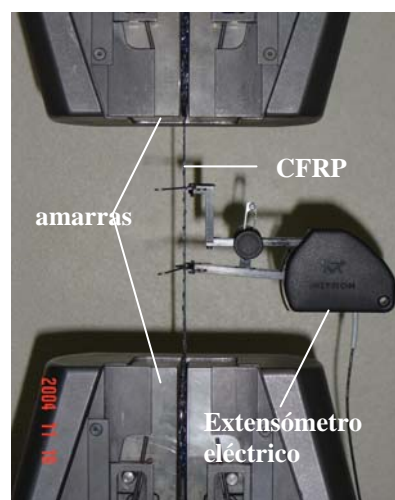


Figura 2.6 – Ensaio de tracção em provetes de manta de CFRP.

O aspecto final dos provetes de CFRP após terem sido ensaiados está apresentado na Figura 2.7.



Figura 2.7 – Aspecto do provete de CFRP após ter sido ensaiado.

Na Tabela 2.1 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de tracção uniaxial. Os valores representam a média de 5 provetes para cada tipo de manta. Na Tabela 2.2 apresentam-se os valores fornecidos pelo distribuidor *degussa*.

O módulo de elasticidade indicado na Tabela 2.1 foi calculado por intermédio da seguinte expressão:

$$E_f = \frac{\Delta F}{\Delta \varepsilon \cdot A} \quad (2.1)$$

onde

$E_f$ : módulo de elasticidade do CFRP;

$\Delta F$ : incremento de força entre 20% e 60% da capacidade de carga do CFRP;

$\Delta \varepsilon$ : incremento de extensão correspondente ao incremento de tensão entre 20% e 60% da capacidade de carga do CFRP;

$A$ : secção transversal do provete ensaiado.

A espessura foi determinada calculando o peso de amostras de manta e tendo em conta a sua densidade (segundo o fornecedor a densidade de ambas as mantas é de  $1.7 \text{ g/cm}^3$ ).

Tabela 2.1 – Propriedades da manta de CFRP mediante ensaios de tracção uniaxial (média de 5 provetes)

Tipo de manta	Espessura da manta (mm)	Tensão máxima (MPa)	Extensão máxima (%)	Módulo de elasticidade (GPa)
CF 120 (S&P) 240	0.113	3535	1.52	232
CF 130 (S&P) 240	0.176	3070	1.33	230

Tabela 2.2 – Propriedades da manta de CFRP segundo as fichas técnicas do distribuidor, *degussa*

Tipo de manta	Espessura da manta (mm)	Tensão máxima (MPa)	Extensão máxima (%)	Módulo de elasticidade (GPa)
CF 120 (S&P) 240	0.117	3800	1.55	240
CF 130 (S&P) 240	0.176	3800	1.55	240

A relação típica força - deslocamento registada nos provetes de CFRP, para as duas mantas aplicadas no confinamento dos provetes, está apresentada nas Figura 2.8 e Figura 2.9. As curvas força - deslocamento apresentam dois tramos com inclinação distinta. No primeiro tramo, o deslocamento foi medido através de um Clip gauge (extensómetro externo) e, no segundo, o deslocamento foi medido por intermédio do transdutor interno da prensa. A curva a tracejado representa a relação força-deslocamento extrapolada, caso o deslocamento tivesse sido registado através do clip gauge até ao final do ensaio.

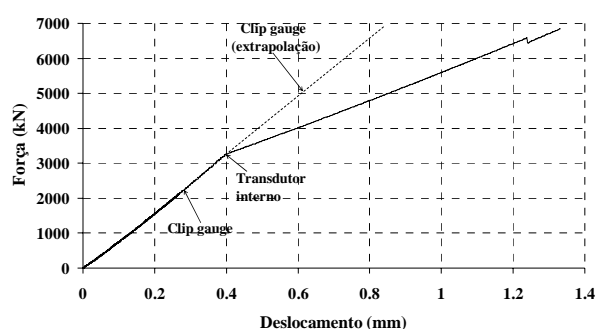


Figura 2.8 – Gráfico força versus deslocamento para a manta CF 120 (S&P) 240.

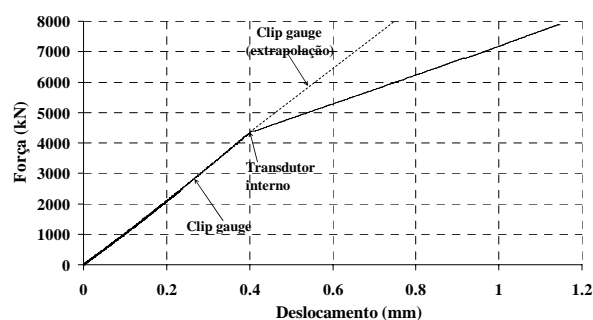


Figura 2.9 – Gráfico força versus deslocamento para a manta CF 130 (S&P) 240.

### 2.3 AÇO

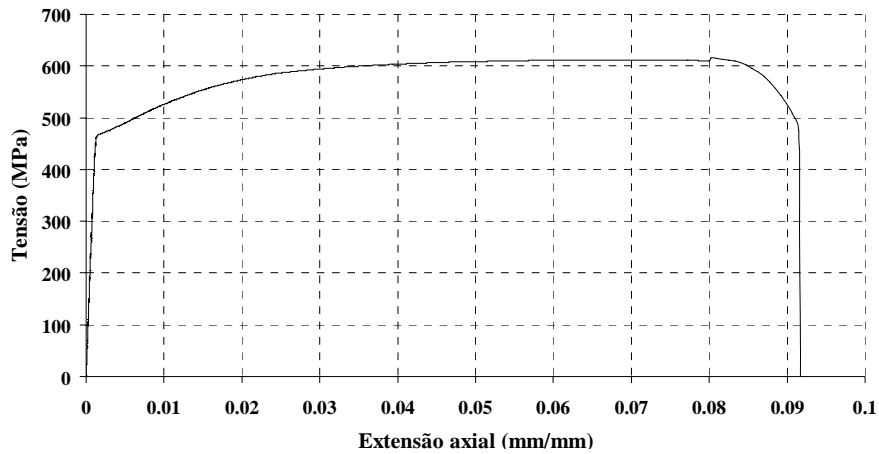
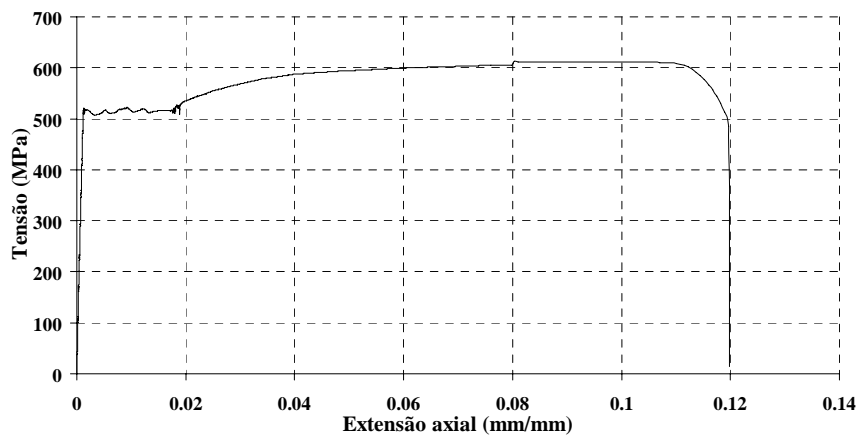
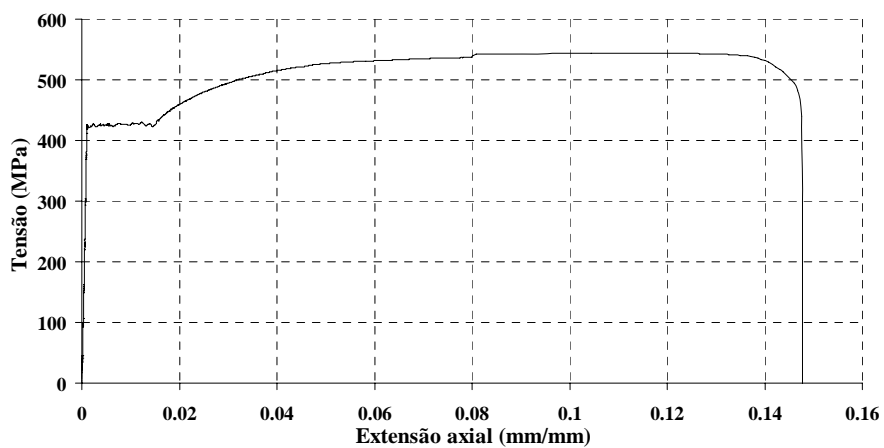
O aço utilizado nos modelos de pilares foi da classe A400. Os varões longitudinais tinham 8 e 10 mm diâmetro e os estribos 6 mm de diâmetro. Para caracterização do aço foram ensaiados, numa prensa servo controlada da marca Instron, modelo 4400, do Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais do Instituto Politécnico de Bragança, 5 provetes representativos de cada um dos varões de aço utilizados, de acordo com a norma europeia NP-ENV 10002-1 [1990].

Na Tabela 2.3 indicam-se os valores médios das tensão de cedência  $f_{sy}$ , a tensão de rotura à tracção  $f_{su}$  para os provetes ensaiados, bem como os valores médios do módulo de elasticidade  $E_s$  e da extensão total correspondente à força máxima  $\varepsilon_{su}$ .

Tabela 2.3 - Ensaio de caracterização das armaduras

Diâmetro do varão (mm)	$f_{sy}$ (MPa)	$f_{su}$ (MPa)	$E_s$ (GPa)	$\varepsilon_{su}$ [%]
6	468.3	616.2	212.2	8
8	517.2	607.9	199.8	11
10	421.2	539.3	196.5	14

Nas Figuras seguintes apresentam-se os diagramas tensão-deformação dos provetes de aço  $\phi 6$ ,  $\phi 8$  e  $\phi 10$ .

Figura 2.10 – Diagrama tensão-deformação do ensaio dos provetes de aço de  $\phi 6$ .Figura 2.11 – Diagrama tensão-deformação do ensaio dos provetes de aço de  $\phi 8$ .Figura 2.12 – Diagrama tensão-deformação do ensaio dos provetes de aço de  $\phi 10$ .

## 2.4 PREPARAÇÃO DOS PROVETES

A primeira fase da preparação dos provetes consistiu na montagem das armaduras. O aço foi cortado e dobrado numa empresa de ferro pronto de acordo com o esquema representado na Figura 2.13. Na Figura 2.14 é apresentada a sequência de preparação das armaduras.

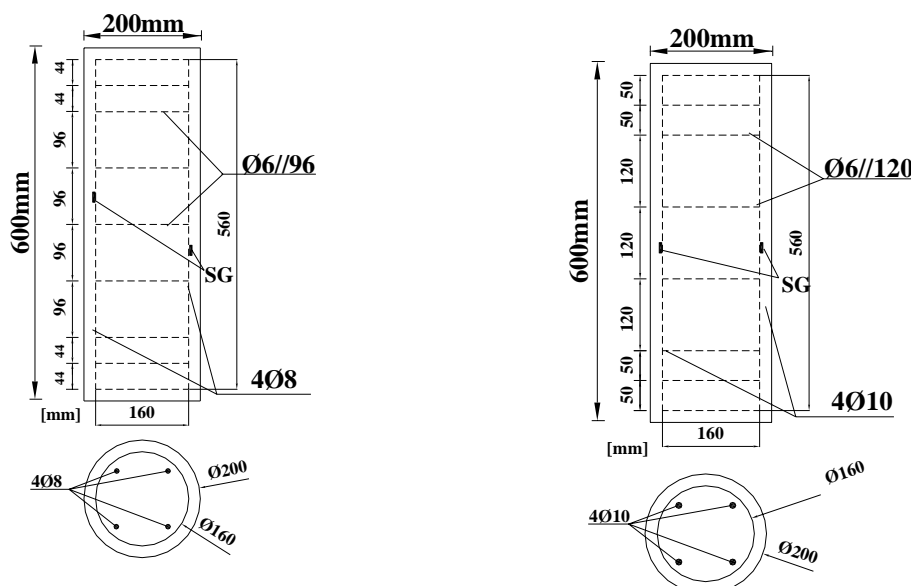


Figura 2.13 – Esquema das armaduras.



Figura 2.14 – Execução das armaduras.

A betonagem dos provetes foi realizada no laboratório de Materiais de Construção do Instituto Politécnico de Bragança e foi utilizado betão fornecido por uma empresa de betão pronto. A betonagem dos provetes foi efectuada num piso nivelado, para tentar garantir que a face inferior do provete ficasse perfeitamente lisa e nivelada. Após a betonagem a face superior do provete foi alisada com uma espátula, não tendo no entanto ficado perfeitamente plana, pelo que houve, a necessidade de ser rectificada. Para garantir o recobrimento de dois centímetros foram aplicados espaçadores nas armaduras. Na Figura 2.15 são apresentadas algumas fotos da betonagem dos provetes.



Figura 2.15 – Betonagem dos provetes.

O topo superior dos provetes teve de ser rectificadado de modo a que ambas as faces dos provetes ficassem paralelas entre si e perpendiculares ao seu próprio eixo. Na rectificação foi aplicada uma camada regularizadora de um material fornecido pela Sika e denominado de *Icosit K 101*. Trata-se de um ligante com base em resinas de epoxi seleccionadas, isento de solventes e fornecido em dois componentes e que assegura uma perfeita ligação ao betão. Segundo o fornecedor, trata-se de um material com uma resistência à compressão e à flexão de  $90 \text{ N/mm}^2$  e  $45 \text{ N/mm}^2$ , respectivamente, prontuário da Sika [2004]. Na Figura 2.16 apresenta-se a sequência de procedimentos adoptados na rectificação das faces superiores dos provetes.



Icosit K 101



Mistura dos componentes



Aplicação do Icosit aos provetes



Aplicação do Icosit aos provetes



Aspecto final do provete rectificadado



Descroagem do provete

Figura 2.16 – Rectificação do topo superior dos provetes.

Após a rectificação dos provetes foi necessário preparar a superfície de modo a retirar a goma superficial do cimento na zona em contacto com a resina de epóxido, bem como para tornar a superfície ligeiramente rugosa, o que foi conseguido esmerilando o provete. A seguir o provete foi limpo com jacto de ar comprimido e álcool, de forma a retirar as poeiras que possam ter sido depositadas, (ver Figura 2.17).



Esmerilar o provete



Limpeza com ar comprimido



Aplicação de álcool



Aplicação do primário



Aplicação da resina



Aplicação da resina na faixa



Aplicação da faixa de CFRP



Impregnação completa da resina



Aspecto final do provete

Figura 2.17 – Aplicação do reforço.

A segunda fase consistiu na aplicação do primário, o qual foi fornecido em dois componentes separados nas proporções correctas da mistura. Após a aplicação do primário foram aguardados 30 minutos até se proceder à aplicação da resina de epóxido, que constitui a terceira fase da técnica. A resina é fornecida em dois componentes separados nas proporções

correctas da mistura. O produto foi distribuído uniformemente sobre a superfície a confinar com o auxílio de uma brocha ou de um rolo, tentando-se assegurar uma completa impregnação da manta. A faixa de manta, previamente colocada sobre uma superfície lisa e plana, foi saturada com resina de epóxico e aplicada de seguida na zona pré-preparada do provete. Na aplicação da faixa, esta foi pressionada com um rolo de forma a tentar evitar-se a formação de bolhas na ligação e a garantir-se uma camada de resina de epóxico o mais uniforme possível. Na aplicação de camadas adicionais de faixas de manta foi aguardado um intervalo de 30 minutos entre camadas. Antes da aplicação de uma nova camada de CFRP, aplicou-se uma demão de resina de epóxico na camada de CFRP já colocada. Sobre a última camada de manta de carbono é aplicada resina de epóxico.

## CAPÍTULO 3

---

### PROGRAMA EXPERIMENTAL E INSTRUMENTAÇÃO

Neste capítulo são apresentados os sistemas de confinamento bem como os parâmetros investigados, julgados relevantes para a avaliação da eficácia de dado sistema de confinamento. Dos possíveis parâmetros que afectam o comportamento de um pilar de betão armado confinado com sistemas de CFRP seleccionam-se os seguintes para serem investigados: classe resistente do betão, diâmetro e percentagem de armadura longitudinal, afastamento entre cintas metálicas, tipo de manta de CFRP, percentagem de CFRP, distancia entre faixas de CFRP, largura das faixas de CFRP e número de camadas de CFRP por faixa.

#### 3.1 SISTEMA DE CONFINAMENTO E SÉRIES DE ENSAIOS

##### 3.1.1 Geometria dos provetes

Devido às restrições impostas pelo equipamento disponível no laboratório de estruturas da Universidade do Minho, optou-se por dois tipos de provetes: um primeiro com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura (utilizado na 1ª fase do programa experimental) e um segundo com 200 mm de diâmetro e 600 mm de altura (utilizado na 2ª e 3ª fase do programa experimental).

##### 3.1.2 Parâmetros avaliados

O trabalho experimental foi dividido em três fases. Numa **primeira fase** foram feitos ensaios preliminares em provetes cilíndricos de betão com 300 mm de altura e 150 mm de diâmetro no sentido de serem seleccionados sistemas de confinamento discreto, cujo desempenho em termos de aumento de capacidade de carga última e de absorção de energia, bem como de custo de aplicação, pudessem competir com os sistemas de confinamento contínuo. Nestes ensaios preliminares foi avaliada a influência da largura das faixas,  $W$ , do seu número ao longo da altura do provete,  $S$ , e do número de camadas por faixa,  $L$ , no comportamento à

compressão dos provetes. Estes parâmetros foram estudados para dois tipos distintos de betão e de manta. A cada provete foi atribuída a designação  $WiSjLk$ , em que  $Wi$  é a largura da faixa com  $i = 15, 30, 45, 60$  e  $300$  mm,  $Sj$  é o número de faixas ao longo do provete com  $j$  de 1 a 5 e  $Lk$  é o número de camadas por faixa com  $k$  de 1 a 7.

No total foram efectuados quatro grupos de séries de ensaios, que se encontram descritos nas Tabela 3.2 à Tabela 3.4. A variação de  $W$ ,  $S$  e  $L$  conduziu a provetes com diferente percentagem volumétrica de confinamento  $\rho_f$ , dada por

$$\rho_f = 4 \frac{S \times W \times L \times e}{D \times H}$$

em que  $e$  é a espessura efectiva da manta,  $D$  e  $H$  são o diâmetro e a altura do provete de betão, respectivamente. Nas Tabela 3.2 à Tabela 3.4  $s'$  é o espaço de betão livre entre faixas de CFRP.

Na Figura 3.1 encontra-se uma representação do sistema genérico de confinamento. Na Figura 3.2 apresentam-se fotos de provetes representativos de alguns dos sistemas de confinamento estudados. Estes sistemas são compostos por faixas de manta de fibras de carbono (CFRP), fixas ao betão e às camadas subjacentes por intermédio de resina de epóxico.

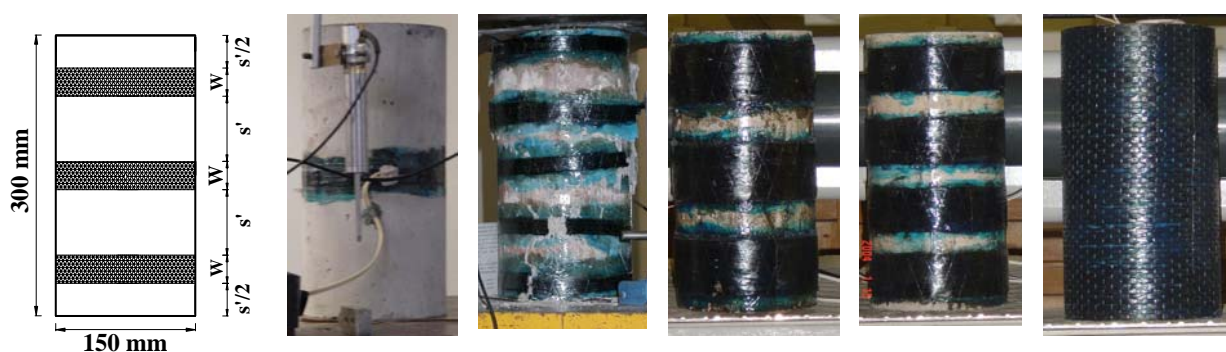


Figura 3.1 – Sistema genérico de confinamento.

Figura 3.2 – Fotos de alguns dos sistemas de confinamento adoptados na primeira fase do programa experimental.

O programa experimental foi organizado em grupos de séries de ensaios, sendo cada grupo distinguido pela classe de resistência do betão e do tipo de manta utilizada. Por exemplo, o grupo de ensaios da Tabela 3.2 designa-se por C23S300 por ser constituído por provetes de betão com resistência média à compressão de 23 MPa e cintados com manta de  $300 \text{ g/m}^2$ , tal como está indicado na Tabela 3.1. Os grupos C23S300 e C16S200, como têm características

iguais, à excepção das classes resistentes do betão, estão ambos indicados na mesma Tabela 3.3.

Após a análise dos resultados dos ensaios da Tabela 3.2 referente ao grupo C23S300, constatou-se que apenas havia incremento da capacidade de carga e da ductilidade para sistemas de confinamento com faixas de largura igual ou superior a 45 mm. Estes resultados conduziram à reformulação do número de arranjos dos grupos de ensaios subsequentes, tendo-se seleccionado os arranjos indicados nas Tabela 3.3 e Tabela 3.4.

O número de provetes ensaiados atendeu às diversas configurações que se pretenderam estudar neste trabalho experimental. O número total de grupos considerados foi de quatro e foram ensaiados três provetes por cada configuração adoptada. O trabalho foi dividido em quatro betonagens distintas dependendo da resistência à compressão do betão que se pretendia. Para cada betonagem foram ensaiados provetes de referência, ou seja, três provetes de betão simples.

Tabela 3.1 – Designação adoptada para os grupos de ensaios da primeira fase do trabalho experimental

Tipo de betão	Tipo de manta	Designação do grupo de ensaios	Nº de provetes
23 MPa	CF130 S&P 240 (300 g/m <sup>2</sup> )	C23S300	90
23 MPa	CF120 S&P 240 (200 g/m <sup>2</sup> )	C23S200	18
16 MPa	CF120 S&P 240 (200 g/m <sup>2</sup> )	C16S200	18
16 MPa	CF130 S&P 240 (300 g/m <sup>2</sup> )	C16S300	18
Nº total de provetes confinados ensaiados			<b>144</b>

Assim, a campanha de ensaios preliminares do presente trabalho é formada por 144 provetes confinados com as diversas configurações consideradas e apresentadas nas Tabela 3.2 à Tabela 3.4 e por 12 provetes de referência (3 por cada grupo de ensaios preliminares efectuados) constituindo um total de **156** provetes.

Os resultados obtidos nesta primeira fase são apresentados no capítulo 4.

Tabela 3.2 – Séries de ensaios do grupo C23S300

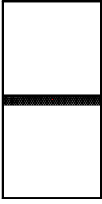

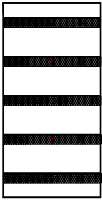
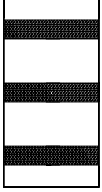
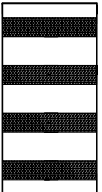
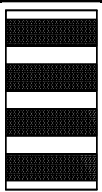
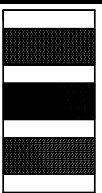

Designação do provete	W [mm]	S [-]	s' [mm]	L [mm]	Tipo de betão	Tipo de manta	Secção-hxφ [mm]	Sistema de confinamento
W15S1L1	15	1	-	1	C20/25	S&P C-240 (300 g/m <sup>2</sup> )	300x150	
W15S1L2				2				
W15S1L3				3				
W15S1L4				4				
W15S1L6				6				
W15S3L1		3	85	1				
W15S3L2				2				
W15S3L3				3				
W15S3L4				4				
W15S3L6				6				
W15S5L1		5	45	1				
W15S5L2				2				
W15S5L3				3				
W15S5L4				4				
W15S5L6				6				
W30S3L3	30	3	70	3				
W30S3L5				5				
W30S3L7				7				
W30S4L3	30	4	45	3				
W30S4L5				5				
W30S4L7				7				
W45S4L3	45	4	30	3				
W45S4L5				5				
W45S4L7				7				
W60S3L3	60	3	40	3				
W60S3L5				5				
W60S3L7				7				
W300S1L3	300	1	-	3				
W300S1L5				5				
W300S1L7				7				

Tabela 3.3 – Séries de ensaios do grupo C23S200 e C16S200

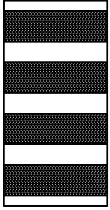

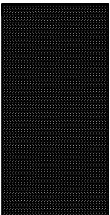
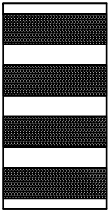
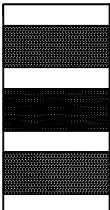
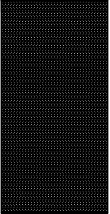
Designação do provete	W [mm]	S [-]	s' [mm]	L [mm]	Tipo de betão	Tipo de manta	Secção-hxφ [mm]	Sistema de confinamento			
W45S4L3	45	4	30	3	C20/25 e C16/20	S&P C-240 (300 g/m <sup>2</sup> )	300x150				
W45S4L5				5							
W60S3L3	60	3	40	3				C20/25 e C16/20	S&P C-240 (300 g/m <sup>2</sup> )	300x150	
W60S3L5				5							
W300S1L3	300	1	-	3				C20/25 e C16/20	S&P C-240 (300 g/m <sup>2</sup> )	300x150	
W300S1L5				5							

Tabela 3.4 – Séries de ensaios do grupo C16S300

Designação do provete	W [mm]	S [-]	s' [mm]	L [mm]	Tipo de betão	Tipo de manta	Secção-hxφ [mm]	Sistema de confinamento			
W45S4L3	45	4	30	3	C16/20	S&P C-240 (300 g/m <sup>2</sup> )	300x150				
W45S4L5				5							
W60S3L3	60	3	40	3				C16/20	S&P C-240 (300 g/m <sup>2</sup> )	300x150	
W60S3L5				5							
W300S1L3	300	1	-	3				C16/20	S&P C-240 (300 g/m <sup>2</sup> )	300x150	
W300S1L5				5							



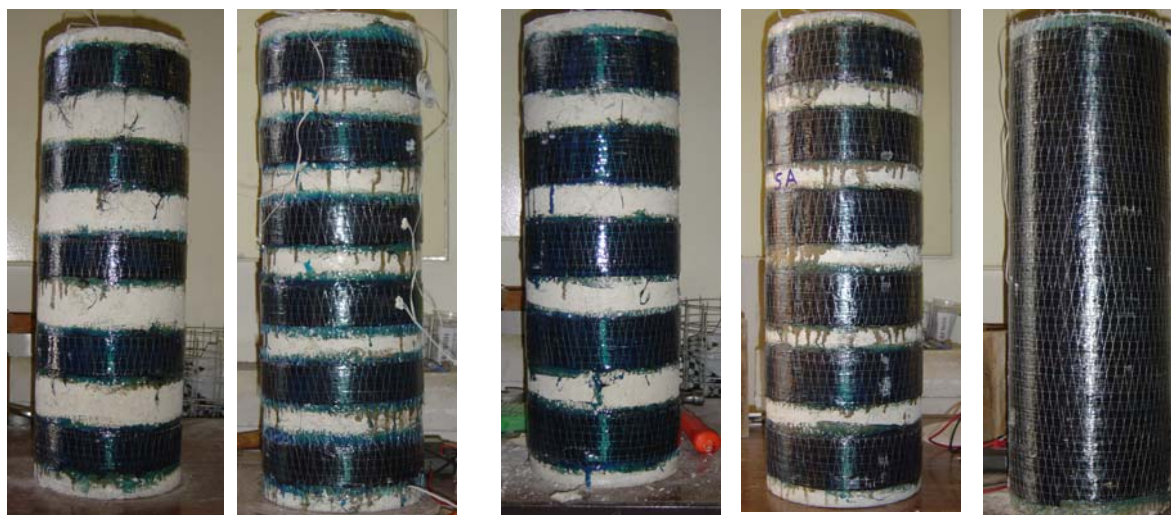


Figura 3.4 – Fotos de alguns dos sistemas de confinamento adoptados na segunda fase do programa experimental.

O programa experimental foi organizado em grupos de séries de ensaios, sendo cada grupo distinguido pela classe de resistência do betão, pelo tipo de manta utilizada e pelo tipo de armadura longitudinal. Por exemplo, o grupo de ensaios da Tabela 3.6 designa-se por C16S200 $\phi$ 8 por ser constituído por provetes de betão com resistência média à compressão de 16 MPa, cintados com manta de 200 g/m<sup>2</sup> e com armadura longitudinal  $\phi$ 8, tal como está indicado na Tabela 3.5.

O número de provetes ensaiados atendeu às diversas configurações que se pretenderam estudar neste trabalho experimental. O número total de grupos considerados foi de oito, sendo cada grupo formado por seis séries distintas e, para cada configuração, foram ensaiados dois provetes. O trabalho foi dividido em duas betonagens distintas dependendo da resistência à compressão pretendida para o betão. Para cada betonagem foram ensaiados provetes de referência, ou seja, dois provetes de betão simples e dois provetes de betão armado com ferro longitudinal  $\phi$ 8 e dois provetes de betão armado com ferro longitudinal  $\phi$ 10. Na Tabela 3.5 é feita a quantificação de provetes com 600 mm de altura e 200 mm de diâmetro ensaiados no presente trabalho experimental.

Os resultados dos ensaios referentes a esta fase do trabalho são apresentados no capítulo 5.

Tabela 3.5 – Designação adoptada para os grupos de ensaios da segunda fase do trabalho experimental

Betão (MPa)	Manta de CFRP	Armadura longitudinal	Designação da série	Nº de provetes
16	CF120 S&P 240 (200 g/m <sup>2</sup> )	φ8	C16S200φ8	12
16	CF120 S&P 240 (200 g/m <sup>2</sup> )	φ10	C16S200φ10	12
16	CF130 S&P 240 (300 g/m <sup>2</sup> )	φ8	C16S300φ8	12
16	CF130 S&P 240 (300 g/m <sup>2</sup> )	φ10	C16S300φ10	12
32	CF120 S&P 240 (200 g/m <sup>2</sup> )	φ8	C32S200φ8	12
32	CF120 S&P 240 (200 g/m <sup>2</sup> )	φ10	C32S200φ10	12
32	CF130 S&P 240 (300 g/m <sup>2</sup> )	φ8	C32S300φ8	12
32	CF130 S&P 240 (300 g/m <sup>2</sup> )	φ10	C32S300φ10	12
Nº total de provetes confinados ensaiados				<b>96</b>

Assim, o programa experimental da segunda fase do presente trabalho é constituído por 96 provetes confinados com as diversas configurações consideradas e apresentadas na Tabela 3.6 à Tabela 3.13 e por 12 provetes de referência (6 por cada classe resistente de betão) constituindo um total de **108** provetes.

Tabela 3.6 – Campanha de ensaios para o grupo de séries de ensaio C16S200φ8

Designação do provete	W [mm]	S [-]	s' [mm]	L [-]	Tipo de betão	Tipo de manta	Secção-hxφ [mm]	Arm. long (A <sub>L</sub> ) Arm.trans (A <sub>T</sub> )	Sistema de confinamento								
W45S6L3	45	6	55	3	C16/20	S&P C-240 (200 g/m <sup>2</sup> )	600x200	A <sub>L</sub> = 4φ8 A <sub>T</sub> = φ6//96									
W45S6L5				5													
W60S6L3	60	6	40	3					C16/20	S&P C-240 (200 g/m <sup>2</sup> )	600x200	A <sub>L</sub> = 4φ8 A <sub>T</sub> = φ6//96					
W60S6L5				5													
W600S1L3	600	1	-	3									C16/20	S&P C-240 (200 g/m <sup>2</sup> )	600x200	A <sub>L</sub> = 4φ8 A <sub>T</sub> = φ6//96	
W600S1L5				5													

Tabela 3.7 – Campanha de ensaios para o grupo de séries de ensaio C16S200φ10

Designação do provete	W [mm]	S [-]	s' [mm]	L [-]	Tipo de betão	Tipo de manta	Secção-hxφ [mm]	Arm. long (A <sub>L</sub> ) Arm.trans (A <sub>T</sub> )	Sistema de confinamento								
W45S5L3	45	5	75	3	C16/20	S&P C-240 (200 g/m <sup>2</sup> )	600x200	A <sub>L</sub> = 4φ10 A <sub>T</sub> = φ6//120									
W45S5L5				5													
W60S5L3	60	5	60	3					C16/20	S&P C-240 (200 g/m <sup>2</sup> )	600x200	A <sub>L</sub> = 4φ10 A <sub>T</sub> = φ6//120					
W60S5L5				5													
W600S1L3	600	1	-	3									C16/20	S&P C-240 (200 g/m <sup>2</sup> )	600x200	A <sub>L</sub> = 4φ10 A <sub>T</sub> = φ6//120	
W600S1L5				5													

Tabela 3.8 – Campanha de ensaios para o grupo de séries de ensaio C16S300φ8

Designação do provete	W [mm]	S [-]	s' [mm]	L [-]	Tipo de betão	Tipo de manta	Secção-hxφ [mm]	Arm. long (A <sub>L</sub> ) Arm.trans (A <sub>T</sub> )	Sistema de confinamento								
W45S6L3	45	6	55	3	C16/20	S&P C-240 (300 g/m <sup>2</sup> )	600x200	A <sub>L</sub> = 4φ8 A <sub>T</sub> = φ6//96									
W45S6L5				5													
W60S6L3	60	6	40	3					C16/20	S&P C-240 (300 g/m <sup>2</sup> )	600x200	A <sub>L</sub> = 4φ8 A <sub>T</sub> = φ6//96					
W60S6L5				5													
W600S1L3	600	1	-	3									C16/20	S&P C-240 (300 g/m <sup>2</sup> )	600x200	A <sub>L</sub> = 4φ8 A <sub>T</sub> = φ6//96	
W600S1L5				5													

Tabela 3.9 – Campanha de ensaios para o grupo de séries de ensaio C16S300φ10

Designação do provete	W [mm]	S [-]	s' [mm]	L [-]	Tipo de betão	Tipo de manta	Secção-hxφ [mm]	Arm. long (A <sub>L</sub> ) Arm.trans (A <sub>T</sub> )	Sistema de confinamento								
W45S5L3	45	5	75	3	C16/20	S&P C-240 (300 g/m <sup>2</sup> )	600x200	A <sub>L</sub> = 4φ10 A <sub>T</sub> = φ6//120									
W45S5L5				5													
W60S5L3	60	5	60	3					C16/20	S&P C-240 (300 g/m <sup>2</sup> )	600x200	A <sub>L</sub> = 4φ10 A <sub>T</sub> = φ6//120					
W60S5L5				5													
W600S1L3	600	1	-	3									C16/20	S&P C-240 (300 g/m <sup>2</sup> )	600x200	A <sub>L</sub> = 4φ10 A <sub>T</sub> = φ6//120	
W600S1L5				5													

Tabela 3.10 – Campanha de ensaios para o grupo de séries de ensaio C32S200φ8

Designação do provete	W [mm]	S [-]	s' [mm]	L [-]	Tipo de betão	Tipo de manta	Secção-hxφ [mm]	Arm. long (A <sub>L</sub> ) Arm.trans (A <sub>T</sub> )	Sistema de confinamento								
W45S6L3	45	6	55	3	C25/30	S&P C-240 (200 g/m <sup>2</sup> )	600x200	A <sub>L</sub> = 4φ8 A <sub>T</sub> = φ6//96									
W45S6L5				5													
W60S6L3	60	6	40	3					C25/30	S&P C-240 (200 g/m <sup>2</sup> )	600x200	A <sub>L</sub> = 4φ8 A <sub>T</sub> = φ6//96					
W60S6L5				5													
W600S1L3	600	1	-	3									C25/30	S&P C-240 (200 g/m <sup>2</sup> )	600x200	A <sub>L</sub> = 4φ8 A <sub>T</sub> = φ6//96	
W600S1L5				5													

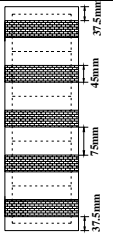
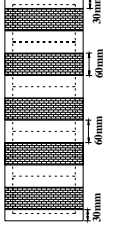
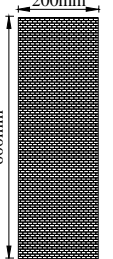
Tabela 3.11 – Campanha de ensaios para o grupo de séries de ensaio C32S200φ10

Designação do provete	W [mm]	S [-]	s' [mm]	L [-]	Tipo de betão	Tipo de manta	Secção-hxφ [mm]	Arm. long (A <sub>L</sub> ) Arm.trans (A <sub>T</sub> )	Sistema de confinamento				
W45S5L3	45	5	75	3	C25/30	S&P C-240 (200 g/m <sup>2</sup> )	600x200	A <sub>L</sub> = 4φ10 A <sub>T</sub> = φ6//120					
W45S5L5				5									
W60S5L3	60	5	60	3									
W60S5L5				5									
W600S1L3	600	1	-	3									
W600S1L5				5									

Tabela 3.12 – Campanha de ensaios para o grupo de séries de ensaio C32S300φ8

Designação do provete	W [mm]	S [-]	s' [mm]	L [-]	Tipo de betão	Tipo de manta	Secção-hxφ [mm]	Arm. long (A <sub>L</sub> ) Arm.trans (A <sub>T</sub> )	Sistema de confinamento				
W45S6L3	45	6	55	3	C25/30	S&P C-240 (300 g/m <sup>2</sup> )	600x200	A <sub>L</sub> = 4φ8 A <sub>T</sub> = φ6//96					
W45S6L5				5									
W60S6L3	60	6	40	3									
W60S6L5				5									
W600S1L3	600	1	-	3									
W600S1L5				5									

Tabela 3.13 – Campanha de ensaios para o grupo de séries de ensaio C32S300φ10

Designação do provete	W [mm]	S [-]	s' [mm]	L [-]	Tipo de betão	Tipo de manta	Secção-hxφ [mm]	Arm. long (A <sub>L</sub> ) Arm.trans (A <sub>T</sub> )	Sistema de confinamento						
W45S5L3	45	5	75	3	C25/30	S&P C-240 (300 g/m <sup>2</sup> )	600x200	A <sub>L</sub> = 4φ10 A <sub>T</sub> = φ6//120							
W45S5L5				5											
W60S5L3	60	5	60	3					S&P C-240 (300 g/m <sup>2</sup> )	600x200	A <sub>L</sub> = 4φ10 A <sub>T</sub> = φ6//120				
W60S5L5				5											
W600S1L3	600	1	-	3								S&P C-240 (300 g/m <sup>2</sup> )	600x200	A <sub>L</sub> = 4φ10 A <sub>T</sub> = φ6//120	
W600S1L5				5											

Na **terceira fase** do trabalho experimental foi avaliada a influência do carregamento cíclico de compressão no comportamento de provetes de betão armado confinados com sistemas discretos e contínuos em manta de CFRP. Com base nos resultados obtidos na segunda fase do trabalho foram seleccionados, para o presente programa experimental, os sistemas de confinamento representados na Tabela 3.14, constituídos por uma série de ensaios monotónicos e cíclicos em 14 provetes cilíndricos com 600 mm de altura e 200 mm de diâmetro, em betão de 30 MPa de resistência à compressão aos 28 dias, armados com varões longitudinais φ8 e confinados com manta tipo CF120 S&P 240 (200 g/m<sup>2</sup>). A influência dos ciclos de carga/descarga na evolução da rigidez da resposta tensão-extensão, bem como na variação da extensão nos sistemas de confinamento em CFRP foi investigada.

A cada provete foi atribuída a designação  $WiLk\_c/m$ , em que  $Wi$  é a largura da faixa com  $i = 45, 60$  e  $600$  mm e  $Lk$  é o número de camadas por faixa com  $k$  igual a 3 e 5. Para distinguir os ensaios cíclicos dos monotónicos foi atribuído aos ensaios cíclicos a letra  $c$  e aos ensaios monotónicos a letra  $m$ . Na Figura 3.5 apresenta-se o sistema genérico do sistema de confinamento adoptado. Para cada série de ensaios ( $WiLk$ ) ensaiaram-se dois provetes, um à compressão monotónica e outro a compressão cíclica. Os procedimentos relativos ao

confinamento dos provetes estão apresentados, com detalhe, no capítulo 2. Para determinar as extensões ocorridas nas faixas de manta de CFRP, foi aplicado um extensómetro eléctrico por faixa, (ver Figura 3.5). Os extensómetros foram colados na face exterior da camada mais externa (última camada aplicada), no sentido das fibras.

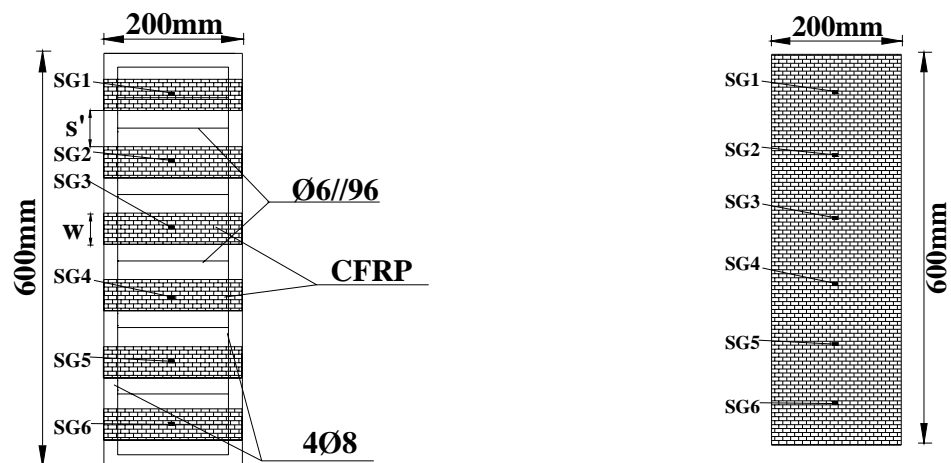


Figura 3.5 – Sistema genérico de confinamento da terceira fase do programa experimental.

Tabela 3.14 – Campanha de ensaios cíclicos e monotónicos

Designação do provete	W [mm]	s' [mm]	L [-]	Tipo de betão	Tipo de manta	Secção-hxφ [mm]	Arm. long (A <sub>L</sub> ) Arm.trans (A <sub>T</sub> )	Sistema de confinamento
W45L3_c	45	55	3	C25/30	S&P C-240 (200 g/m <sup>2</sup> )	600x200	A <sub>L</sub> = 4φ8 A <sub>T</sub> = φ6/96	
W45L3_m			5					
W45L5_c								
W45L5_m								
W60L3_c	60	40	3					
W60L3_m			5					
W60L5_c								
W60L5_m								
W600L3_c	600	-	3					
W600L3_m								

### 3.2 EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Os ensaios da Tabela 3.2 foram realizados numa prensa de 3000 kN de capacidade máxima de carga (ver Figura 3.6). No entanto, em regime de servo-mecanismo, a capacidade máxima de carga desta prensa era de 2000 kN. Todos os restantes ensaios foram realizados numa prensa servo-controlada que permite efectuar ensaios em malha fechada até uma carga máxima de cerca de 2250 kN (ver Figura 3.7).



Figura 3.6 – Prensa de compressão uniaxial utilizada no grupo de ensaios C23S300.



Figura 3.7 – Bastidor de ensaios à compressão uniaxial utilizados nos grupos de ensaios C23S200, C16S200 e C16S300, e nos restantes provetes da 2ª e 3ª fases do programa experimental.

Dado que na maior parte dos provetes a sua rotura foi do tipo explosivo, principalmente nos de maior  $\rho_f$ , por motivos de segurança foi colocada uma estrutura de protecção em rede metálica, com a configuração indicada na Figura 3.7 e na Figura 3.9.

A extensão axial do provete e a rotação do prato superior foram medidas por intermédio de três LVDTs de  $\pm 20$  mm de campo colocados a  $120^\circ$  entre si (ver Figura 3.8). Estes LVDTs mediram os deslocamentos entre os pratos da prensa, tendo a extensão sido obtida dividindo o deslocamento ocorrido no eixo do provete pela altura do provete, Zangelmi [1999].

Todos os provetes sujeitos a carregamentos monotónicos foram ensaiados sob controlo de deslocamento, à velocidade de  $5 \mu\text{m/s}$  utilizando-se para tal o deslocamento lido num LVDT de 20 mm de campo e 0.05% de linearidade (ver Figura 3.9). O ensaio terminava quando o limite máximo do cursor do LVDT de controlo era atingido. Os provetes sujeitos a carregamento cíclico foram ensaiados sob controlo de força à velocidade de  $15 \text{ kN/s}$ .

Como os pratos da prensa deformam-se menos que o betão do provete, desenvolve-se atrito entre os pratos e a superfície de contacto do provete, introduzindo um estado multiaxial de tensões no betão das zonas de contacto do provete com os pratos, responsável pela introdução de algum confinamento no betão dessas zonas. Para diminuir este efeito, entre a base do provete e o prato da prensa de suporte do provete foram colocadas duas folhas de teflón de 0.1 mm de espessura, entre as quais foi aplicado óleo.

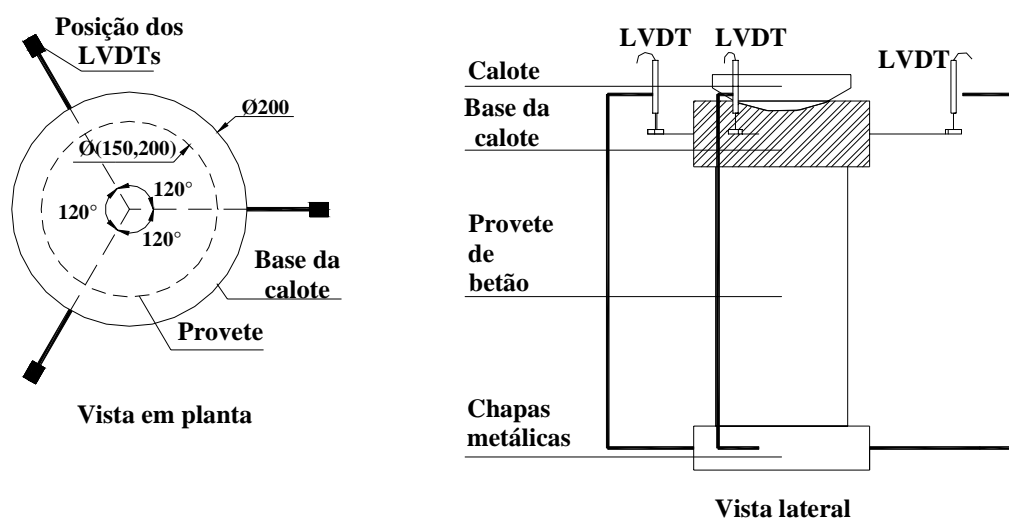


Figura 3.8 – Posição dos 3 LVDTs.

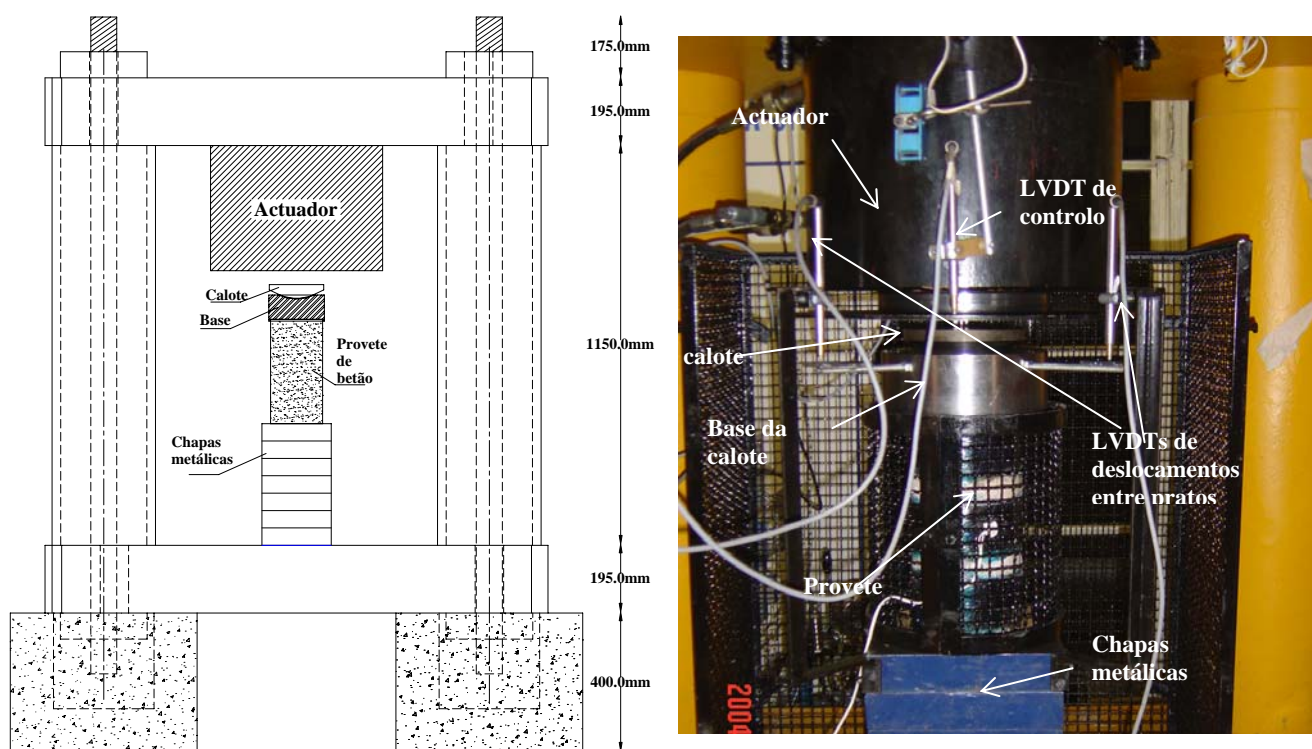


Figura 3.9 – Esquema do equipamento de ensaio.

### 3.3 INSTRUMENTAÇÃO

Nos ensaios monotônicos, as extensões ocorridas no CFRP foram determinadas por aplicação de extensómetros (SG) segundo a disposição indicada na Figura 3.10a (ensaios da primeira fase) e Figura 3.10b (ensaios da segunda fase). Assim, nos provetes que dispunham de uma faixa de manta a meia altura do provete, apenas esta faixa foi instrumentada com um extensómetro no centro da faixa. Nos restantes casos, foi colocado um extensómetro em cada uma das duas faixas centrais simetricamente dispostas em relação à meia altura do provete. Nos ensaios cíclicos, apresentados no capítulo 6, os extensómetros foram colocados segundo a disposição apresentada na Figura 3.10c. Os extensómetros foram colados na face exterior da camada mais externa, no sentido das fibras. Os extensómetros aplicados são da marca Tokyo Sokki Kenkyujo, tipo BFLA-5-8 de  $120 \Omega$  de resistência e com 5 mm de comprimento. Nos provetes de betão armado (segunda e terceira fase), dois varões de aço foram instrumentados com extensómetros (SG) com indicado na Figura 3.10b e Figura 3.10c. Os extensómetros foram colocados em lados opostos e virados para a face exterior do provete.

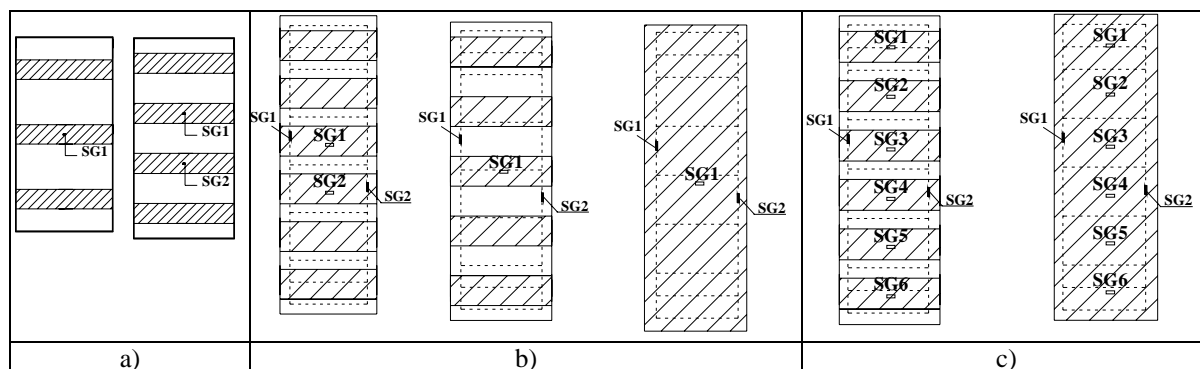


Figura 3.10 – Disposição dos extensómetros.

A Figura 3.11 mostra o procedimento de colagem do extensómetro à manta de CFRP.



Aplicação do extensómetro

Soldagem do extensómetro aos terminais

Fixação dos terminais ao provete

Figura 3.11 – Aplicação dos extensómetros nas faixas de CFRP.

Alguns dos provetes ensaiados na segunda fase do trabalho experimental (ver Tabela 3.15) foram instrumentados com strain gauges e com extensómetros de fibra óptica, designados por

“fiber Bragg grating strain gauges”, tendo-se adoptado a sigla FBG-SG para sua identificação (ver Figura 3.12).

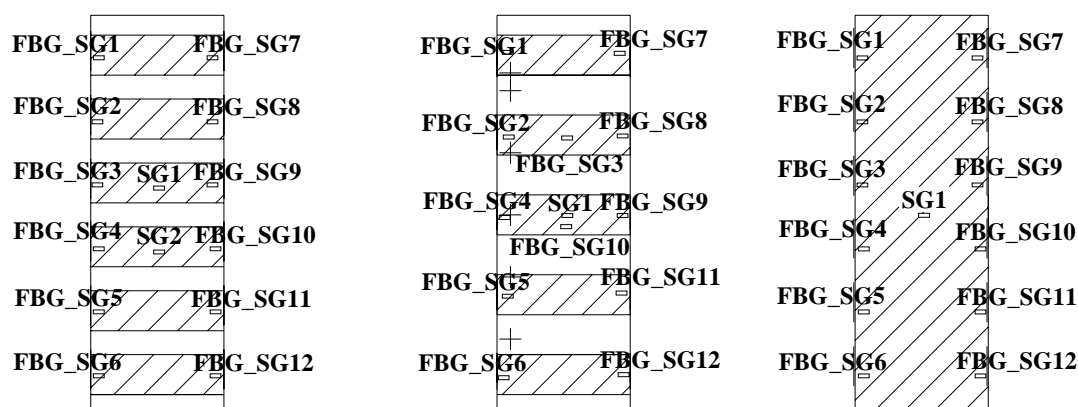


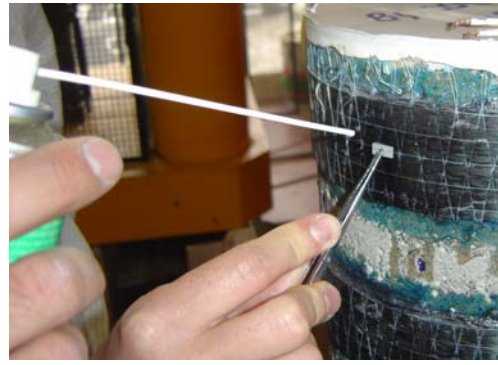
Figura 3.12 – Disposição dos extensómetros de fibra óptica.

Os extensómetros de fibra óptica aplicados tinham 10 mm de comprimento e 125  $\mu\text{m}$  de diâmetro, tendo sido fabricados pela empresa FiberSensing – Sistemas Avançados de Monitorização, S.A. O módulo de elasticidade dos extensómetros de fibra óptica é de 70 GPa. As propriedades, a técnica de fabrico e as áreas de aplicação dos extensómetros de fibra óptica estão em Ferreira et al. [2004].

A aplicação de extensómetros de fibra óptica colados exteriormente no CFRP é uma técnica em desenvolvimento, pelo que houve a necessidade de ultrapassar algumas dificuldades que foram surgindo ao longo do trabalho, nomeadamente ao nível do sistema de aquisição de dados e da colagem do extensómetro ao CFRP. Devido à irregularidade da manta, o extensómetro rompia prematuramente. Este problema foi ultrapassado através da aplicação de uns suportes em alumínio onde os extensómetros são colados evitando assim o seu contacto directo com a manta. A Figura 3.13 mostra o procedimento de colagem do extensómetro de fibra óptica à manta de CFRP efectuado pelos técnicos da empresa FiberSensing. A aplicação de extensómetros de fibra óptica colados exteriormente ao CFRP permitiu obter um conjunto de informação adicional sobre o comportamento da manta de fibra de carbono mas, devido ao elevado custo da instrumentação, apenas alguns provetes foram instrumentados. No entanto, todos os provetes foram instrumentados com, pelo menos, um ou dois extensómetros eléctricos (SG) consoante o tipo de configuração de confinamento. Na Tabela 3.15 estão indicados os provetes instrumentados com extensómetros de fibra óptica.



Aplicação dos suportes em alumínio



Colagem do extensómetro de fibra óptica



Aspecto final do extensómetro de fibra óptica



Sistema de aquisição de dados

Figura 3.13 – Aplicação dos extensómetros de fibra óptica às faixas de CFRP.

Tabela 3.15 – Provetes instrumentados com extensómetros de fibra óptica

Tipo de série	Designação do provetes
C32S200φ10	W45S5L3
	W60S5L5
C32S300φ8	W60S6L3_1
	W60S6L3_2
	W600S1L3
	W600S1L5
C32S300φ10	W45S5L5
	W60S5L3
	W60S5L5
	W600S1L3
	W600S1L5

## CAPÍTULO 4

---

### SELECÇÃO DE SISTEMAS DE CONFINAMENTO EFECTIVO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os principais resultados relativos à primeira fase do programa experimental, o qual tinha como principal objectivo seleccionar sistemas de confinamento discreto, cujo desempenho em termos de aumento de capacidade de carga última e de absorção de energia, bem como de custo de aplicação, pudessem competir com os sistemas de confinamento contínuo. Para tal, foram concebidos 156 provetes em betão simples de 300 mm de altura e 150 mm de diâmetro, reforçados parcial ou totalmente com fibras de carbono (CFRP), segundo as várias configurações apresentadas nas Tabelas 3.3 à Tabela 3.5.

O programa experimental desta fase é constituído por quatro grupos, tal como foi referido no capítulo 3, consoante o tipo de betão e o tipo de manta aplicada no confinamento. Apenas será apresentada uma síntese dos resultados obtidos, bem como as curvas tensão versus extensão axial nos LVDTs e nos extensómetros. A apresentação pormenorizada dos resultados obtidos encontra-se em Ferreira e Barros [2004].

#### 4.1 ENSAIOS DO GRUPO C23S300

As séries do grupo C23S300 representam os ensaios realizados em provetes de betão com uma resistência média à compressão, aos 28 dias, de 23 MPa. Os provetes deste grupo foram reforçados com manta de CFRP designada comercialmente por CF130 S&P 240 com 300 g/m<sup>2</sup> e uma espessura de 0.176 mm.

Na Figura 4.1 representa-se a relação entre a tensão e a extensão axial dos provetes das séries W15S1 e W15S5. Nestas séries não foi possível obter a relação entre a tensão e a extensão na manta de CFRP, dado não terem sido colocados extensómetros nas mantas de CFRP.

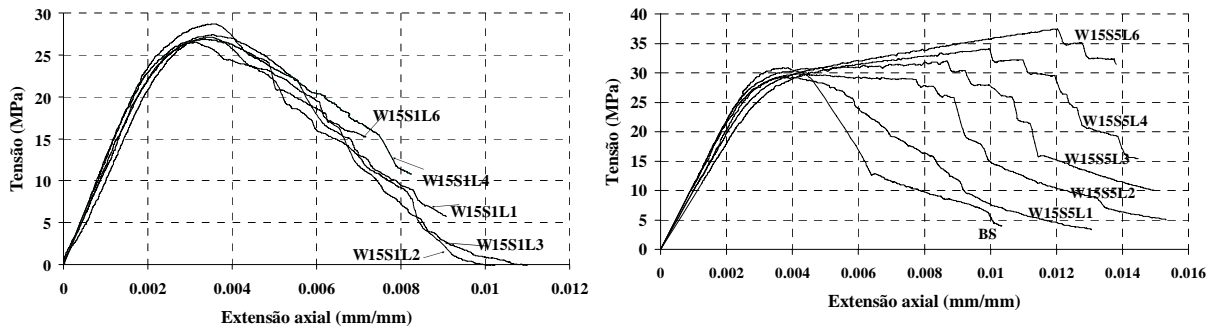


Figura 4.1 – Curvas tensão versus extensão axial nas séries W15S1 e W15S5 do grupo C23S300.

Na Figura 4.2 representam-se as curvas que relacionam a tensão, quer com a extensão axial do provete, quer com a extensão na manta de CFRP (na direcção das fibras), nas restantes séries deste grupo de ensaios.

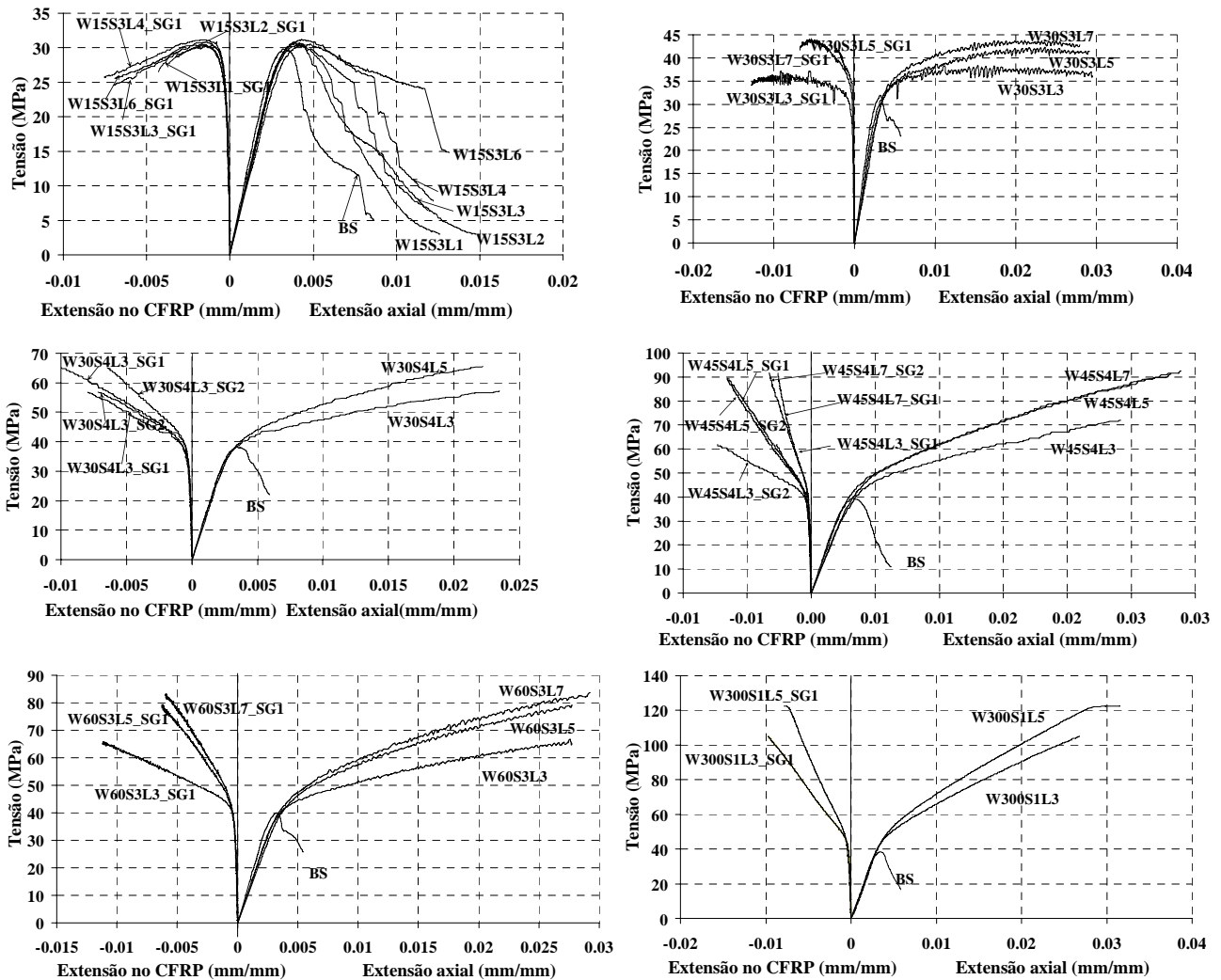


Figura 4.2 – Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries: W15S3; W30S3; W30S4; W45S4; W60S3; W300S1 do grupo C23S300.

Cada uma das curvas das Figura 4.1 e Figura 4.2 representa a média das respostas registadas em três provetes. A tensão é o cociente entre a força aplicada no provete e a secção

transversal deste. Para facilitar a exposição gráfica dos resultados, foram atribuídos os sinais positivo e negativo às extensões axial e no CFRP, respectivamente.

Os principais indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento utilizados, para os ensaios do grupo C23S300, estão incluídos na Tabela 4.1, onde  $f_{cc}$  é a tensão máxima de compressão (nas séries de provetes de betão simples (BS)  $f_{cc}$  representa o valor máximo da resistência à compressão,  $f_{co}$ , registado nessas séries),  $\varepsilon_{co}$  é a extensão axial do provete correspondente a  $f_{co}$ ,  $\varepsilon_{cc}$  é a extensão axial correspondente a  $f_{cc}$  (nas séries de provetes de BS  $\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co}$ ),  $\varepsilon_{fmax}$  é a extensão máxima no CFRP,  $\varepsilon_{fu}$  é a extensão de rotura do CFRP,  $\varepsilon_{f,r}$  é a extensão de referência no CFRP no provete onde foi registada a menor extensão axial final ( $\varepsilon_{axial}^I$ ) de uma determinada série de provetes e  $\varepsilon_{fl}$  é a extensão no CFRP correspondente a  $\varepsilon_{axial}^I$  (ver Figura 4.4). Cada um dos valores indicados nestas tabelas representa a média dos resultados registados nos três provetes que constituem cada série. O cociente entre  $\varepsilon_{cc}$  e  $\varepsilon_{co}$  representa o índice de ductilidade. A variação de W, S e L conduziu a provetes com diferente percentagem do coeficiente volumétrico de confinamento  $\rho_f$ , dado por

$$\rho_f = 4 \frac{S \times W \times L \times e}{D \times H}$$

em que  $e$  é a espessura efectiva da manta,  $D$  e  $H$  são o diâmetro e a altura do provete de betão, respectivamente. Para uma melhor interpretação das designações atrás citadas são apresentadas as Figura 4.3 e Figura 4.4.

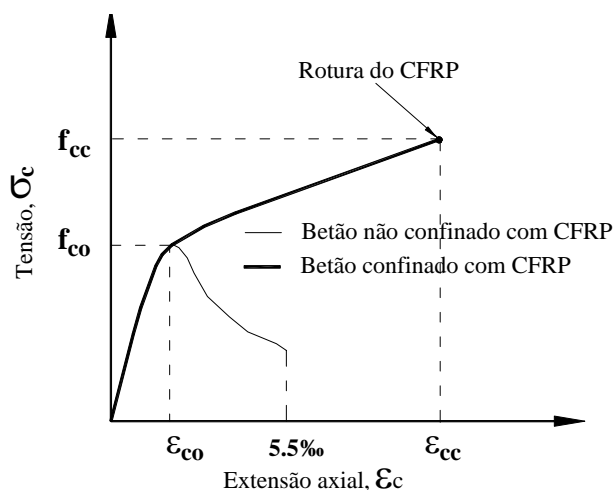


Figura 4.3 – Gráfico tipo tensão-extensão.

Os resultados incluídos na Tabela 4.1 são referentes a várias amassaduras em que os resultados da resistência média à compressão aos 28 dias  $f_{cm}$  variaram entre 20.66 MPa e 24.29 MPa. Também está indicado na tabela a idade dos provetes, em dias, à data do ensaio.

Tabela 4.1 – Indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento referentes ao grupo de ensaios C23S300

Designação do provete	S	Idade provete	Tipo manta	L	$\rho_f$ [%]	$f_{cc}$ (MPa)	$f_{cc}/f_{co}$	$\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$	$\varepsilon_{jmax}/\varepsilon_{ju}$	$\varepsilon_{jl}/\varepsilon_{jl,r}$	
Betão simples	-			-	-	-	-	-	-	-	
W15S1L1	1		S&P C-240 (300g/m <sup>2</sup> )	1	0.02	27.46	-	-	-	-	
W15S1L2				2	0.05	27.12	-	-	-	-	
W15S1L3				3	0.07	26.48	-	-	-	-	
W15S1L4				4	0.09	26.86	-	-	-	-	
W15S1L6				6	0.14	28.68	-	-	-	-	
Betão simples				-			0		28.5 ( $f_{co}$ )	1.0	1.0
W15S3L1	3	57 (dias)	S&P C-240 (300g/m <sup>2</sup> )	1	0.07	30.6	1.07	1.20	0.284		
W15S3L2				2	0.14	30.3	1.06	1.28	0.245		
W15S3L3				3	0.22	30.4	1.07	1.22	0.454		
W15S3L4				4	0.28	31.2	1.09	1.32	0.493		
W15S3L6				6	0.42	30.5	1.07	1.51	0.556		
Betão simples				-			0		30.8 ( $f_{co}$ )	1.0	1.0
W15S5L1	5	101 (dias)	S&P C-240 (300g/m <sup>2</sup> )	1	0.12	29.2	0.95	1.03	-	-	
W15S5L2				2	0.24	29.8	0.97	1.05	-	-	
W15S5L3				3	0.35	32.00	1.04	2.21	-	-	
W15S5L4				4	0.47	34.0	1.10	2.55	-	-	
W15S5L6				6	0.70	37.4	1.21	3.08	-	-	
Betão simples				-			0		32.7 ( $f_{co}$ )	1.0	1.0
W30S3L3	3	124 (dias)	S&P C-240 (300g/m <sup>2</sup> )	3	0.42	38.85	1.19	2.94	0.825	1.41	
W30S3L5				5	0.70	42.04	1.28	6.21	0.161	0.30	
W30S3L7				7	0.98	43.46	1.33	6.33	0.438	1.00	
Betão simples	-			0		38.8 ( $f_{co}$ )	1.0	1.0	-	-	
W30S4L3	4	128 (dias)	S&P C-240 (300g/m <sup>2</sup> )	3	0.56	57.48	1.48	6.9	0.517	0.78	
										0.465	1.07
W30S4L5				5	0.94	65.76	1.70	6.5	0.652	1.00	
								0.422	1.00		
Betão simples	-			0		39.2 ( $f_{co}$ )	1.0	1.0		-	
W45S4L3	4	145 (dias)	S&P C-240 (300g/m <sup>2</sup> )	3	0.85	71.99	1.84	7.24	0.175	1.00	
										0.475	1.00
W45S4L5				5	1.41	91.05	2.33	8.45	0.422	0.75	
										0.431	1.43
W45S4L7				7	1.97	91.85	2.35	8.69	0.167	0.32	
								0.212	0.68		
Betão simples	-			0		40.0 ( $f_{co}$ )	1.0	1.0		-	
W60S3L3	3	172 (dias)	S&P C-240 (300g/m <sup>2</sup> )	3	0.85	65.87	1.65	8.32	0.727	1.00	
W60S3L5				5	1.41	79.28	1.98	8.36	0.409	0.56	
W60S3L7				7	1.97	83.72	2.09	8.80	0.394	0.53	
Betão simples	-			0		38.0 ( $f_{co}$ )	1.0	1.0		-	
W300S1L3	-	111 (dias)	S&P C-240 (300g/m <sup>2</sup> )	3	1.41	105.08	2.76	7.45	0.631	1.00	
W300S1L5	-			5	2.35	122.45	3.22	8.77	0.508	0.72	

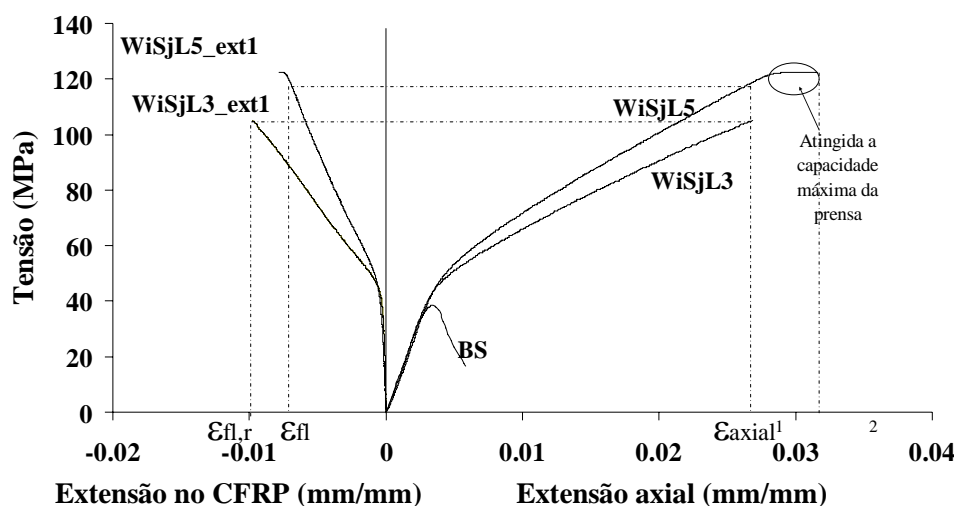


Figura 4.4 – Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP para um provete tipo.

Da análise dos valores incluídos na Tabela 4.1 e dos gráficos das Figura 4.1 e Figura 4.2 (grupo C23S300) podem extrair-se as seguintes observações:

- verifica-se que o sistema de confinamento aplicado na série W15S1 é ineficaz, e o adoptado na série W15S3 proporciona aumento da capacidade de absorção de energia do betão, mas a capacidade de carga não é aumentada, isto é, todos os provetes revelam uma fase de amolecimento. Na Figura 4.1 constata-se que, após a extensão de pico da série de provetes de BS, os provetes da série W15S5 com um número de camadas superior a três apresentaram um ramo de "endurecimento". Na série W15S3, a extensão no CFRP apenas está representada até à rotura da cinta. No entanto, os ensaios não foram interrompidos dado os provetes apresentarem alguma capacidade de carga, mesmo após rotura da cinta (ver Figura 4.2);
- nos provetes confinados com faixas de largura superior a 15 mm, além do aumento significativo da capacidade de absorção de energia, a carga máxima também aumentou. Os provetes confinados com três faixas de 30 mm de largura (W30S3), (ver Figura 4.2), apresentaram um comportamento "pseudo-plástico", dado que a capacidade de carga aumentou suavemente até à rotura do provete (extensão axial máxima de aproximadamente 30%). Nesta série, o aumento da capacidade de carga foi mais significativo na passagem de três para cinco camadas de CFRP do que na passagem de cinco para sete camadas. Por sua vez, as extensões no CFRP diminuíram com o aumento do número de camadas;
- nos provetes confinados com quatro faixas de 30 mm de largura (W30S4), (ver Figura 4.2), a rigidez da resposta deformacional, após a extensão de pico da correspondente

série de provetes de BS, aumentou significativamente com o número de camadas de CFRP. As extensões nas faixas centrais dos provetes confinados com três camadas por faixa foram semelhantes, tendo alcançado um valor máximo próximo dos 7.6‰, o que corresponde a aproximadamente 50% de  $\varepsilon_{fu}$ . Nos provetes com cinco camadas por faixa, na faixa logo acima do plano de simetria transversal do provete (SG1, ver Figura 3.10) foram registadas extensões superiores às obtidas na faixa logo abaixo daquele plano (SG2), devido à maior deformabilidade transversal ocorrida na parte superior dos provetes desta série. Na faixa superior foi alcançada uma extensão máxima próxima de 65% de  $\varepsilon_{fu}$ ;

- na série de provetes W45S4, isto é, nos provetes com quatro faixas de 45 mm de largura, registou-se um comportamento similar ao dos provetes da série W30S4. No entanto, a série W45S4 permitiu maiores aumentos de carga e de absorção de energia. Acima de cinco camadas os benefícios são diminutos, quer em termos de capacidade de carga, quer em termos de absorção de energia. As extensões das faixas de CFRP diminuíram com o aumento do número de camadas, tendo as extensões nas faixas acima e abaixo do plano de simetria transversal do provete sido praticamente iguais nos provetes reforçados com cinco e sete camadas, enquanto nos provetes reforçados com três camadas, as extensões na faixa acima daquele plano voltaram a ser superiores às extensões registadas na faixa abaixo do referido plano. A extensão máxima no CFRP foi aproximadamente 48% de  $\varepsilon_{fu}$ ;
- nas séries de igual percentagem de confinamento, como é o caso das séries W45S4 e W60S3, o confinamento foi mais efectivo nas séries confinadas com faixas de 45 mm de largura do que nas séries confinadas com faixas de 60 mm de largura, ou seja, verificaram-se maiores aumentos da tensão máxima nas séries que dispunham de menor espaço livre entre as faixas;
- nas séries em que os provetes foram envolvidos em toda a sua altura com manta de CFRP (W300S1) verificou-se que, a partir de cinco camadas, o acréscimo de carga e de capacidade de absorção de energia é marginal. Nestas séries também se verificou uma diminuição da extensão máxima no CFRP com o número de camadas de manta aplicadas;
- em termos do parâmetro  $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$  verifica-se que aumenta com a percentagem de confinamento. Até  $\rho_f = 0.2$  o aumento foi inferior a três, tendo aumentando

significativamente para  $\rho_f$  superior a 0.2, com valores a variar de 3 a 20. De sublinhar que, por limitação de capacidade de carga da prensa, em algumas séries não foi possível alcançar a rotura dos correspondentes provetes, pelo que, nestas séries, o valor daquele parâmetro teria sido superior caso tivesse sido possível levar esses provetes à rotura;

- nos ensaios efectuados a extensão máxima no CFRP variou entre 16% a 85% da extensão de rotura do CFRP. A série com resultados mais homogéneos foi a W30S4, com variação entre 46% e 65% de  $\varepsilon_{fu}$ . De notar que os valores registados dependem significativamente dos modos de rotura ocorridos, dado que as extensões registadas apenas representam o estado de extensão da zona onde os extensómetros ficaram colados;
- nas séries W300S1 o aumento da capacidade de carga foi de 176% e de 222% para provetes com três e cinco camadas por faixa, respectivamente;
- nas séries W300S1 o valor máximo do parâmetro  $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$  foi da ordem de 9;
- neste grupo de ensaios o parâmetro  $\varepsilon_{fl}/\varepsilon_{fl,r}$  não apresentou uma tendência clara de variação com  $\rho_f$ , dado que os distintos modos de rotura ocorridos condicionaram significativamente o valor daquele parâmetro. No entanto, nas séries W45S4, W60S3 e W300S1 verificou-se a tendência de  $\varepsilon_{fl}/\varepsilon_{fl,r}$  diminuir com  $\rho_f$ ;
- após a análise dos resultados obtidos nas séries do grupo C23S300 verificou-se que acima de cinco camadas de CFRP o acréscimo de carga e de capacidade de absorção de energia é marginal. Também se verificou que a eficácia em termos de confinamento é diminuta para arranjos com faixas de largura inferior a 45 mm. Assim, nos restantes grupos de ensaios apenas se efectuaram séries com provetes reforçados com três e cinco camadas e com faixas de largura de 45, 60 e 300 mm.

## 4.2 ENSAIOS DO GRUPO C23S200

As séries do grupo C23S200 representam os ensaios realizados em provetes de betão com resistência média à compressão, aos 28 dias, de 23 MPa. Os provetes neste grupo foram reforçados com manta de CFRP designada comercialmente por CF120 S&P 240 com 200 g/m<sup>2</sup> e 0.113 mm de espessura efectiva.

Na Figura 4.5 representa-se a relação entre a tensão e a extensão axial do provete, bem como com a extensão axial no CFRP.

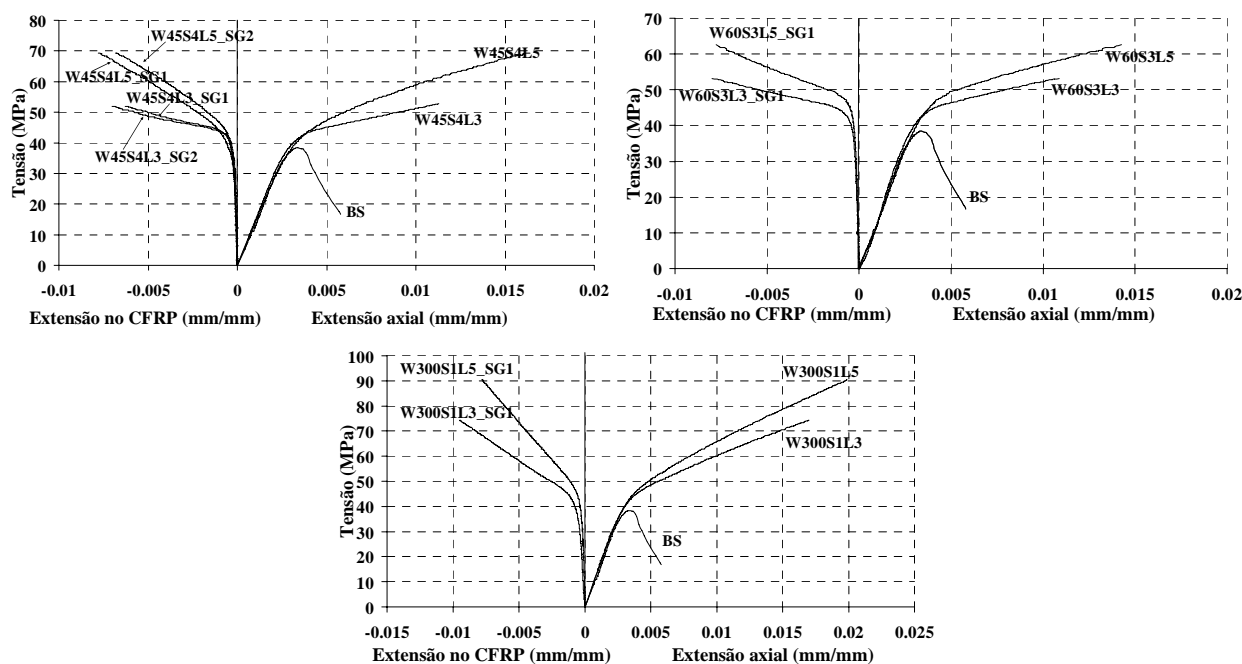


Figura 4.5 – Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries: a) W45S4; b) W60S3; c) W300S1 do grupo C23S200.

Na Tabela 4.2 apresentam-se os valores dos indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento do grupo de ensaios C23S200.

Tabela 4.2 – Indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento referentes ao grupo de ensaios C23S200

Designação do provete	S	Idade provetes	Tipo manta	L	$\rho_f$ [%]	$f_{cc}$ (MPa)	$f_{cc}/f_{co}$	$\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$	$\varepsilon_{fmax}/\varepsilon_{fu}$	$\varepsilon_f/\varepsilon_{f,r}$
Betão simples	-	515 (dias)	S&P C-240 (200 g/m <sup>2</sup> )	0	-	38.4( $f_{co}$ )	1.0	1.0	-	-
W45S4L3	4			3	0.54	52.76	1.37	3.14	0.408	1.00
W45S4L5				5	0.90	69.37	1.81	4.55	0.506	0.85
W60S3L3	3			3	0.56	53.13	1.38	3.21	0.518	1.00
W60S3L5				5	0.90	62.63	1.60	4.22	0.504	0.74
W300S1L3	1			3	0.90	74.22	1.93	5.02	0.615	1.00
W300S1L5				5	1.51	90.52	2.36	5.89	0.506	0.70

Da análise dos valores incluídos na Tabela 4.2 e dos gráficos da Figura 4.5 podem apontar-se as seguintes observações:

- o aumento da capacidade de carga nos provetes totalmente confinados (W300S1) foi de 93% e de 136% nos provetes com três e cinco camadas, respectivamente;
- o valor máximo do parâmetro  $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$  foi próximo de 6;

- a extensão máxima no CFRP variou entre 41% a 62% da sua extensão de rotura;
- da análise da variação do parâmetro  $\varepsilon_{fl}/\varepsilon_{fl,r}$  com o aumento de  $\rho_f$  verifica-se que as extensões no CFRP diminuem com o aumento da percentagem de confinamento;
- os provetes das séries W45S4L3 e W60S3L3 apresentaram comportamento similar; Apesar de as séries W45S4L5 e W60S3L5 terem igual  $\rho_f$ , a primeira apresentou maior aumento de capacidade de carga e de absorção de energia do que a segunda.

### 4.3 ENSAIOS DO GRUPO C16S200

As séries do grupo C16S200 representam os ensaios realizados em provetes de betão com resistência média à compressão, aos 28 dias, de 16 MPa. Os provetes deste grupo foram confinados com manta de CFRP designada comercialmente por CF120 S&P 240 com 200 g/m<sup>2</sup> e 0.113 mm de espessura efectiva.

Na Figura 4.6 representa-se a relação da tensão de compressão no betão quer com a extensão axial do provete como com a extensão no CFRP.

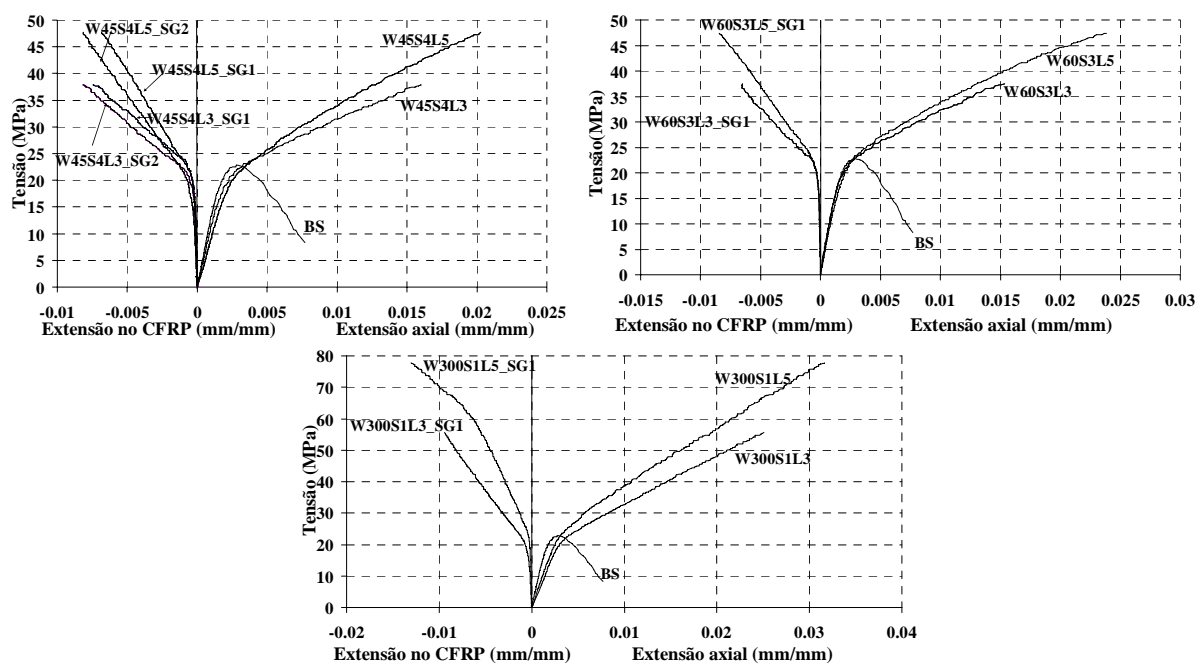


Figura 4.6 – Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries: a) W45S4; b) W60S3; c) W300S1 do grupo C16S200

Na Tabela 4.3 apresentam-se os valores dos indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento do grupo de ensaios C16S200.

Tabela 4.3 – Indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento referentes ao grupo de ensaios C16S200

Designação do provete	S	Idade provete	Tipo manta	L	$\rho_f$ [%]	$f_{cc}$ (MPa)	$f_{cc}/f_{co}$	$\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$	$\varepsilon_{fmax}/\varepsilon_{fu}$	$\varepsilon_f/\varepsilon_{f,r}$
Betão simples $f_{cm} = (28d)$	-	42 (dias)	S&P C-240 (200g/m <sup>2</sup> )	0		22.79( $f_{co}$ )	1.0	1.0		-
W45S4L3	4			3	0.54	37.85	1.66	5.70	0.482	1.00
									0.532	1.00
W45S4L5	4			5	0.90	47.69	2.09	7.20	0.444	0.74
									0.529	0.83
W60S3L3	3			3	0.56	37.42	1.64	5.46	0.424	1.00
W60S3L5				5	0.90	47.40	2.08	8.48	0.550	0.91
W300S1L3	1			3	0.90	55.66	2.44	8.92	0.610	1.00
W300S1L5				5	1.51	77.75	3.41	11.24	0.85	0.92

Da análise dos valores incluídos na Tabela 4.3 e dos gráficos da Figura 4.6 podem sintetizar-se as seguintes observações:

- na série W300S1 o aumento da capacidade de carga foi de 144% e de 241% nos provetes com três e cinco camadas, respectivamente;
- o valor máximo do parâmetro  $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$  foi da ordem de 11;
- a extensão máxima no CFRP variou entre 42% e 85% da sua extensão de rotura;
- tal como no anterior grupo de ensaios,  $\varepsilon_f/\varepsilon_{f,r}$  diminuiu com o aumento de  $\rho_f$ , indicando que as extensões no CFRP diminuem com o aumento de percentagem de confinamento.
- os provetes das séries W45S4 e W60S3, com igual  $\rho_f$ , proporcionaram níveis de confinamento muito semelhantes. Para o mesmo  $\rho_f$ , a série de provetes totalmente confinados, W300S1L3, permitiu níveis de incremento de carga mais elevados que os registados nas séries W45S4L3 e W60S3L3. Na passagem de três para cinco camadas o aumento de capacidade de carga foi maior na série W300S1 do que nas séries W45S4 e W60S3.

#### 4.4 ENSAIOS DO GRUPO C16S300

As séries do grupo C16S300 representam os ensaios realizados em provetes de betão com resistência média à compressão, aos 28 dias, de 16 MPa. Os provetes deste grupo foram confinados com manta de CFRP designada comercialmente por CF130 S&P 240 com 300 g/m<sup>2</sup> e 0.176 mm de espessura efectiva.

Na Figura 4.7 representa-se a relação da tensão de compressão no betão, quer com a extensão axial do provete quer com a extensão no CFRP.

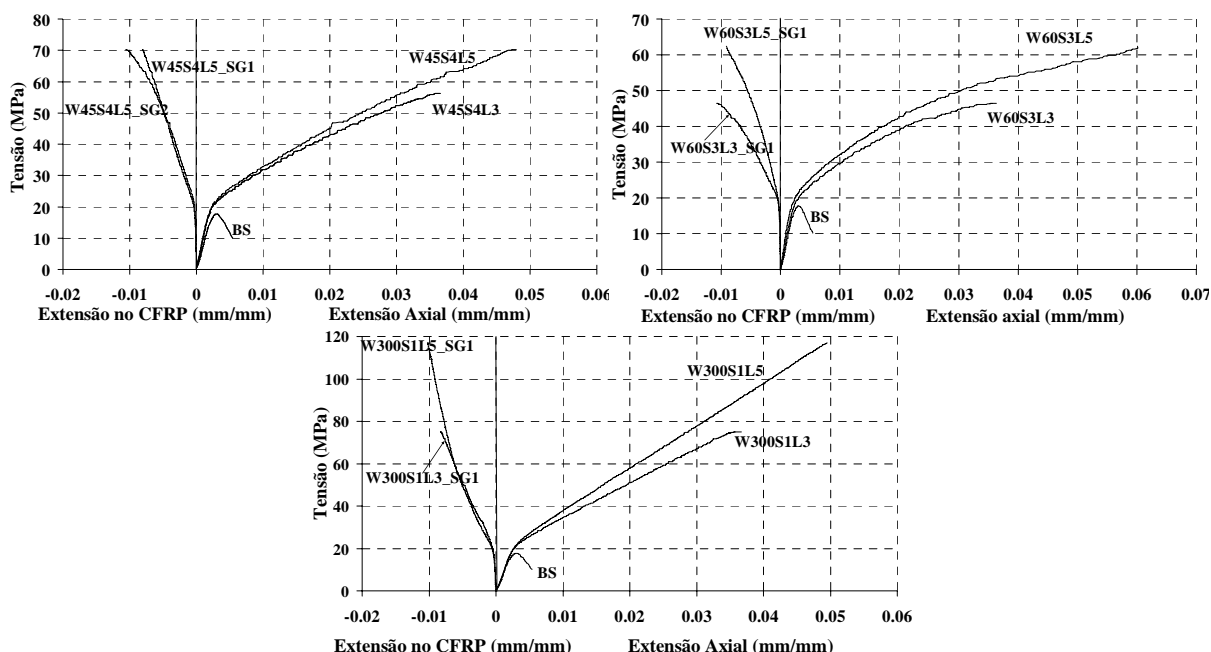


Figura 4.7 – Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries: a) W45S4; b) W60S3; c) W300S1 do grupo C16S300.

Na Tabela 4.4 apresentam-se os valores dos indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento do grupo de séries de ensaios C16S300.

Tabela 4.4 – Indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento referentes ao grupo de ensaios C16S300

Designação do provete	S	Idade provete	Tipo manta	L	$\rho_f$ [%]	$f_{cc}$ (MPa)	$f_{cc}/f_{co}$	$\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$	$\epsilon_{fmax}/\epsilon_{fu}$	$\epsilon_f/\epsilon_{f,r}$
Betão simples (fcm)	-	52 (dias)	S&P C-240 (300g/m <sup>2</sup> )	0		17.75 ( $f_{co}$ )	1.0	1.0		
W45S4L3	4			3	0.85	56.24	3.17	12.21	-	-
W45S4L5				5	1.41	70.25	3.96	16.0	0.516	-
W60S3L3	3			3	0.85	46.52	2.62	12.15	0.700	1.00
W60S3L5				5	1.41	62.41	3.52	20.08	0.590	0.59
W300S1L3	1			3	1.41	75.07	4.23	12.26	0.540	1.00
W300S1L5				5	2.35	116.88	6.58	16.54	0.661	1.02

Da análise dos valores incluídos na Tabela 4.4 e das curvas dos gráficos da Figura 4.7 podem extrair-se as seguintes observações:

- nas séries W300S1 o aumento da capacidade de carga foi de 323% e de 558% nos provetes com três e cinco camadas, respectivamente;
- o valor máximo de  $\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$  foi próximo de 20;

- a extensão máxima no CFRP ( $\varepsilon_{fmax}$ ) variou entre 54% e 70% da sua extensão de rotura;
- quanto ao parâmetro  $\varepsilon_f/\varepsilon_{f,r}$ , nesta série não se verificou a tendência observada nas duas anteriores, dado que na série W60S3 aquele parâmetro diminuiu com o aumento de  $\rho_f$ , enquanto na série W300S1 os valores daquele parâmetro foram praticamente insensíveis à variação de  $\rho_f$ ;
- as séries W45S4L3 e W60S3L3, apesar de terem igual  $\rho_f$ , a primeira apresentou maior aumento de capacidade de carga e de absorção de energia do que a segunda.

#### 4.5 CONCLUSÕES

Como principais conclusões dos resultados obtidos nestes ensaios podem salientar-se as seguintes:

- a tensão máxima registada nos provetes de betão simples (BS), isto é, não confinados, foi excedida nas séries com uma percentagem volumétrica de confinamento ( $\rho_f$ ); superior a 0.4%. Nas séries com  $\rho_f > 0.4\%$  a capacidade de carga e de absorção de energia aumentaram com o número de camadas de CFRP por faixa;
- acima de cinco camadas o incremento de capacidade de carga e de absorção de energia não foi tão significativo;
- o confinamento de provetes com faixas de largura inferior a 30 mm é ineficaz;
- em séries com a mesma percentagem de confinamento de CFRP verificou-se maiores aumentos de capacidade de carga nas que dispunham de menor espaço livre entre faixas. Tal deve-se ao facto de nestes espaços ter ocorrido grande concentração de dano no betão;
- o aumento da capacidade de carga foi maior nos provetes reforçados com a manta de rigidez mais elevada (S&P C-240 de 300 g/m<sup>2</sup>) e o confinamento foi mais efectivo nos provetes de betão de menor resistência (16 MPa);
- no que se refere à ductilidade, verificou-se a tendência de aumentar com a percentagem de CFRP.

## **CAPÍTULO 5**

---

### **CONFINAMENTO DE ELEMENTOS DE PILAR DE BETÃO ARMADO SUBMETIDOS À COMPRESSÃO MONOTÓNICA**

Após a análise dos resultados da primeira fase do programa experimental foi elaborada a segunda fase, a qual é constituída por provetes de betão armado com 600 mm de altura e 200 mm de diâmetro. A escolha da geometria dos provetes foi condicionada pelas restrições impostas pelo equipamento de ensaio disponível no laboratório de estruturas (LEST) da Universidade do Minho. O programa experimental foi organizado em grupos de séries de ensaios distintos consoante o tipo de betão, o tipo de manta e o tipo de armadura longitudinal considerada, tal como indicado no capítulo 3, tendo resultado oito grupos de séries de ensaios.

A seguir são apresentados e discutidos os principais resultados alcançados nos ensaios efectuados nesta fase do programa experimental.

#### **5.1 ENSAIOS DO GRUPO C16S200 $\phi$ 8**

As séries do grupo C16S200 $\phi$ 8 representam os ensaios realizados em provetes de betão com resistência média à compressão, aos 28 dias, de 16 MPa e armados com varões longitudinais  $\phi$ 8. Os provetes deste grupo foram confinados com manta de CFRP designada comercialmente por CF120 S&P 240, de 200 g de fibras por m<sup>2</sup> de manta e espessura de 0.113 mm.

##### **5.1.1 Curvas tensão versus extensão e síntese dos resultados mais relevantes**

Na Figura 5.1 representa-se as curvas que relacionam a tensão, quer com a extensão axial do provete, quer com a extensão da manta de CFRP. A extensão axial no provete é obtida através da leitura efectuada por 3 LVDTs colocados a 120° entre si, enquanto a

extensão axial na manta é obtida através de dois extensómetros colocados na direcção das fibras.

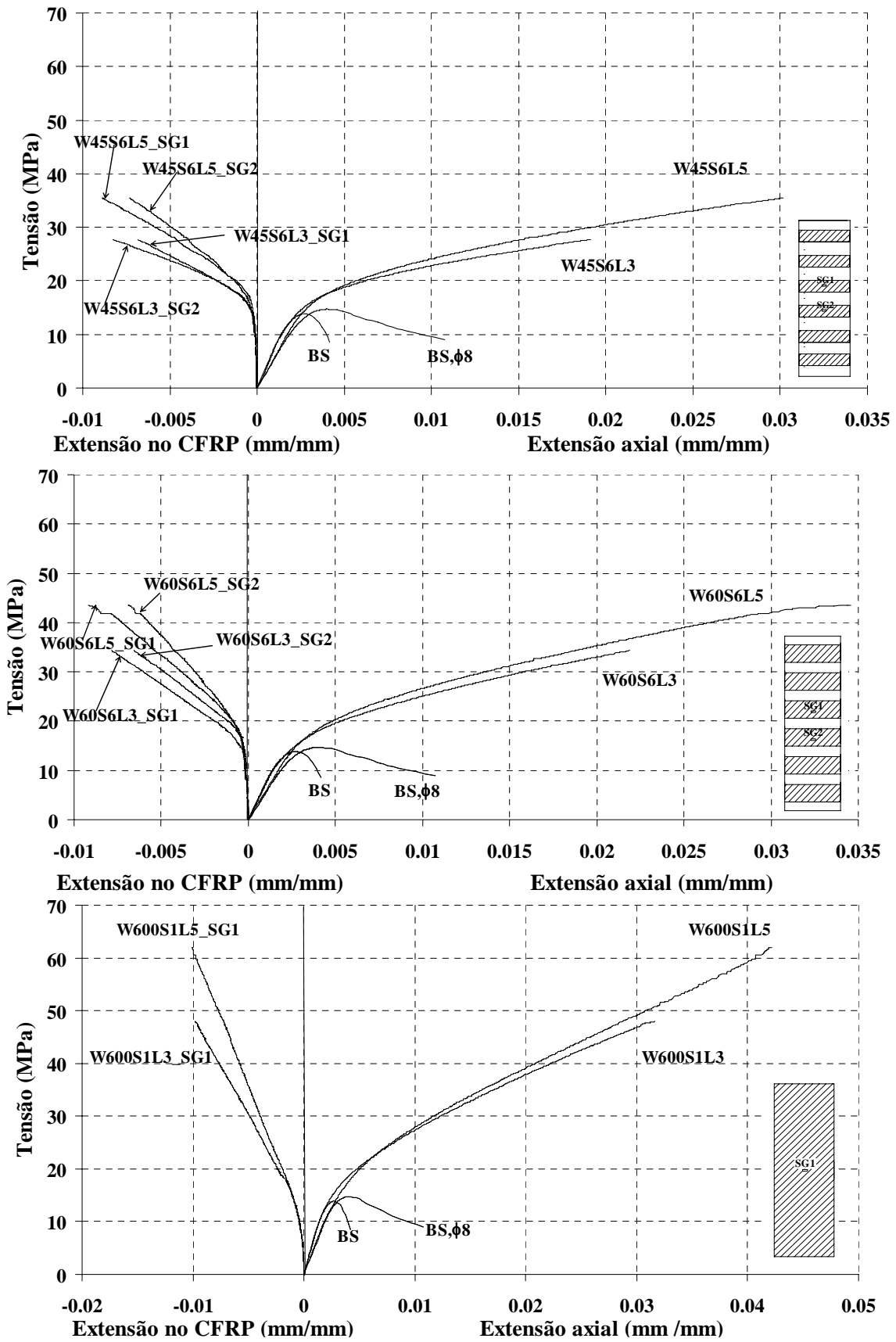


Figura 5.1 – Curvas tensão versus extensão axial para a série C16S200φ8.

Cada uma das curvas representa a média das respostas em dois provetes. A tensão é o cociente entre a força aplicada no provete e a secção transversal deste. Para facilitar a exposição gráfica foram atribuídos os sinais positivos e negativos às extensões axial e no CFRP, respectivamente.

Nos gráficos surgem duas curvas de referência, uma para o betão simples, designada por BS, que corresponde aos provetes de betão simples, e a outra designada por BS,  $\phi 8$  referente aos ensaios em provetes de betão armados longitudinalmente com  $\phi 8$ , tal como se pode observar na Figura 5.1. As restantes curvas foram designadas consoante o tipo de confinamento aplicado.

Os principais indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento utilizados, para os ensaios do grupo C16S200 $\phi 8$ , estão incluídos na Tabela 5.1, onde  $f_{cc}$  é a tensão máxima de compressão (nas séries de provetes de betão simples ((BS),  $f_{cc}$  representa a resistência à compressão,  $f_{co}$ , registada nessas séries),  $\varepsilon_{co}$  é a extensão axial do provete correspondente a  $f_{co}$ ,  $\varepsilon_{cc}$  é a extensão axial correspondente a  $f_{cc}$  (nas séries de provetes de BS,  $\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co}$ ),  $\varepsilon_{fmax}$  é a extensão máxima no CFRP,  $\varepsilon_{fu}$  é a extensão de rotura do CFRP,  $\varepsilon_{fl,r}$  é a extensão de referência no CFRP no provete onde foi registada a menor extensão axial final ( $\varepsilon_{axial}^1$ ) de uma determinada série de provetes e  $\varepsilon_{fl}$  é a extensão no CFRP correspondente a  $\varepsilon_{axial}^1$  (ver Figuras 4.3 e 4.4). Cada um dos valores indicados nestas tabelas representa a média dos resultados registados nos dois provetes que constituem cada série. O cociente entre  $\varepsilon_{cc}$  e  $\varepsilon_{co}$  representa o índice de ductilidade. A variação de W, S e L conduziu a provetes com diferente percentagem do coeficiente volumétrico de confinamento  $\rho_f$ , dada por

$$\rho_f = 4 \frac{S \times W \times L \times e}{D \times H}$$

em que  $e$  é a espessura efectiva da manta,  $D$  e  $H$  são o diâmetro e a altura do provete de betão, respectivamente.  $\varepsilon_s$  é a extensão máxima registada nos varões longitudinais. Na tabela também está indicada a idade, em dias, dos provetes à data do ensaio.

Tabela 5.1 – Indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento referentes ao grupo C16S200φ8

Desig. do provete	S	Idade provete	Tipo manta	L	$\rho_f$ [%]	$f_{cc}$ (MPa)	$\varepsilon_{cc}$	$f_{cc}/f_{co}$	$\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$	$\varepsilon_s$	$\varepsilon_{fmax}$	$\varepsilon_{fmax}/\varepsilon_{fu}$	$\varepsilon_{f1}/\varepsilon_{f1,r}$
Betão simples BS				-	-	13.87 ( $f_{co}$ )	0.003 ( $\varepsilon_{co}$ )	-	-		-	-	-
Betão simples_BS,φ8						14.71 ( $f_{co}$ )	0.004 ( $\varepsilon_{co}$ )	-	-	0.0053 (SG1)	-	-	-
										0.0258 (SG2)			
W45S6L3	6	120 (dias)	CF120 S&P C-240 (200g/m <sup>2</sup> )	3	0.31	27.68	0.019	1.88	4.75	0.0263 (SG1)	0.0069 (SG1)	0.443 (SG1)	1.0
										0.0267 (SG2)	0.0083 (SG2)	0.534 (SG2)	1.0
W45S6L5	6			5	0.51	35.50	0.030	2.41	7.50	0.0268 (SG1)	0.0089 (SG1)	0.574 (SG1)	0.88
										0.0259 (SG2)	0.0073 (SG2)	0.472 (SG2)	0.61
W60S6L3	6			3	0.41	34.36	0.022	2.34	5.50	0.0258 (SG1)	0.0078 (SG1)	0.506 (SG1)	1.0
										0.0256 (SG2)	0.0066 (SG2)	0.424 (SG2)	1.0
W60S6L5	6			5	0.68	43.53	0.035	2.96	8.75	0.0271 (SG1)	0.0092 (SG1)	0.594 (SG1)	0.79
										0.0258 (SG2)	0.0060 (SG2)	0.444 (SG2)	0.74
W600S1L3	1			3	0.68	47.93	0.032	3.26	8.00	0.0264 (SG1)	0.0098 (SG1)	0.634 (SG1)	1.0
										0.0226 (SG2)			
W600S1L5	1			5	1.13	61.98	0.042	4.21	10.5	0.026 (SG1)	0.010 (SG1)	0.65 (SG1)	0.81
										0.020 (SG2)			

Na Figura 5.2 apresenta-se as curvas tipo tensão versus extensão registadas nos extensómetros eléctricos (SG1 e SG2) colocados nos varões longitudinais de aço, (ver Figura 3.3). Os restantes gráficos são apresentados no Anexo A.

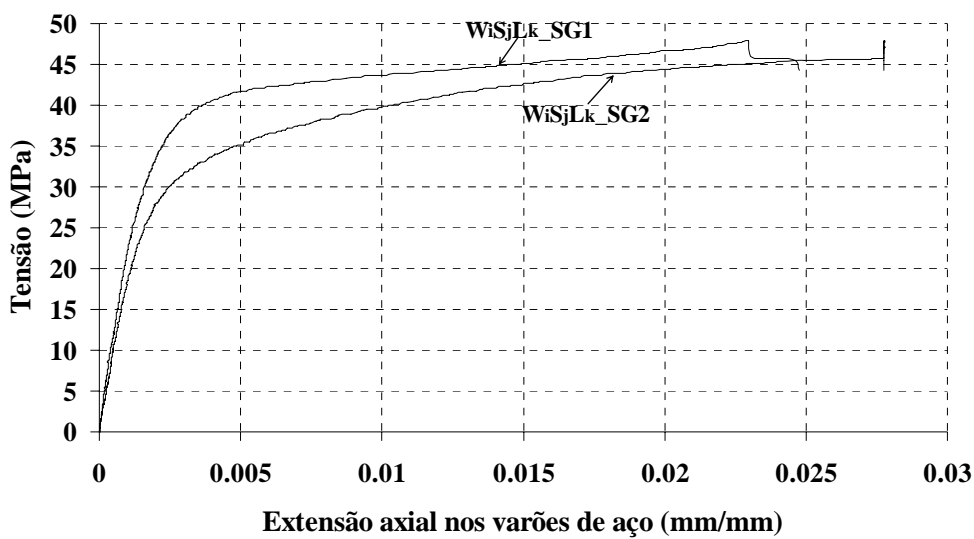


Figura 5.2 – Gráfico tipo tensão versus extensão nos varões de aço.

Da análise dos valores incluídos na Tabela 5.1 e dos gráficos das Figura 5.1 podem extrair-se as seguintes conclusões:

- comparando as séries W45S6L3 e W45S6L5, com a mesma configuração de confinamento, foram obtidos diferentes valores quer em termos de incremento de capacidade de carga quer em termos da extensão axial máxima. Estes parâmetros foram mais elevados nas séries confinadas com 5 camadas, ou seja, com uma percentagem de confinamento mais elevado. Comportamento similar foi registado nas séries W60S6 e W600S1;
- comparando séries com a mesma percentagem de confinamento, como é o caso das séries W60S6L5 e W600S1L3, verifica-se que, apesar de terem o mesmo  $\rho_f$  (0.68), registaram-se níveis diferentes de confinamento. Assim, em termos de aumento da capacidade de carga, foi mais elevado na série W600S1L3, revelando ser mais eficaz o sistema de confinamento total;
- o incremento da capacidade de carga obtido foi de 88% e de 141%, para a série W45S6 confinada com 3 e 5 camadas respectivamente. Para a série W60S6 estes valores foram de 134% e de 196%. No entanto, foi nas séries totalmente confinadas que o incremento de capacidade de carga registado foi mais elevado, com valores de 226% para os provetes confinados com 3 camadas e de 321% para provetes confinados com 5 camadas, (ver Tabela 5.1);
- em termos do parâmetro do índice de ductilidade ( $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$ ) verifica-se que aumenta com a percentagem de confinamento, tendo-se registado valores de 4.75 a 10.50;
- nos ensaios realizados a extensão máxima no CFRP variou entre 42% a 65% da extensão de rotura do CFRP,  $\varepsilon_{fu}$ . Os resultados foram bastante homogéneos em todas as séries.
- neste grupo de ensaios o parâmetro  $\varepsilon_{fl}/\varepsilon_{fl,r}$  apresentou uma tendência clara de diminuição com  $\rho_f$ , para todas as séries.

### 5.1.2 Curvas $\sigma_c/f_{co}$ versus $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$

A relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  pretende representar graficamente a eficácia, quer em termos de incremento de capacidade de carga quer em termos de incremento de ductilidade, proporcionada pelos sistemas de confinamento aplicados.  $\sigma_c$  e  $\varepsilon_c$  são a

tensão e a extensão no provete confinado e  $f_{co}$  e  $\varepsilon_{co}$  são a tensão e a extensão no provete não confinado da correspondente série.

Na Figura 5.3 representam-se as curvas  $\sigma_c/f_{co}$  versus  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  para as séries de ensaio do grupo C16S200 $\phi$ 8.

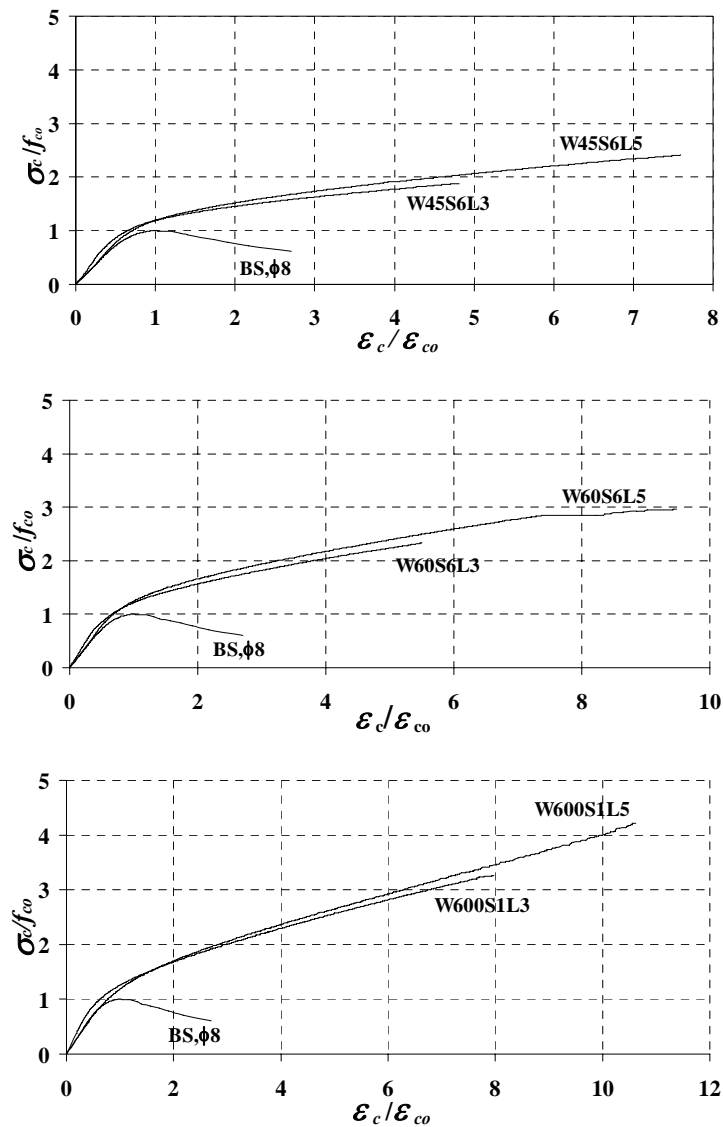


Figura 5.3 – Curvas  $\sigma_c/f_{co}$  versus  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  nas séries de ensaios do grupo C16S200 $\phi$ 8.

Estas curvas reforçam as conclusões apresentadas no ponto 5.1.2 em relação às séries de ensaios do grupo C16S200 $\phi$ 8. O aumento da capacidade de carga foi significativo tendo atingido valores 3 vezes superiores ao valor do correspondente provete sem confinamento para as séries parcialmente confinadas. No caso dos provetes totalmente confinados, o incremento de capacidade de carga foi superior 4 vezes ao valor registado nos provetes de betão simples armados com ferro de 8 mm.

Em termos de extensão axial máxima nos provetes, o sistema de confinamento da série W45S6 permitiu um aumento máximo da ordem de 7.5 vezes a extensão de pico do correspondente provete de betão armado, enquanto nos provetes da série W60S6 o aumento máximo foi da ordem dos 8.75, e nas séries totalmente confinadas o aumento máximo de  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  foi de 10.5.

### 5.1.3 Relação entre $\sigma_c/f_{co}$ e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ )

Na Figura 5.4 apresenta-se a relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e  $\rho_f$ , para diferentes estados de extensão axial relativa dos provetes confinados,  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$ , nomeadamente para,  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  de 2, 3, 4 e para a extensão máxima (max) registada em cada série de provetes. A relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e  $\rho_f$ , para diferentes  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  permite averiguar qual a eficácia dos sistemas de confinamento em termos de aumento da capacidade de carga, para distintos níveis de deformação alcançados pelos provetes confinados.

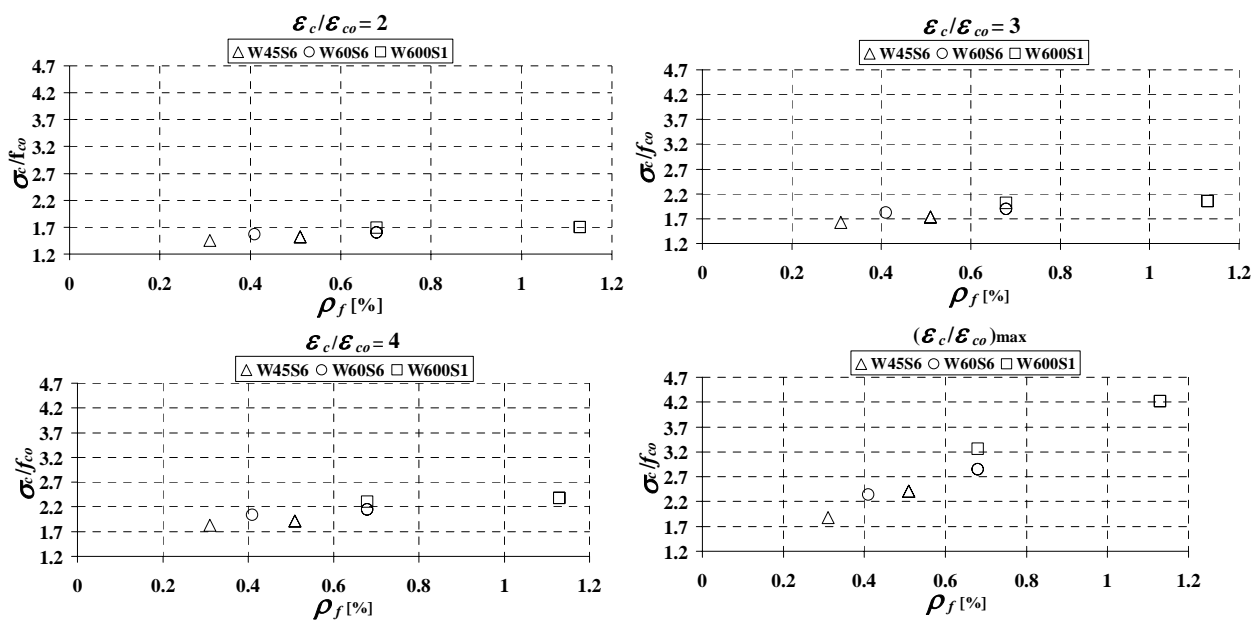


Figura 5.4 – Relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) nas séries de ensaios do grupo C16S200φ8.

Da análise dos gráficos representados na Figura 5.4 verifica-se que:

- A capacidade de carga aumentou com  $\rho_f$ ,
- Apesar de terem a mesma percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ), a série W60S6L5 registou incrementos de carga inferiores aos da série W600S1L3, isto é, o confinamento contínuo foi mais eficaz que o confinamento discreto.

### 5.1.4 Relação entre a variação de energia ( $\Delta U/U_{co}$ ) e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ )

Na Figura 5.6 representa-se a eficácia dos sistemas de confinamento em termos de capacidade de absorção de energia, avaliada a partir da relação  $\Delta U/U_{co}$  versus  $\rho_f$ , para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  de 2, 3, 4 e Max.  $\Delta U$  é o incremento de energia proporcionado pelo confinamento e  $U_{co}$  é a energia dissipada na deformação dos provetes não confinados. Para estes provetes, na avaliação de  $U_{co}$ , considerou-se para extensão última 5.5 %, (ver Figura 5.5). A energia por unidade de volume ( $U$ ) necessária para se produzir a rotura do provete sob uma carga de compressão axial é dada pela área abaixo da curva tensão-extensão axial, (ver Figura 5.5). O processo para determinar  $\Delta U$  está esquematizado na Figura 5.5, representando  $\Delta U$  o acréscimo de energia garantido pelo sistema de confinamento para extensões superiores a  $\varepsilon_{co}$ . A energia por unidade de volume acumulada até determinada extensão  $\varepsilon_{i+1}$ ,  $U_{i+1}$ , calcula-se por intermédio da seguinte expressão.

$$U_{cf,i+1} = U_{cf,i} + \frac{\sigma_{i+1} + \sigma_i}{2} \times (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i) \quad (5.1)$$

$$\Delta U = U_{cf} - U_{co} \quad (5.2)$$

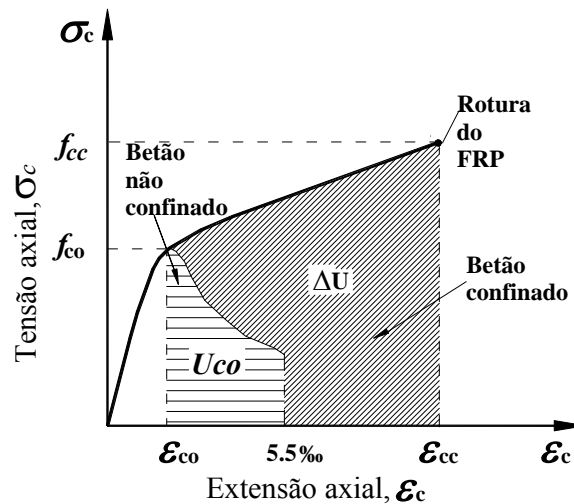


Figura 5.5 – Representação para a determinação de  $\Delta U$

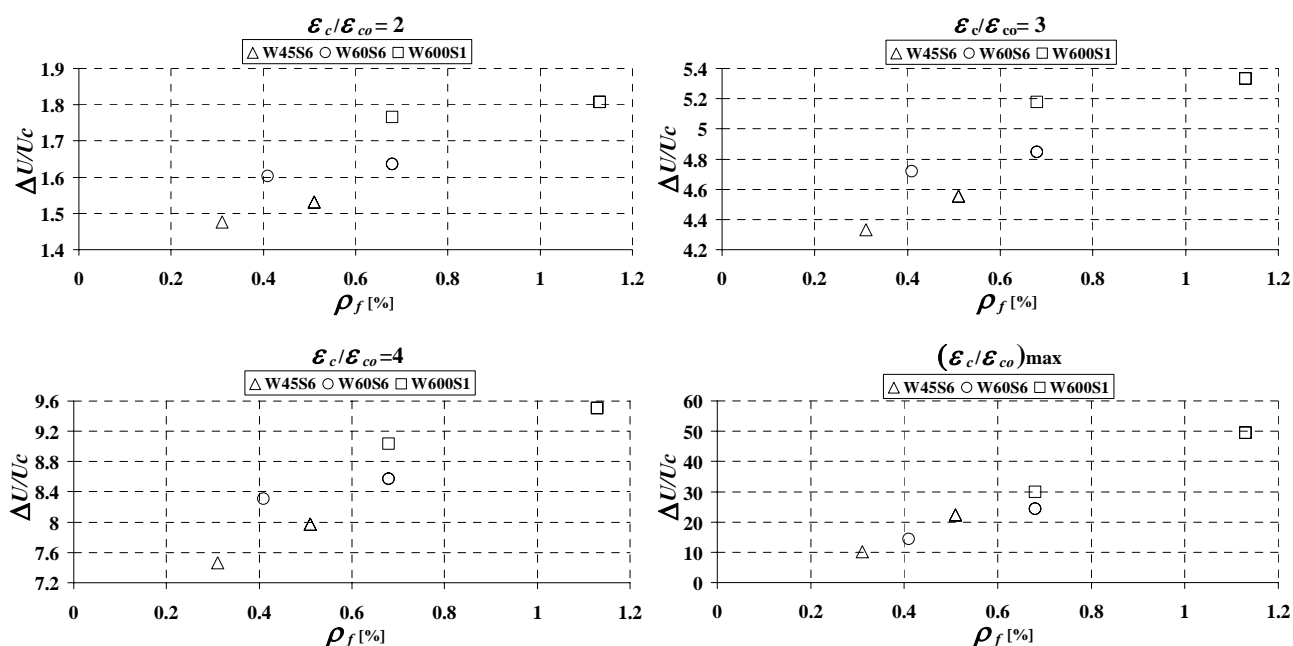


Figura 5.6 – Relação entre  $\Delta U/U_c$  e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) nas séries de ensaio do grupo C16S200 $\phi$ 8.

Da análise dos gráficos apresentados na Figura 5.6 observa-se que:

- A capacidade de absorção de energia aumenta com  $\rho_f$ ;
- Para níveis de deformação duas vezes superiores à deformação correspondente à tensão máxima dos provetes não confinados, isto é para  $\epsilon_c/\epsilon_{co}=2$ ,  $\Delta U/U_c$  é inferior a 1.7, à excepção do sistema de confinamento W600S1. Para  $\epsilon_c/\epsilon_{co}= 6$ ,  $\Delta U/U_c$  varia de 15.5 a 17.2, com  $\rho_f$  de 0.25 e 0.34, para os sistemas de confinamento parciais.
- Apesar de igual  $\rho_f$ , a série W600S1L3 é mais efectiva em termos de capacidade de absorção de energia que a série W60S6L5, revelando ser mais eficaz o aumento de  $\Delta U/U_c$  nos provetes totalmente confinados.

## 5.2 ENSAIOS DO GRUPO C16S200 $\phi$ 10

As séries do grupo C16S200 $\phi$ 10 representam os ensaios realizados em provetes de betão com uma resistência média à compressão, aos 28 dias, de 16 MPa e armados com varões longitudinais  $\phi$ 10. Os provetes deste grupo foram reforçados com manta de CFRP designada comercialmente por CF120 S&P 240 com 200 g de fibras por m<sup>2</sup> de manta e de 0.113 mm de espessura.

### 5.2.1 Curvas tensão versus extensão e síntese dos resultados mais relevantes

Na Figura 5.7 representa-se a relação entre a tensão e a extensão axial do provete, bem como com a extensão na direcção das fibras da manta de CFRP.

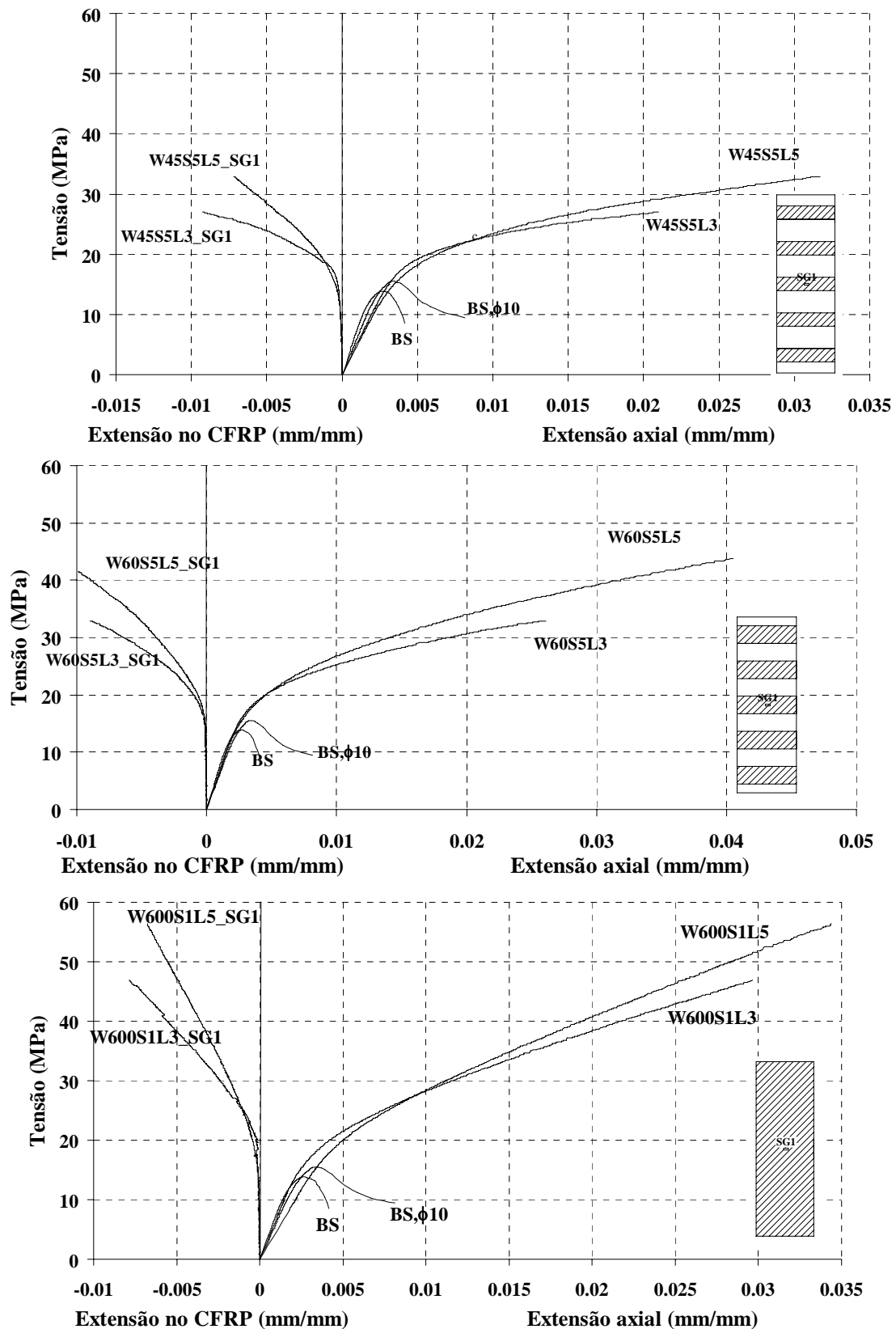


Figura 5.7 – Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries do grupo C16S200φ10.

Na Tabela 5.2 apresentam-se os valores dos indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento do grupo C16S200φ10.

Tabela 5.2 – Indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento referentes ao grupo C16S200φ10

Desig. do provete	S	Idade provete	Tipo manta	L	$\rho_f$ [%]	$f_{cc}$ (MPa)	$\epsilon_{cc}$	$f_{cc}/f_{co}$	$\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$	$\epsilon_s$	$\epsilon_{fmax}$	$\epsilon_{fmax}/\epsilon_{fu}$	$\epsilon_{fl}/\epsilon_{fl,r}$	
Betão simples_BS				-	-	13.87 ( $f_{co}$ )	0.0027 ( $\epsilon_{co}$ )	-	-		-	-	-	
Betão simples_BS,φ10						15.52 ( $f_{co}$ )	0.0033 ( $\epsilon_{co}$ )	-	-	0.0133 (SG1)	-	-	-	
										0.0052 (SG2)				
W45S5L3	5	120 (dias)	CF120 S&P C-240 (200g/m <sup>2</sup> )	3	0.25	27.04	0.021	1.74	6.3	0.0267 (SG1)	0.0092 (SG1)	0.596 (SG1)	1.0	
											0.0263 (SG2)			
W45S5L5	5			5	0.42	32.89	0.032	2.12	9.70	0.0263 (SG1)	0.0072 (SG1)	0.463 (SG1)	0.60	
											0.0253 (SG2)			
W60S5L3	5			3	0.34	32.92	0.026	2.12	7.88	0.0258 (SG1)	0.0090 (SG1)	0.581 (SG1)	1.0	
											0.0261 (SG2)			
W60S5L5	5			5	0.57	43.81	0.040	2.82	12.12	0.0263 (SG1)	0.0099 (SG1)	0.638 (SG1)	0.84	
											0.0259 (SG2)			
W600S1L3	1			3	0.68	46.88	0.030	3.02	9.09	0.0264 (SG1)	0.0078 (SG1)	0.505 (SG1)	1.0	
											0.0262 (SG2)			
W600S1L5	1			5	1.13	56.38	0.034	3.63	10.30	0.0261 (SG1)	0.0068 (SG1)	0.435 (SG1)	0.76	
											0.0200 (SG2)			

Da análise dos valores incluídos na Tabela 5.2 e dos gráficos da Figura 5.7 podem extrair-se as seguintes observações:

- nas séries parcialmente confinadas, o aumento da capacidade de carga atingiu valores de 182% superiores ao registado em provetes sem confinamento com faixas de CFRP. Nas séries totalmente confinadas o incremento de capacidade de carga foi de 263%;
- entre as séries parcialmente confinadas a que obteve maior incremento da capacidade de carga foi a série confinada com faixas de 60 mm. Se, por exemplo, forem comparadas as séries confinadas com faixas de 45 mm com as séries confinadas com faixas de 60 mm, ambas com 3 camadas, o incremento de capacidade de carga foi de 74% e 112%, respectivamente, verificando-se maiores aumentos da tensão máxima nas séries que dispunham de menor espaço livre entre as faixas;

- o valor máximo do índice de ductilidade ( $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$ ) foi da ordem de 12;
- a extensão máxima no CFRP variou entre 44% e 64% da sua extensão de rotura;
- tal como no anterior grupo de ensaios,  $\varepsilon_f/\varepsilon_{f,r}$  diminuiu com o aumento de  $\rho_f$ , indicando que as extensões no CFRP diminuem com o aumento de percentagem de confinamento.

### 5.2.2 Curvas $\sigma_c/f_{co}$ versus $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$

Na Figura 5.8 representam-se as curvas  $\sigma_c/f_{co}$  versus  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  para as séries do grupo C16S200 $\phi$ 10. Estas curvas evidenciam, graficamente, o desempenho dos sistemas de confinamento deste grupo de ensaios, em termos de incremento de capacidade de carga e de capacidade de deformação.

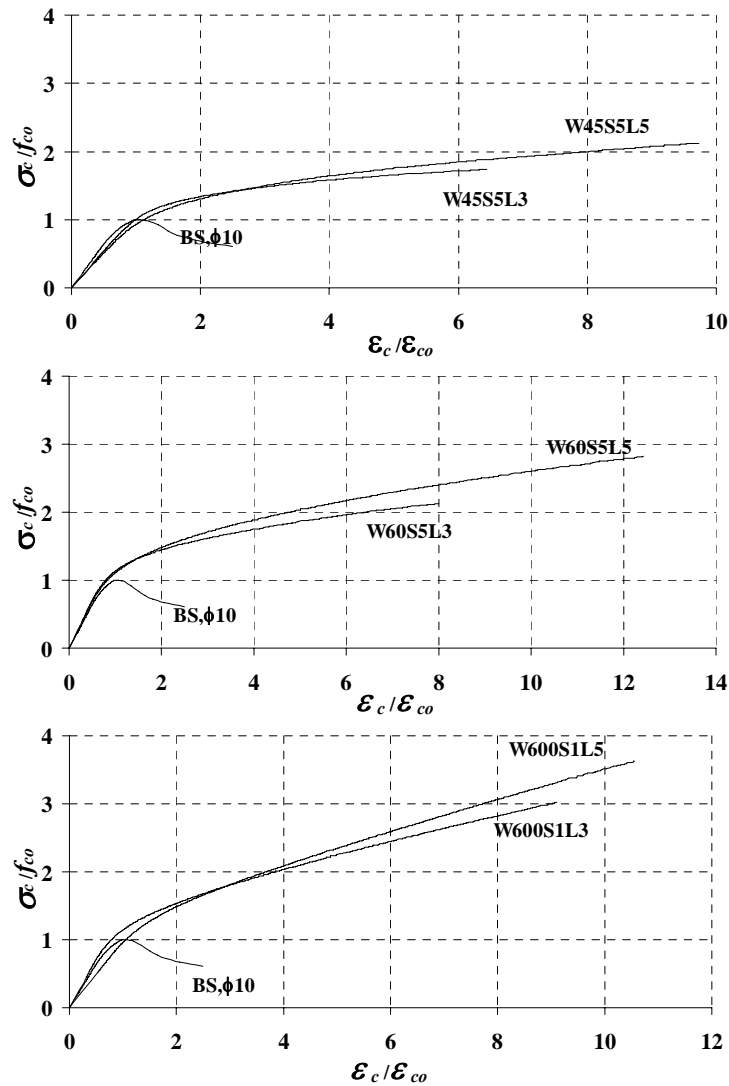


Figura 5.8 – Curvas  $\sigma_c/f_{co}$  versus  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  nas séries de ensaios de grupo C16S200 $\phi$ 10.

As séries confinadas parcialmente com faixas de 60 mm, W60S5, obtiveram resultados mais elevados em termos de incremento da capacidade de carga que as séries confinadas com faixas de 45 mm. Este incremento de carga atingiu valores 182% superiores aos registados nos correspondentes provetes de betão simples armados com varões longitudinais  $\phi 10$ . Em termos de ductilidade, avaliada pelo índice  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$ , na série W45S5 foram registados valores de 6.4 e 9.7 nos provetes confinados com 3 e 5 camadas, respectivamente. Na série W60S6 com 3 e 5 camadas, foram obtidos valores de 7.9 e 12.1 para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$ , respectivamente, revelando que a extensão axial foi superior nas séries W60S5.

As séries W45S5L5 e W60S5L3 obtiveram igual incremento de capacidade de carga de 2.12, embora a percentagem de confinamento na série W60S5L3 ( $\rho_f = 0.17$ ) seja menor que a percentagem de confinamento da série W45S5L5 ( $\rho_f = 0.21$ ), revelando ser mais influente a largura das faixas que o número de camadas para o aumento da capacidade de carga de elementos de pilar de betão armado.

Nas séries totalmente confinadas, W600S1, registaram-se incrementos de carga de 3.02 e 3.63 nos provetes com 3 e 5 camadas, enquanto o aumento de ductilidade foi de 9 e 10 nos provetes com 3 e 5 camadas, respectivamente.

### 5.2.3 Relação entre $\sigma_c/f_{co}$ e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ )

Na Figura 5.9 representa-se a relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ), para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  de 2, 3, 4, 6 e max nas séries de ensaios do grupo C16S200 $\phi 10$ . Estes gráficos permitem avaliar quais os parâmetros mais relevantes do confinamento em termos de aumento da capacidade de carga, para distintos níveis de deformação.

Da análise dos gráficos da Figura 5.9 pode verificar-se que:

- a capacidade de carga aumenta com  $\rho_f$ ;
- para todos os níveis de deformação, a série W60S5 permitiu incrementos de carga superiores os registados na série W45S5.

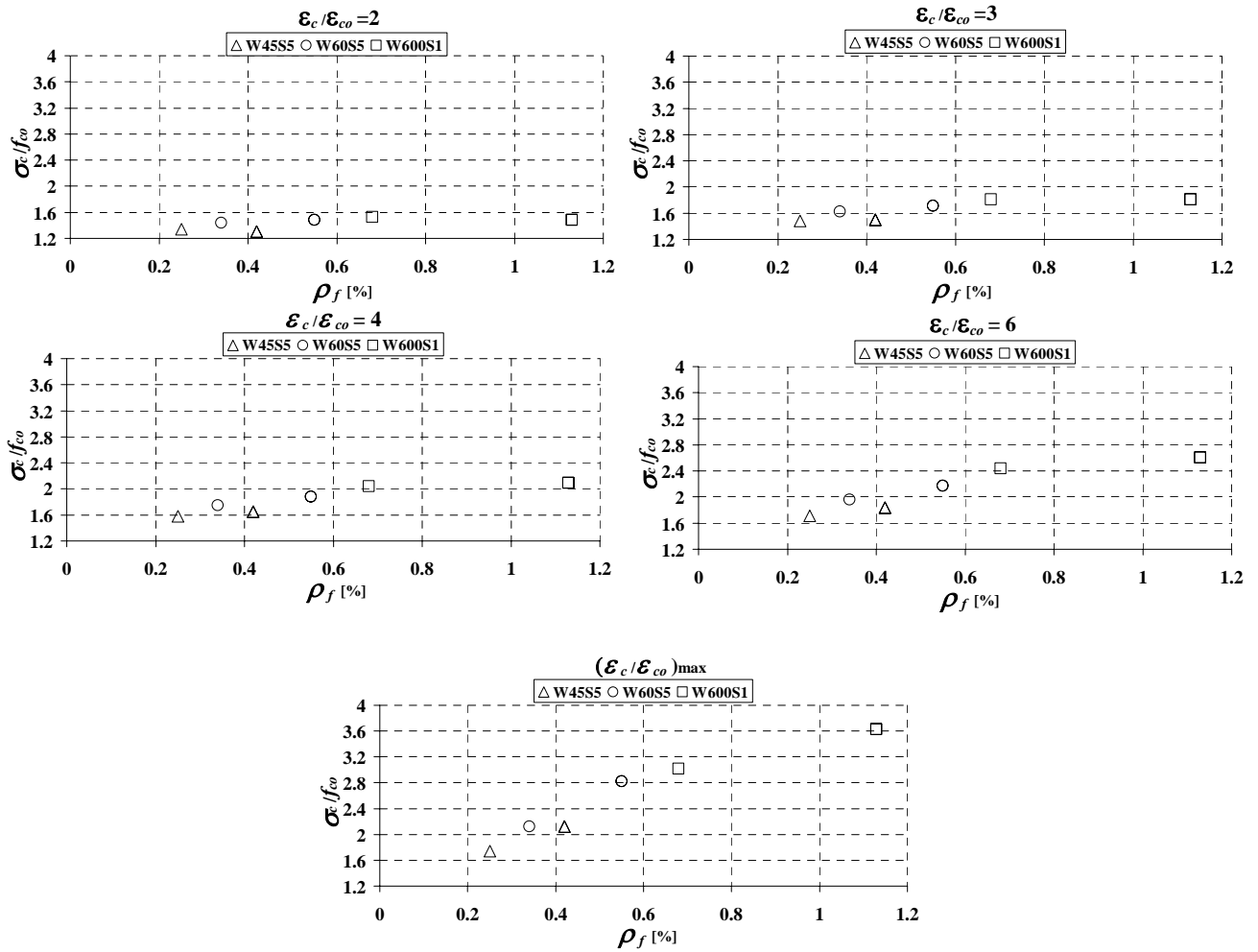


Figura 5.9 – Relação entre  $\sigma_c/f_c$  e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) nas séries de ensaios do grupo C16S200 $\phi$ 10.

### 5.2.4 Relação entre a variação de energia ( $\Delta U/U_{co}$ ) e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ )

Na Figura 5.10 representa-se a eficácia dos sistemas de confinamento em termos de capacidade de absorção de energia, avaliada a partir da relação  $\Delta U/U_{co} - \rho_f$ , para  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  de 2, 3, 4, 6 e max. O modo como  $\Delta U$  e  $U_{co}$  foram obtidos está descrito na secção 5.1.4.

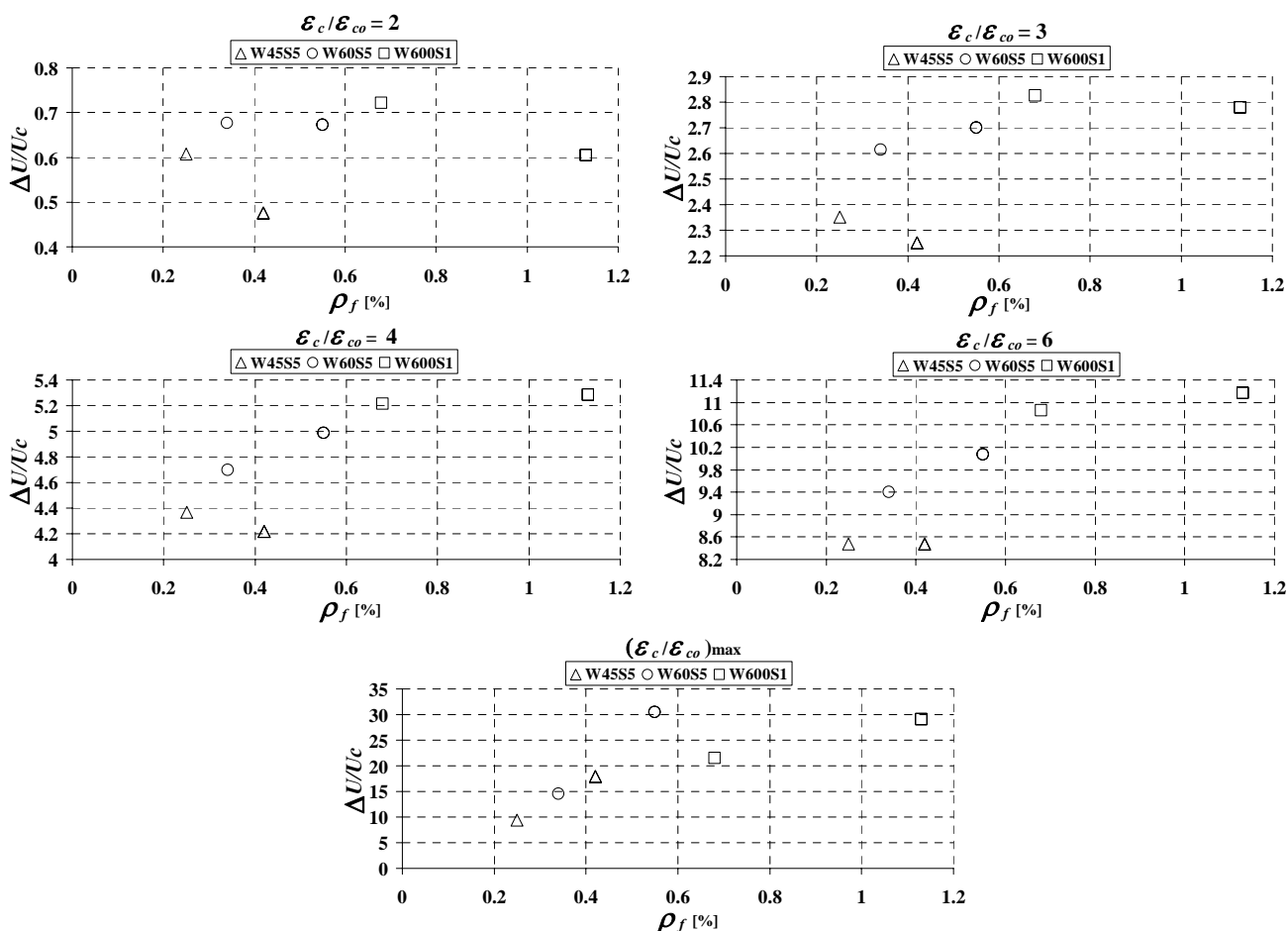


Figura 5.10 – Relação entre  $(\Delta U/U_c)$  e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) nas séries de ensaios de grupo C16S200 $\phi$ 10.

Da análise dos gráficos da Figura 5.10 verifica-se que:

- o valor de  $\Delta U/U_{co}$  varia entre 0.5 e 35 para  $\epsilon_c/\epsilon_{co}=2$  e  $(\epsilon_c/\epsilon_{co})_{max}$ , respectivamente;
- dos três sistemas de confinamento, o que apresentou menor  $\Delta U/U_{co}$ , para todos os níveis de deformação analisados, foi o sistema de confinamento, W45S5;
- o incremento máximo de absorção de energia foi próximo de 30, para  $(\epsilon_c/\epsilon_{co})_{max}$ , tendo sido registado na série W60S5L5.

### 5.3 ENSAIOS DO GRUPO C16S300 $\phi$ 8

As séries do grupo C16S300 $\phi$ 8 representam os ensaios realizados em provetes de betão com resistência média à compressão, aos 28 dias, de 16 MPa, e armados com varões longitudinais  $\phi$ 8. Os provetes deste grupo foram reforçados com manta de CFRP designada comercialmente por CF130 S&P 240 com 300 g de fibra por  $m^2$  de manta e 0.176 mm de espessura.

### 5.3.1 Curvas tensão versus extensão e síntese dos resultados mais relevantes

Na Figura 5.11 representa-se a relação entre a tensão axial de compressão e a extensão axial do provete bem como a extensão no CFRP.

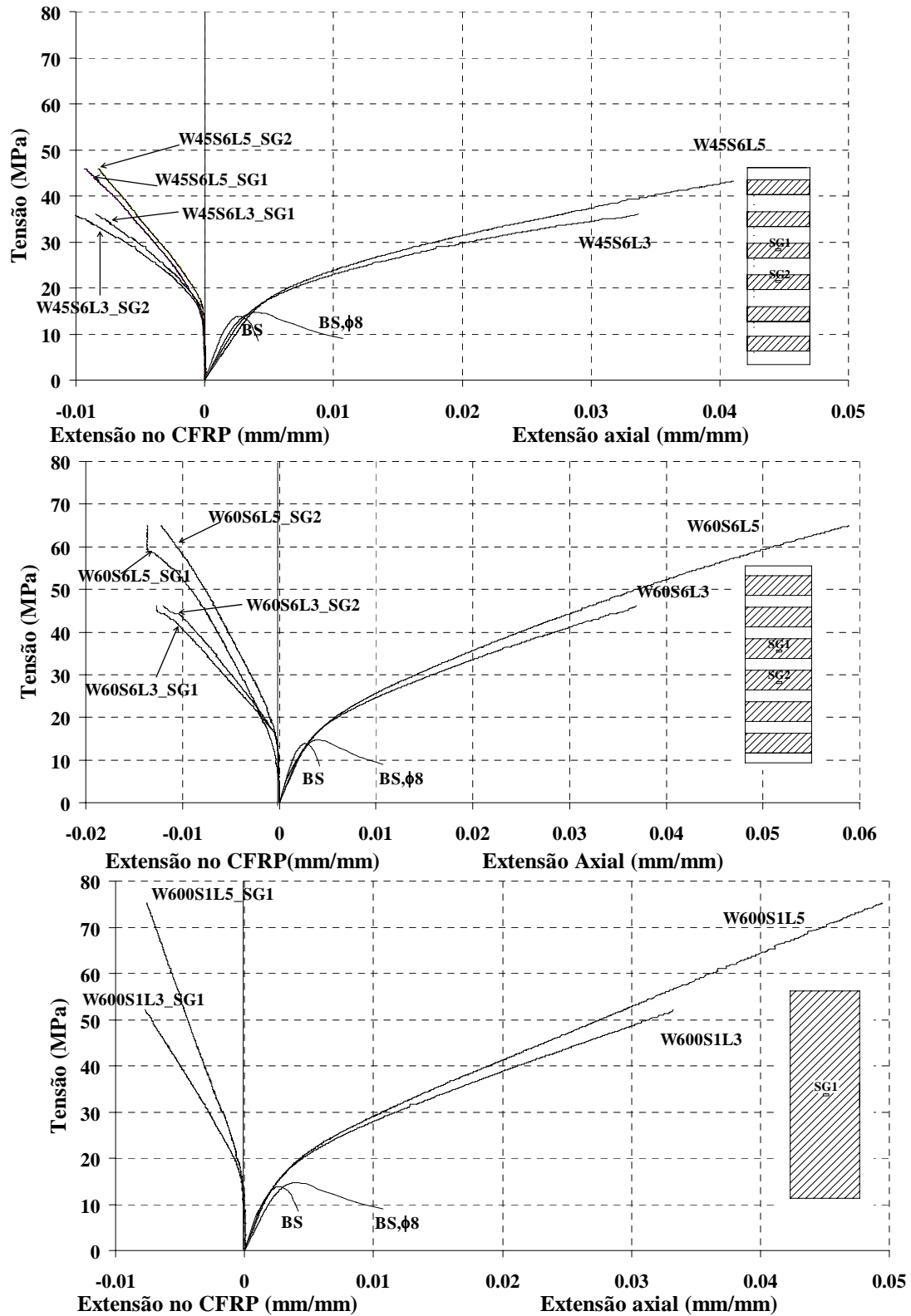


Figura 5.11 – Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries do grupo C16S300φ8

Na Tabela 5.3 apresentam-se os valores dos indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento do grupo C16S300φ8.

Tabela 5.3 – Indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento referentes ao grupo C16S300φ8

Desig. do provete	S	Idade provete	Tipo manta	L	$\rho_f$ [%]	$f_{cc}$ (MPa)	$\varepsilon_{cc}$	$f_{cc}/f_{co}$	$\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$	$\varepsilon_s$	$\varepsilon_{fmax}$	$\varepsilon_{fmax}/\varepsilon_{fu}$	$\varepsilon_{fl}/\varepsilon_{fl,r}$
Betão simples_BS				-	-	13.87 ( $f_{co}$ )	0.0027 ( $\varepsilon_{co}$ )	-	-		-	-	-
Betão simples_BS,φ8						14.71 ( $f_{co}$ )	0.0040 ( $\varepsilon_{co}$ )	-	-	0.00529 (SG1)	-	-	-
										0.0258 (SG2)			
W45S6L3	6	120 (dias)	CF130 S&P C-240 (300g/m <sup>2</sup> )	3	0.48	36.04	0.034	2.45	7.25	0.0259 (SG1)	0.00846 (SG1)	0.546 (SG1)	1.0
W45S6L5	6			5	0.80	45.82	0.047	3.11	11.75	0.0220 (SG1)	0.00934 (SG1)	0.603 (SG1)	0.81
W60S6L3	6			3	0.64	46.13	0.037	3.14	9.25	0.0267 (SG1)	0.0126 (SG1)	0.82 (SG1)	1.0
W60S6L5	6			5	1.06	64.96	0.059	4.42	14.75	0.0262 (SG1)	0.0137 (SG1)	0.88 (SG1)	0.75
W600S1L3	1			3	1.06	52.19	0.033	3.55	8.25	0.0261 (SG1)	0.00769 (SG1)	0.496 (SG1)	1.0
W600S1L5	1			5	1.76	75.18	0.050	5.11	12.50	0.0267 (SG1)	0.00757 (SG1)	0.489 (SG1)	0.69

Da análise dos valores incluídos na Tabela 5.3 e dos gráficos Figura 5.11 podem sintetizar-se as seguintes observações:

- nas séries parcialmente confinadas, W45S6 e W60S6, a que registou maiores incrementos na capacidade de carga foi a série confinada com faixas de 60 mm, sendo a diferença entre ambas as séries de aproximadamente 10 MPa e 20 MPa para 3 e 5 camadas respectivamente;
- na série W45S6 o incremento da capacidade de carga foi superior a 3 vezes o registado nos correspondentes provetes de betão simples. Para as séries W60S6 e W600S1 o incremento da capacidade de carga foi 4 e 5 vezes maior, respectivamente;
- o valor máximo do parâmetro  $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$  foi da ordem de 12.5;
- a extensão máxima no CFRP variou entre 49% e 88% da sua extensão de rotura;

- $\varepsilon_{\eta}/\varepsilon_{\eta,r}$  diminuiu com o aumento de  $\rho_f$ , indicando que as extensões no CFRP diminuem com o aumento de percentagem de confinamento;
- os provetes das séries W60S6L5 e W600S1L3, com igual  $\rho_f$ , proporcionaram níveis de confinamento diferentes. Para o mesmo  $\rho_f$ , a série de provetes totalmente confinados, W600S1L3, permitiu níveis de incremento de carga e de extensão axial mais baixos que os registados na série W60S6L5, tendo-se verificado a rotura precoce do provete totalmente confinado.

### 5.3.2 Curvas $\sigma_c/f_{co}$ versus $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$

Na Figura 5.12 representam-se as curvas  $\sigma_c/f_{co}$  versus  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  para as séries do grupo C16S300 $\phi$ 8. Estas curvas evidenciam, graficamente, o desempenho dos sistemas de confinamento deste grupo de ensaios, em termos de incremento de capacidade de carga e de deformação.

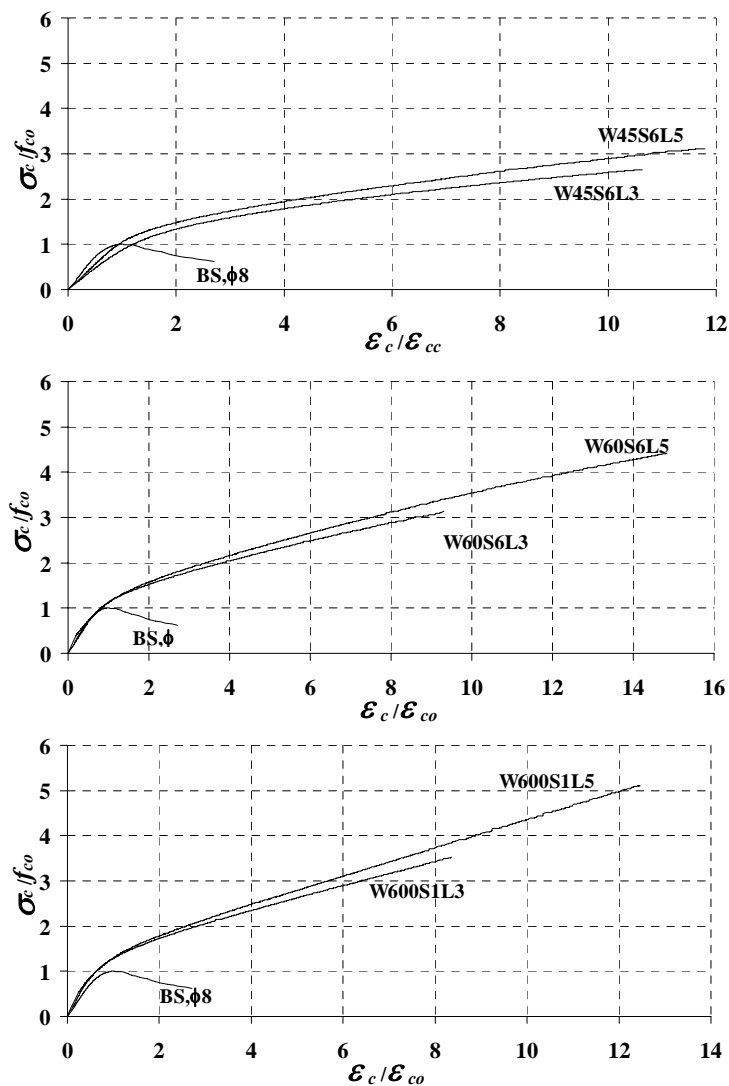


Figura 5.12 – Curvas  $\sigma_c/f_{co}$  versus  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  nas séries de ensaios do grupo C16S300 $\phi$ 8

As séries de provetes do grupo C16S300 $\phi$ 8 foram as que registaram maiores valores em termos de aumento de capacidade de carga e de ductilidade das séries da segunda fase do programa experimental. Neste grupo de ensaios a série W60S6 obteve resultados mais elevados que os registados na série W45S6 em termos de incremento da capacidade de carga. Por exemplo, comparando-se as séries confinadas com faixas de 45 mm e de 60 mm com 3 camadas,  $f_{cc}/f_{co}$  foi igual a 2.50 e 3.14, respectivamente. No caso das mesmas séries mas confinadas com 5 camadas os valores de  $f_{cc}/f_{co}$  foram iguais a 3.11 e 4.42. Em termos de ductilidade, avaliada pelo índice  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$ , na série W45S6 foram registados valores de 7.3 e 11.8 nos provetes confinados com 3 e 5 camadas, respectivamente enquanto nas séries W60S6 com 3 e 5 camadas foram obtidos valores de  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  iguais a 9.3 e 14.8, respectivamente.

Nas séries totalmente confinadas, W600S1, registaram-se incrementos de carga de 3.6 e 5.1 nos provetes com 3 e 5 camadas, enquanto que o aumento de ductilidade foi de 8 e 13 nos provetes com 3 e 5 camadas, respectivamente.

### 5.3.3 Relação entre $\sigma_c/f_{co}$ e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ )

Na Figura 5.13 representa-se a relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e  $\rho_f$  para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}=2, 3, 4, 6$ , e max nas séries de ensaios do grupo C16S300 $\phi$ 8.

Da análise dos gráficos da Figura 5.13 pode retirar-se que:

- para todos os níveis de deformação, a capacidade de carga aumenta com  $\rho_f$ ;
- para todos os níveis de deformação e para a mesma percentagem de confinamento ( $\rho_f = 1.06$ ), a série W600S1L3 permitiu incrementos de carga superiores aos registados na série W60S6L5, com excepção para  $(\varepsilon_c/\varepsilon_{co})_{max}$ , esta excepção poder ter haver com a rotura precoce sofrida pelo provete W600S1L3 ;
- todos os sistemas de confinamento alcançaram valores máximos de índice de ductilidade ( $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$ ) superiores a 6.

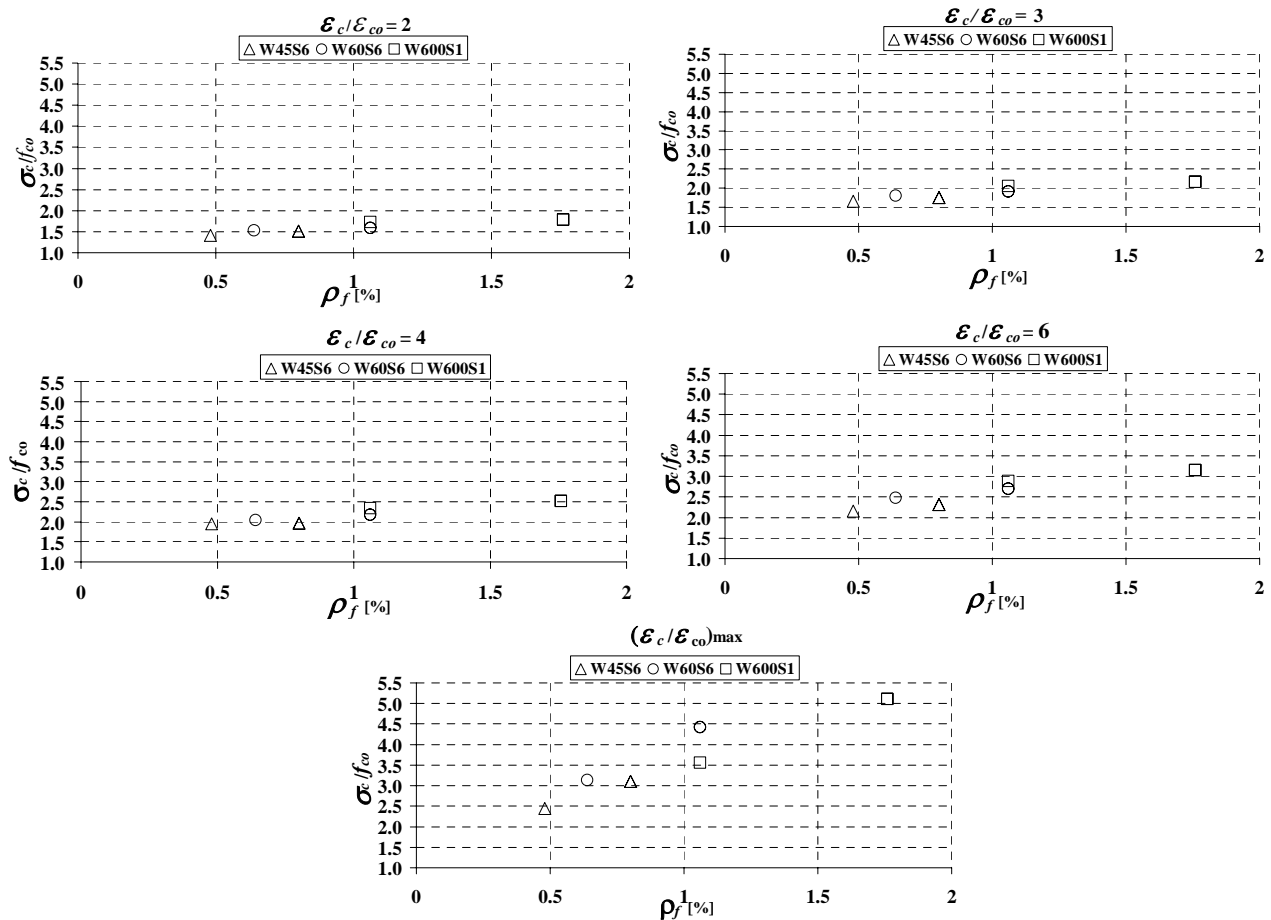


Figura 5.13 – Relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) nas séries de ensaios do grupo C16S300 $\phi$ 8.

### 5.3.4 Relação entre a variação de energia ( $\Delta U/U_c$ ) e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ )

Na Figura 5.14 representa-se a eficácia dos sistemas de confinamento em termos de capacidade de absorção de energia, avaliada a partir da relação  $\Delta U/U_c - \rho_f$ , para  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  de 2, 3, 4, 6 e max. O modo como  $\Delta U$  e  $U_c$  foram obtidos está descrito na secção 5.1.4.

Da análise dos gráficos apresentados na Figura 5.14 verifica-se que:

- a capacidade de absorção de energia aumentou com  $\rho_f$ ;
- para  $\epsilon_c/\epsilon_{co}=2$ , o valor máximo de  $\Delta U/U_c$  foi próximo de 1.9, enquanto para  $(\epsilon_c/\epsilon_{co})_{max}$  esse valor foi cerca de 50;
- entre as séries W60S6L5 e W600S1L3, de igual  $\rho_f$ , a segunda foi mais efectiva em termos de capacidade de absorção de energia, em cerca de 30%, para um nível de deformação igual a 2, mas esta diferença foi aumentando com o aumento da deformação;
- de entre as três séries estudadas, a série W600S1 foi a mais efectiva em termos de aumento de capacidade de absorção de energia do provete.

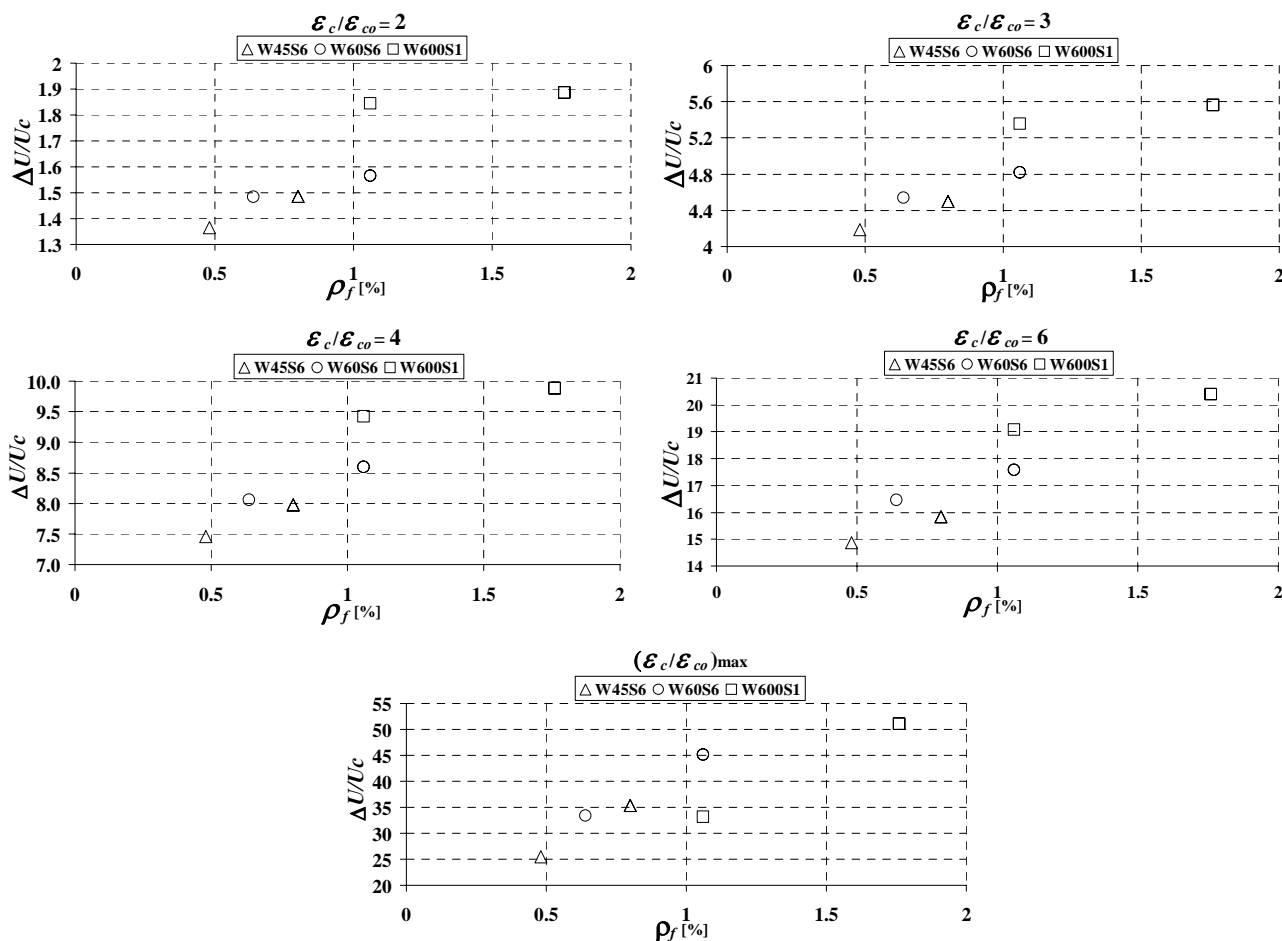


Figura 5.14 – Relação entre a variação de energia ( $\Delta U/U_c$ ) e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) nas séries de ensaios do grupo C16S300 $\phi$ 8

## 5.4 ENSAIOS DO GRUPO C16S300 $\phi$ 10

As séries do grupo C16S300 $\phi$ 10 representam os ensaios realizados em provetes de betão com uma resistência média à compressão, aos 28 dias, de 16 MPa e armados com varões longitudinais  $\phi$ 10. Os provetes deste grupo foram reforçados com manta de CFRP designada comercialmente por CF130 S&P 240 com 300 g de fibra por  $m^2$  de manta e 0.176 mm de espessura.

### 5.4.1 Curvas tensão versus extensão e síntese dos resultados mais relevantes

Na Figura 5.15 representa-se a relação entre a tensão axial de compressão e a extensão axial do provete bem como a extensão no CFRP.

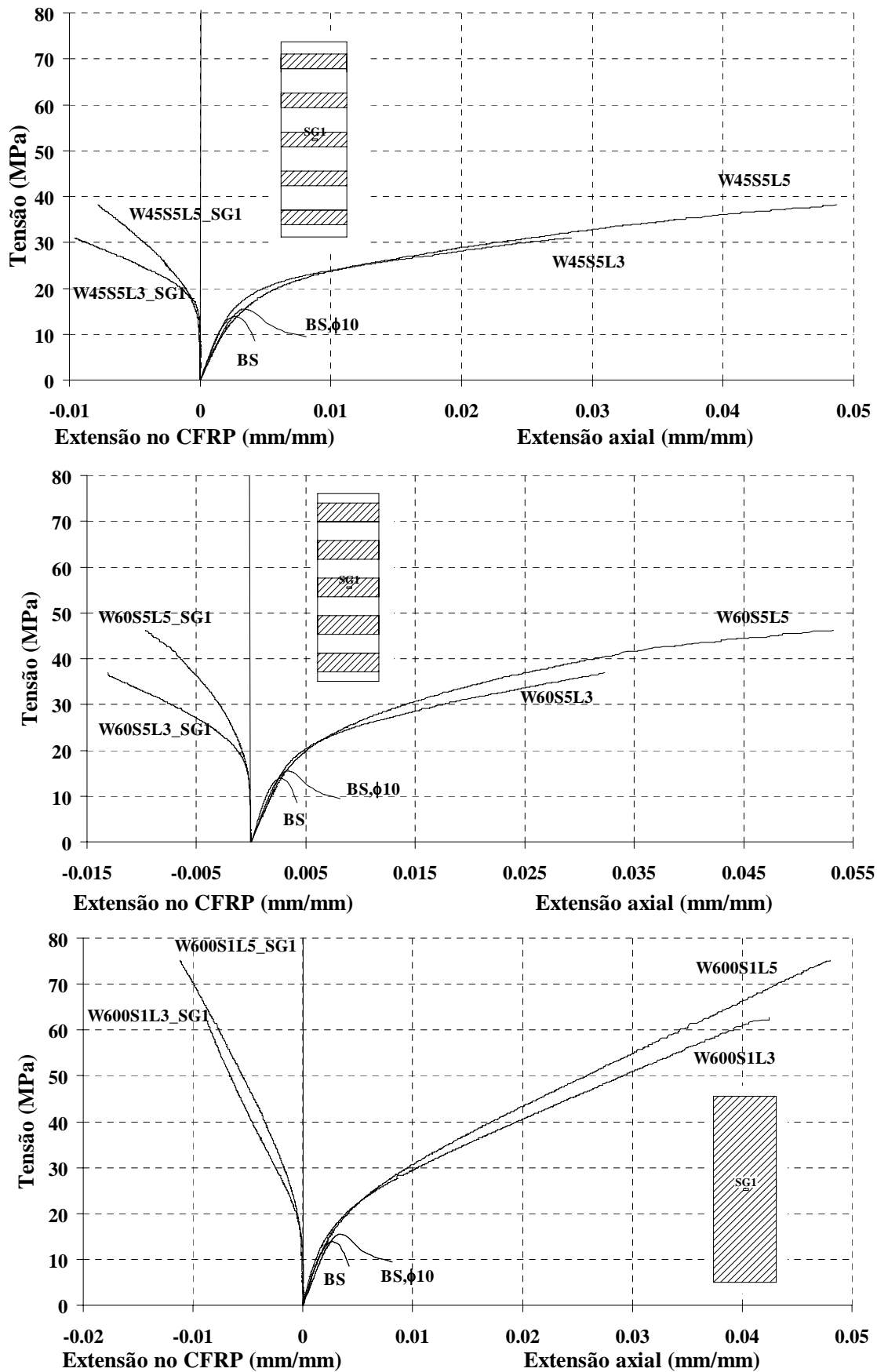


Figura 5.15 – Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries do grupo C16S300φ10.

Na Tabela 5.4 apresentam-se os valores dos indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento do grupo de séries de ensaios C16S300φ10.

Tabela 5.4 – Indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento referentes ao grupo C16S300φ10.

Desig. do provete	S	Idade provetes	Tipo manta	L	$\rho_f$ [%]	$f_{cc}$ (MPa)	$\varepsilon_{cc}$	$f_{cc}/f_{co}$	$\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$	$\varepsilon_s$	$\varepsilon_{fmax}$	$\varepsilon_{fmax}/\varepsilon_{fu}$	$\varepsilon_f/\varepsilon_{f,r}$		
Betão simples_BS				-	-	13.87 ( $f_{co}$ )	0.0027 ( $\varepsilon_{co}$ )	-	-		-	-	-		
Betão simples_BS,φ10						15.52 ( $f_{co}$ )	0.0033 ( $\varepsilon_{co}$ )	-	-	0.0133 (SG1)	-	-	-		
										0.0052 (SG2)					
W45S5L3	5	120 (dias)	CF130 S&P C-240 (300g/m <sup>2</sup> )	3	0.40	30.96	0.028	1.99	8.48	0.0168 (SG1)	0.0097 (SG1)	0.623 (SG1)	1.0		
											0.0181 (SG2)				
W45S5L5	5			5	0.66	38.23	0.049	2.46	14.85	0.0265 (SG1)	0.0078 (SG1)	0.506 (SG1)	0.57		
											0.0253 (SG2)				
W60S5L3	5			3	0.53	36.95	0.032	2.38	9.70	0.0262 (SG1)	0.0131 (SG1)	0.845 (SG1)	1.0		
											0.0255 (SG2)				
W60S5L5	5			5	0.88	46.29	0.053	2.98	16.06	0.0260 (SG1)	0.0097 (SG1)	0.624 (SG1)	0.52		
											0.0258 (SG2)				
W600S1L3	1					3	1.06	62.70	0.045	4.04	13.64	0.0274 (SG1)	0.0089 (SG1)	0.572 (SG1)	1.0
												0.0264 (SG2)			
W600S1L5	1			5	1.76	75.12	0.048	4.84	14.55	0.0267 (SG1)	0.011 (SG1)	0.72 (SG1)	1.10		
										0.0266 (SG2)					

Da análise dos valores da Tabela 5.4 e das curvas dos gráficos da Figura 5.15 podem extrair-se as seguintes observações:

- nas séries W600S1 o aumento da capacidade de carga foi de 304% e de 384% nos provetes com três e cinco camadas, respectivamente;
- o valor máximo de  $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$  foi de 16;
- a extensão máxima no CFRP ( $\varepsilon_{fmax}$ ) variou entre 51% e 85% da sua extensão de rotura;
- quanto ao parâmetro  $\varepsilon_f/\varepsilon_{f,r}$ , neste grupo de ensaios não se verificou a tendência observada nos grupos anteriores, isto é de diminuição de  $\varepsilon_f/\varepsilon_{f,r}$  com o aumento de  $\rho_f$ . De facto, enquanto nas séries W45S5 e W60S5,  $\varepsilon_f/\varepsilon_{f,r}$  diminui com o aumento de  $\rho_f$ , na série W600S1 este parâmetro aumentou com o aumento de  $\rho_f$ .

### 5.4.2 Curvas $\sigma_c/f_{co}$ versus $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$

Na Figura 5.16 representam-se as curvas  $\sigma_c/f_{co}$  versus  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  para as séries do grupo C16S300 $\phi$ 10. Estes gráficos evidenciam o incremento da capacidade de carga proporcionado pelos sistemas de confinamento aplicados.

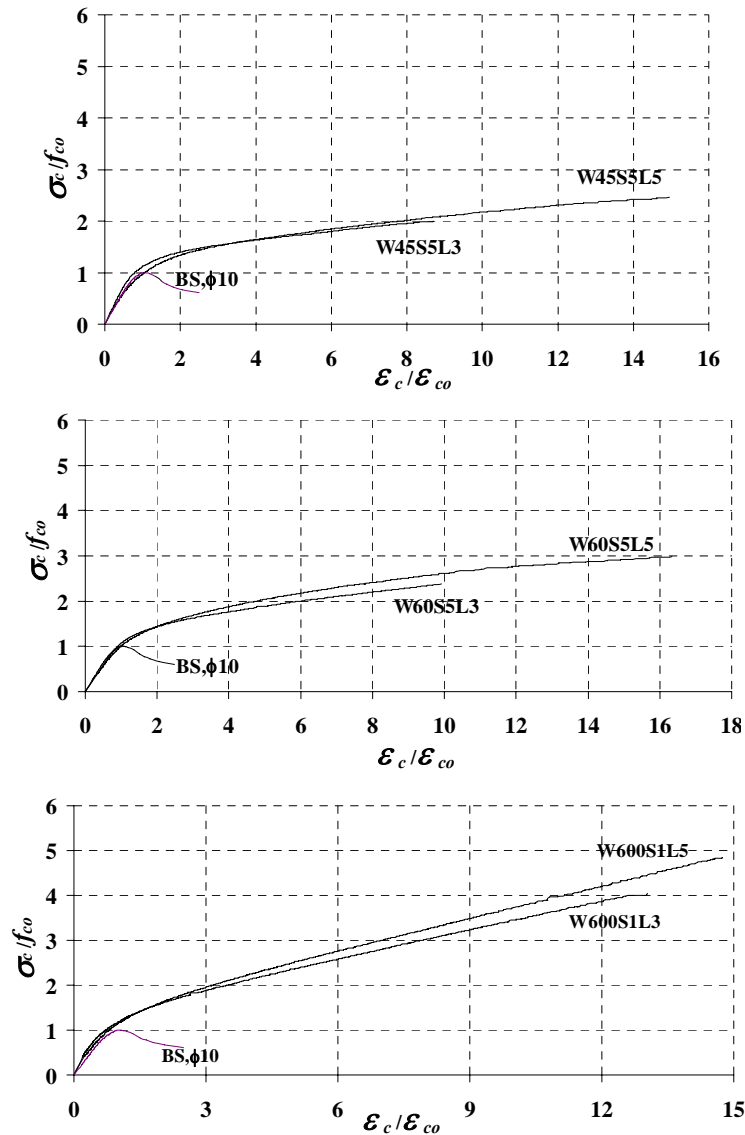


Figura 5.16 – Curvas  $\sigma_c/f_{co}$  versus  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  para as séries do grupo C16S300 $\phi$ 10.

Nas séries confinadas com cinco faixas de 45 mm de largura a capacidade de carga das séries com três e cinco camadas, respectivamente aumentou 2 a 2.5 vezes os valores registados na série não confinada. Em termos de  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  o aumento foi de 8.5 e 15 nas séries W45S5L3 e W45S5L5, respectivamente.

Nas séries com faixas de 60 mm de largura de 3 e 5 camadas, o aumento em termos de capacidade de carga foi 2.4 e 3, respectivamente, enquanto em termos de  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  foi de 9.7 e 16 nas séries W60S5L3 e W60S5L5.

Nos provetes totalmente confinados com 3 e 5 camadas o aumento em termos de capacidade de carga foi de 4 e 4.8, enquanto em termos de  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  foi de 13.6 e 14.6, respectivamente.

### 5.4.3 Relação entre $\sigma_c/f_{co}$ e percentagem de confinamento ( $\rho_f$ )

Na Figura 5.17 representa-se a relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e  $\rho_f$  para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  de 2, 3, 4, 6, 8 e max.

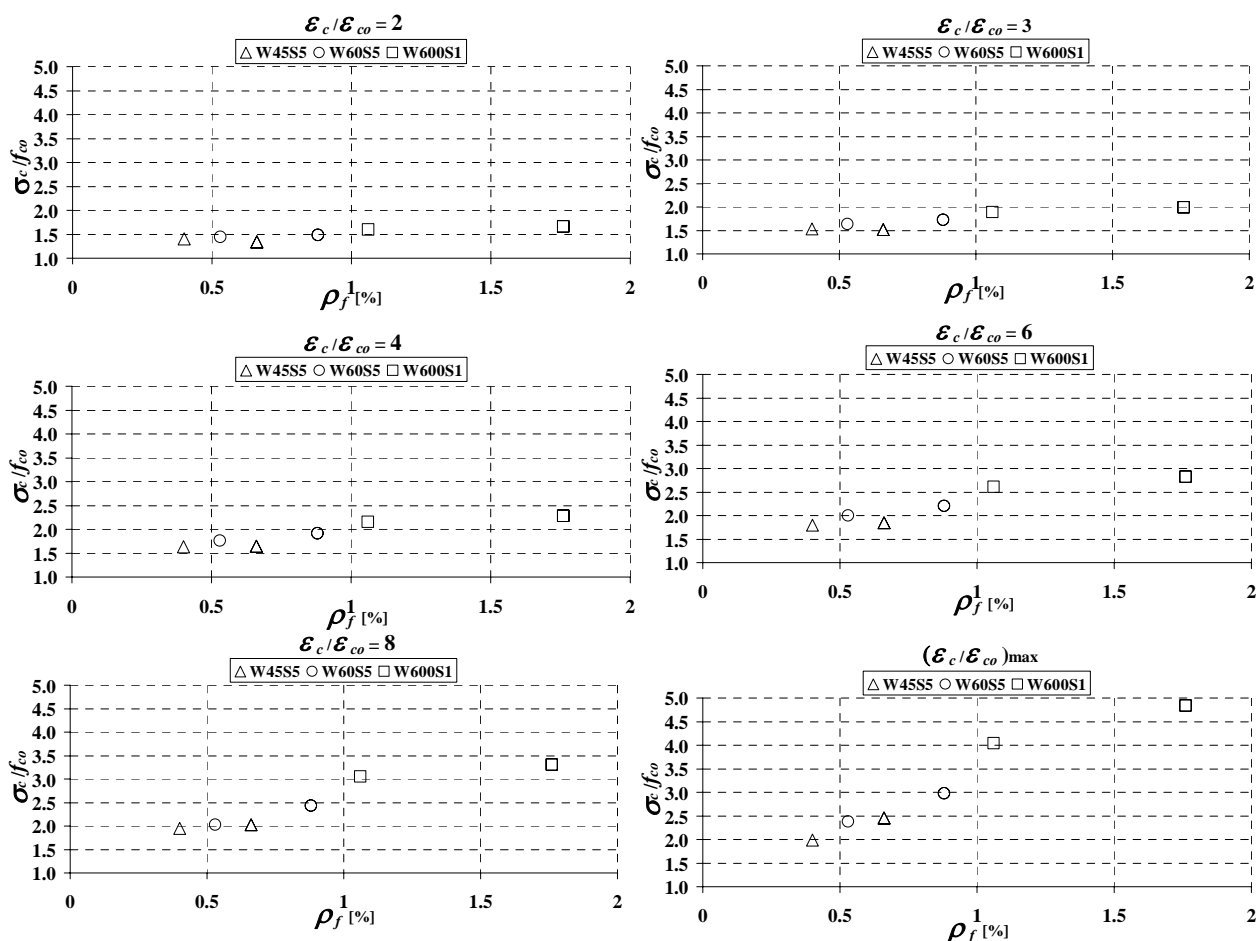


Figura 5.17 – Relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) para as séries do grupo C16S300φ10.

Da análise dos gráficos da Figura 5.17 verifica-se que:

- A capacidade de carga aumentou com  $\rho_f$ , excepto para a série W45S5 e para os níveis de deformação  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}=2, 3$ .

- Para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}=2$  os níveis de incremento de capacidade de carga, para as séries W45S5 e W60S5, variaram entre 1.3 e 1.5 vezes.
- As séries W45S5 e W60S5 atingiram valores de aumento de capacidade de carga da ordem de 2.5 a 3 vezes, enquanto nas séries W600S1 foi alcançado um aumento próximo de 5 vezes.

#### 5.4.4 Relação entre a variação de energia ( $\Delta U/U_c$ ) e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ )

Na Figura 5.18 representa-se a eficácia dos sistemas de confinamento em termos de capacidade de absorção de energia, avaliada a partir da relação  $\Delta U/U_c-\rho_f$ , para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  de 2, 3, 4, 6, 8 e max. O modo como  $\Delta U$  e  $U_c$  foram obtidos estão descritos na secção 5.1.4.

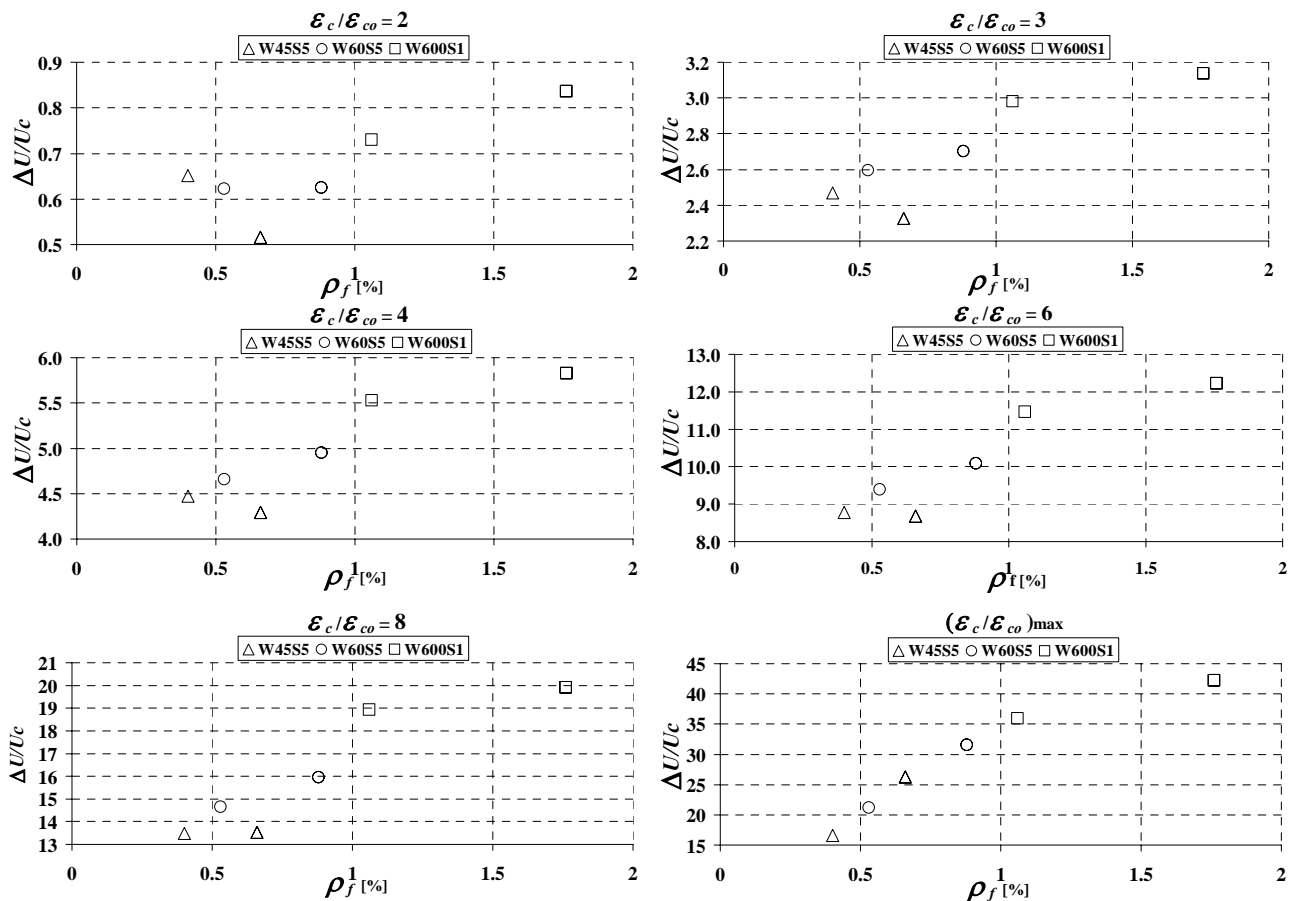


Figura 5.18 – Relação entre a variação de energia ( $\Delta U/U_c$ ) e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) para as séries do grupo C16S300 $\phi$ 10.

Da análise dos gráficos apresentados na Figura 5.18 verifica-se que:

- A capacidade de absorção de energia aumentou com  $\rho_f$ , excepto para a série W45S5;

- Para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}=2$ , o valor máximo de  $\Delta U/U_c$  foi ligeiramente inferior ao valor unitário, enquanto para  $(\varepsilon_c/\varepsilon_{co})_{max}$ , esse valor foi superior a 40;
- Nas séries parcialmente confinadas, W45S5 e W60S5, a segunda foi mais efectiva em termos de capacidade de absorção de energia.

## 5.5 MODOS DE ROTURA TÍPICOS DOS PROVETES C16/20

Na Figura 5.19 é caracterizada e localizada a rotura típica verificada para as diferentes séries de provetes em betão da classe de resistencia C16/20. O modo de rotura dos provetes reforçados está associado à rotura do CFRP. Em todos os ensaios em que se registou o rebentamento das faixas de CFRP foi possível ouvir sons originados pelo rompimento das fibras, dando indicação do início da rotura do CFRP. Após a rotura do provete verificou-se que uma camada de betão ficou fixa às faixas de CFRP, indicando que as condições de ligação entre estes dois materiais ficaram bem asseguradas.

Em todos os ensaios em que houve rotura da manta esta foi violenta e muito repentina, o que já tinha sido observado em outros programas experimentais, Ferreira e Barros [2004]. Em todos os provetes verificou-se esmagamento do betão entre faixas e posterior rotura de uma ou mais faixas na zona de concentração de maior dano do betão. De um modo geral, os provetes apresentavam um dano elevado no betão, em especial na parte superior do provete, zona onde se localizou a rotura das faixas de fibra de carbono. Comportamento similar já tinha sido observado por Untiveros [2002].

No anexo B é feita a caracterização completa, em termos de modos de rotura, de todos os provetes.


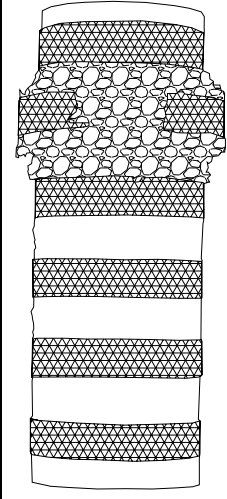

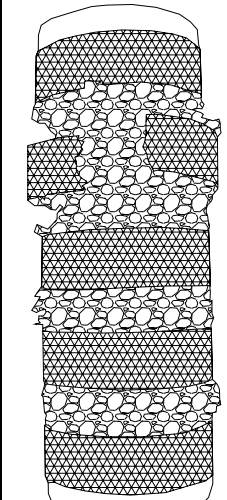

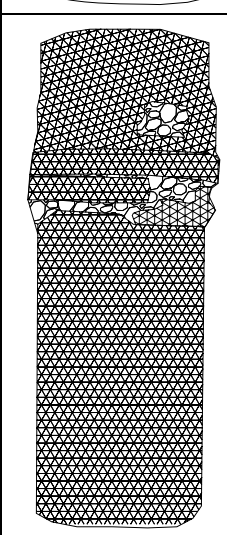
Provetes confinados com faixas de 45 mm			<p>Geralmente, a rotura do CFRP ocorreu na 1 e/ou 2 faixa superior do provete</p> <p>O betão ficou bastante danificado entre faixas.</p> <p>A rotura foi mais violenta nos provetes confinados com 5 camadas em comparação com os provetes confinados com 3 camadas.</p>
Provetes confinados com faixas de 60 mm			<p>A rotura ocorreu nas faixas superiores.</p> <p>Em todos os provetes as roturas foram muito violentas.</p> <p>O betão entre faixas ficou muito danificado.</p>
Provetes totalmente confinados			<p>Nos provetes totalmente confinados, normalmente a rotura da manta ocorreu no terço superior do provete.</p> <p>Rotura muito violenta, principalmente nos provetes confinados com 5 camadas de manta de espessura 0.176 mm.</p>

Figura 5.19 – Modos de rotura dos provetes do grupo C16S200φ8.

## 5.6 SÍNTESE DAS PRINCIPAIS OBSERVAÇÕES REGISTADA NOS PROVETES C16/20

A capacidade de carga aumentou com  $\rho_f$ . Em séries com a mesma percentagem de confinamento de CFRP verificou-se maiores aumentos de capacidade de carga nas que dispunham de menor espaço livre entre faixas. As séries de provetes do grupo C16S300 $\phi$ 8 foram as que registaram maiores incrementos quer em termos de capacidade de carga quer em termos de ductilidade.

Comparando séries com a mesma configuração, mas com diferente percentagem de confinamento, foram obtidos diferentes valores quer em termos de incremento de capacidade de carga quer em termos da extensão axial máxima. Os valores destes parâmetros foram mais elevados nas séries confinadas com 5 camadas, ou seja, com uma percentagem de confinamento mais elevada.

No que se refere à extensão máxima no CFRP, os valores registados dependem significativamente dos modos de rotura ocorridos, dado que as extensões registadas apenas representam o estado de extensão da zona onde os extensómetros ficaram colados. No entanto, verificou-se a tendência para ser tanto menor quanto maior era a percentagem de confinamento de CFRP.

Em termos do parâmetro do índice de ductilidade ( $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$ ) verificou-se que aumenta com a percentagem de confinamento.

Neste grupo de ensaios o parâmetro  $\varepsilon_{fl}/\varepsilon_{fl,r}$  apresentou uma tendência clara de diminuir com  $\rho_f$ , para todas as séries.

A capacidade de absorção de energia ( $\Delta U/U_c$ ) aumentou com  $\rho_f$  tendo este aumento sido mais significativo nos provetes totalmente confinados.

## 5.7 SÉRIES DE ENSAIOS DE GRUPO C32S200 $\phi$ 8

As séries do grupo C32S200 $\phi$ 8 representam os ensaios realizados em provetes de betão com resistência média à compressão, aos 28 dias, de 32 MPa, armados com varões longitudinais  $\phi$ 8. Os provetes deste grupo foram reforçados com manta de CFRP designada comercialmente por CF120 S&P 240 com 200 g de fibra por m<sup>2</sup> de manta e 0.113 mm de espessura.

### 5.7.1 Curvas tensão versus extensão e síntese dos resultados mais relevantes

Na Figura 5.20 representa-se a relação entre a tensão axial de compressão ( $\sigma_c$ ) e a extensão axial do provete, bem como a relação entre  $\sigma_c$  e a extensão axial no CFRP.

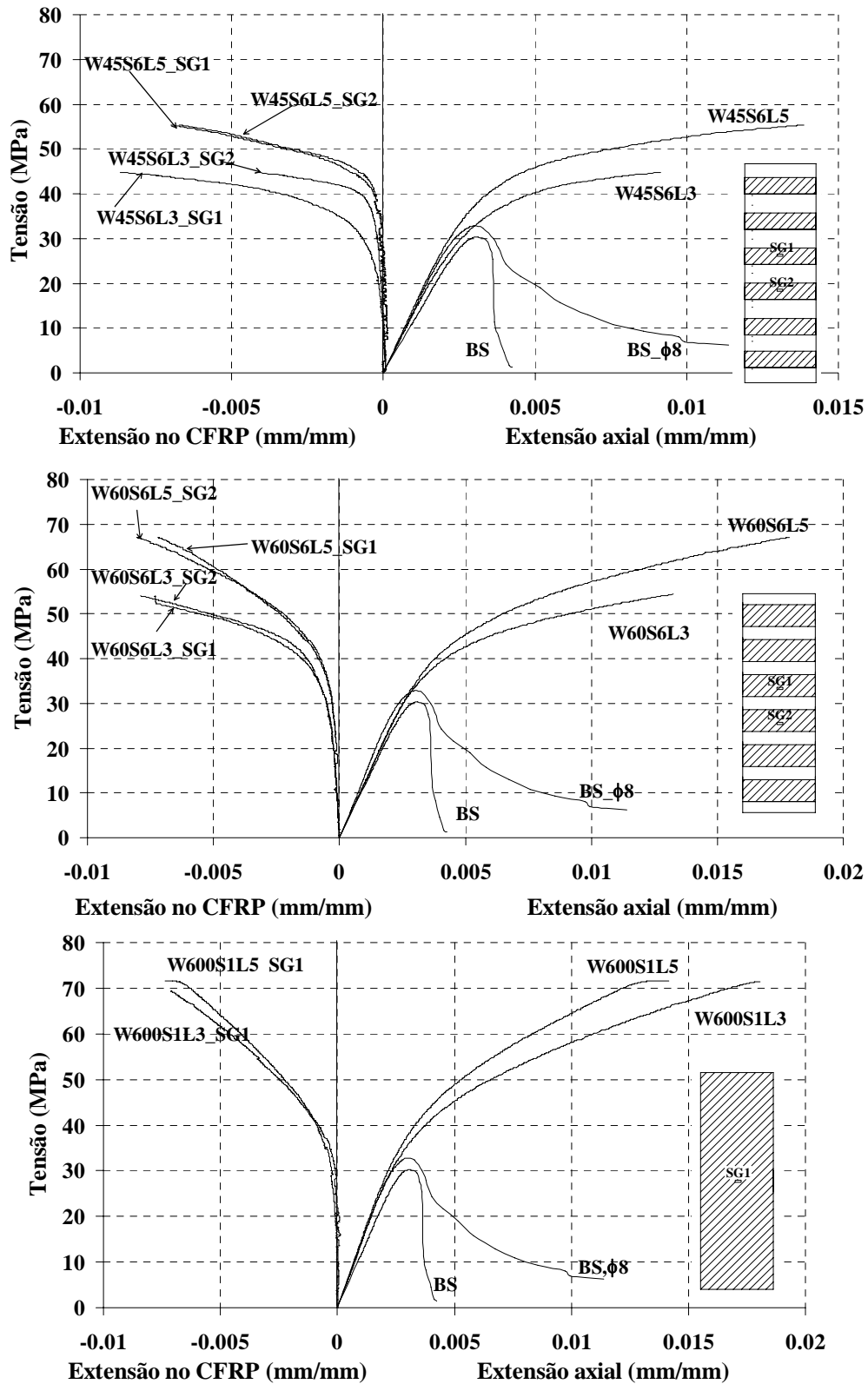


Figura 5.20 – Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries do grupo C32S200φ8.

Na Tabela 5.5 apresentam-se os valores dos indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento do grupo de ensaios C32S200φ8. Em alguns ensaios, efectuados em malha fechada, a capacidade de carga do equipamento foi atingida sem ter ocorrido a rotura do CFRP. Estes provetes foram novamente ensaiados, sob controlo manual, e os resultados obtidos encontram-se na tabela. Nestes segundos ensaios não foi possível obter registo da extensão axial ocorrida no CFRP, tendo-se apenas obtido o valor da tensão de compressão.

Tabela 5.5 – Indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento referentes ao grupo C32S200φ8

Desig. do provete	S	Idade provetes	Tipo manta	L	$\rho_f$ [%]	$f_{cc}$ (MPa)	$\varepsilon_{cc}$	$f_{cc}/f_{co}$	$\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$	$\varepsilon_s$	$\varepsilon_{jmax}$	$\varepsilon_{jmax}/\varepsilon_{ju}$	$\varepsilon_{fl}/\varepsilon_{fl,r}$
Betão simples_BS				-	-	30.31 ( $f_{co}$ )	0.0031 ( $\varepsilon_{co}$ )	-	-		-	-	-
Betão simples_BS,φ8						32.80 ( $f_{co}$ )	0.0030 ( $\varepsilon_{co}$ )	-	-	0.0273 (SG1)	-	-	-
										0.03256 (SG2)			
W45S6L3	6	90 (dias)	CF120 S&P C-240 (200g/m <sup>2</sup> )	3	0.31	44.80	0.0092	1.37	3.07	0.0287 (SG1)	0.00867 (SG1)	0.56 (SG1)	1.0
W45S6L5	6			5	0.51	55.36	0.0139	1.69	4.63	0.0279 (SG1)	0.00702 (SG1)	0.45 (SG1)	0.51
W60S6L3	6			3	0.41	54.37	0.0137	1.66	4.57	0.0282 (SG1)	0.00731 (SG1)	0.47 (SG1)	1.0
W60S6L5	6			5	0.68	67.09	0.0179	2.05	5.97	0.0282 (SG1)	0.00721 (SG1)	0.47 (SG1)	0.76
W600S1L3	1			3	0.68	71.37	0.0181	2.17	6.03	0.0280 (SG1)	0.0131 (SG1)	0.85 (SG1)	0.88
W600S1L5*	1			5	1.13	71.51* 98.36**	0.014*	2.18* 2.99**	4.67	0.0283 (SG1)	0.00735 (SG1)	0.47 (SG1)	1.0

\*valores registados quando a capacidade de carga do equipamento foi atingida sem haver rotura do provete

\*\* valores registados quando os provetes atingem a rotura.

Da análise dos valores incluídos na Tabela 5.5 e dos gráficos da Figura 5.20 podem extrair-se as seguintes observações:

- o aumento da capacidade de carga nos provetes totalmente confinados (W600S1) foi de 117% com três camadas;
- o valor máximo do parâmetro  $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$  foi 6;
- a extensão máxima no CFRP variou entre 27% a 85% da sua extensão de rotura;

- da análise da variação do parâmetro  $\varepsilon_{fl}/\varepsilon_{fl,r}$  com o aumento  $\rho_f$  verifica-se que as extensões no CFRP diminuem com o aumento da percentagem de confinamento, com excepção para os provetes totalmente confinados;
- apesar de as séries W60S6L5 e W600S1L3 terem igual  $\rho_f$ , a primeira apresentou menos 12% de aumento de capacidade de carga e de absorção de energia do que a segunda.

### 5.7.2 Curvas $\sigma_c/f_{co}$ versus $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$

Na Figura 5.21 representam-se as curvas  $\sigma_c/f_{co}$  versus  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  para as séries do grupo C32S200 $\phi$ 8.

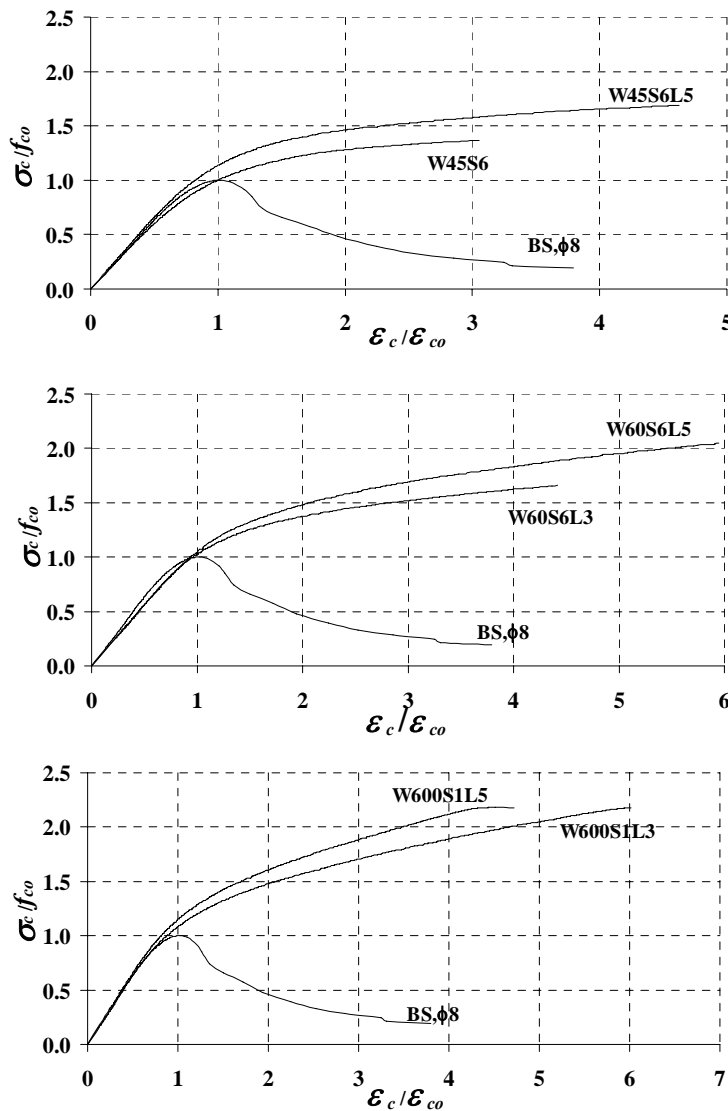


Figura 5.21 – Curvas  $\sigma_c/f_{co}$  versus  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  nas séries do grupo C32S200 $\phi$ 8.

O incremento de  $\sigma_c/f_{co}$  e de  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  nas séries W45S6L3 foi de 1.4 e 3, respectivamente. Para a mesma série mas com 5 camadas estes parâmetros aumentaram de 1.7 e 4.6, respectivamente. Para as séries W60S6L3 e W60S6L5 a capacidade de carga aumentou 66% e 105%, respectivamente, enquanto  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  aumentou 4.6 e 6 vezes, respectivamente.

Na série de provetes totalmente confinados, W600S1L3, a capacidade de carga triplicou e  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  alcançou um valor próximo de 6.

### 5.7.3 Relação entre $\sigma_c/f_{co}$ e percentagem de confinamento ( $\rho_f$ )

Na Figura 5.22 representa-se a relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e  $\rho_f$  para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  de 2, 3 e max nas séries de ensaios do grupo C32S200φ8. Estes gráficos permitem avaliar quais os parâmetros mais relevantes do confinamento em termos de aumento da capacidade de carga, para os distintos níveis de deformação.

Os resultados gráficos apresentados na Figura 5.22 reforçam os resultados numéricos sintetizados na Tabela 5.5, ou seja:

- a capacidade de carga aumenta com a percentagem de confinamento;
- para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}=2, 3$  e para igual  $\rho_f$ , as séries W60S6L5 e W600S1L3 têm incrementos de capacidade de carga muito próximos.

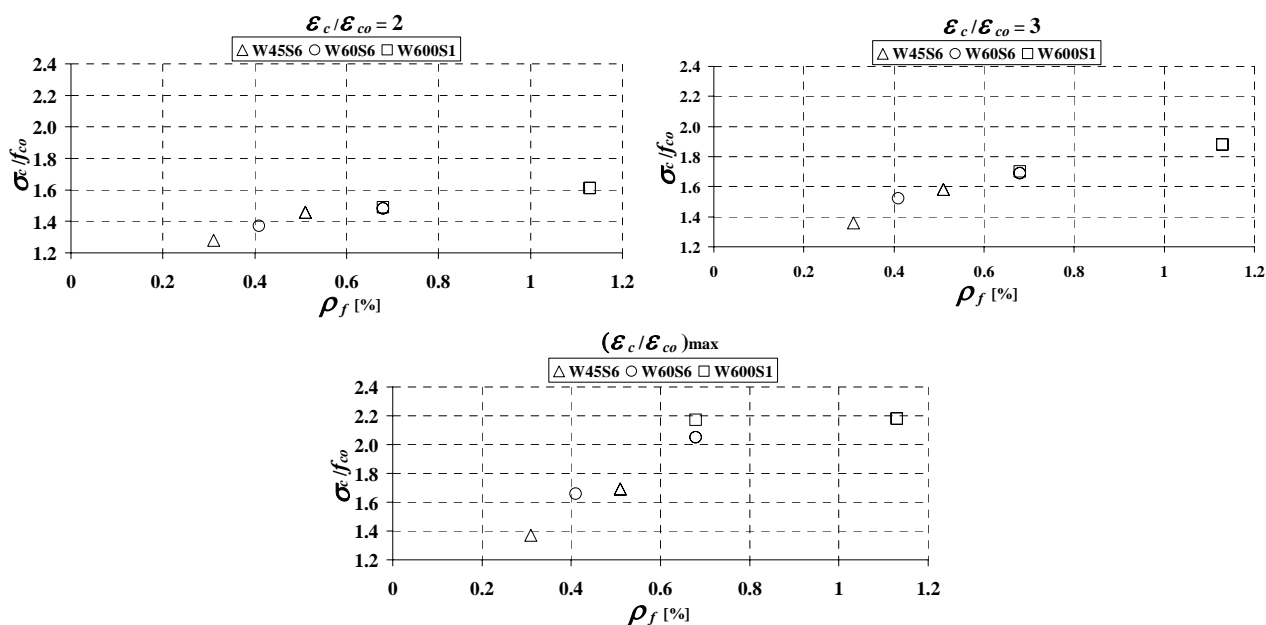


Figura 5.22 – Relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) nas séries do grupo C32S200φ8

### 5.7.4 Relação entre a variação de energia ( $\Delta U/U_c$ ) e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ )

Na Figura 5.23 representa-se a eficácia dos sistemas de confinamento em termos de capacidade de absorção de energia, avaliada a partir da relação  $\Delta U/U_c$ - $\rho_f$ , para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  de 2, 3 e max. O modo como  $\Delta U$  e  $U_c$  foram obtidos está descrito na secção 5.1.4.

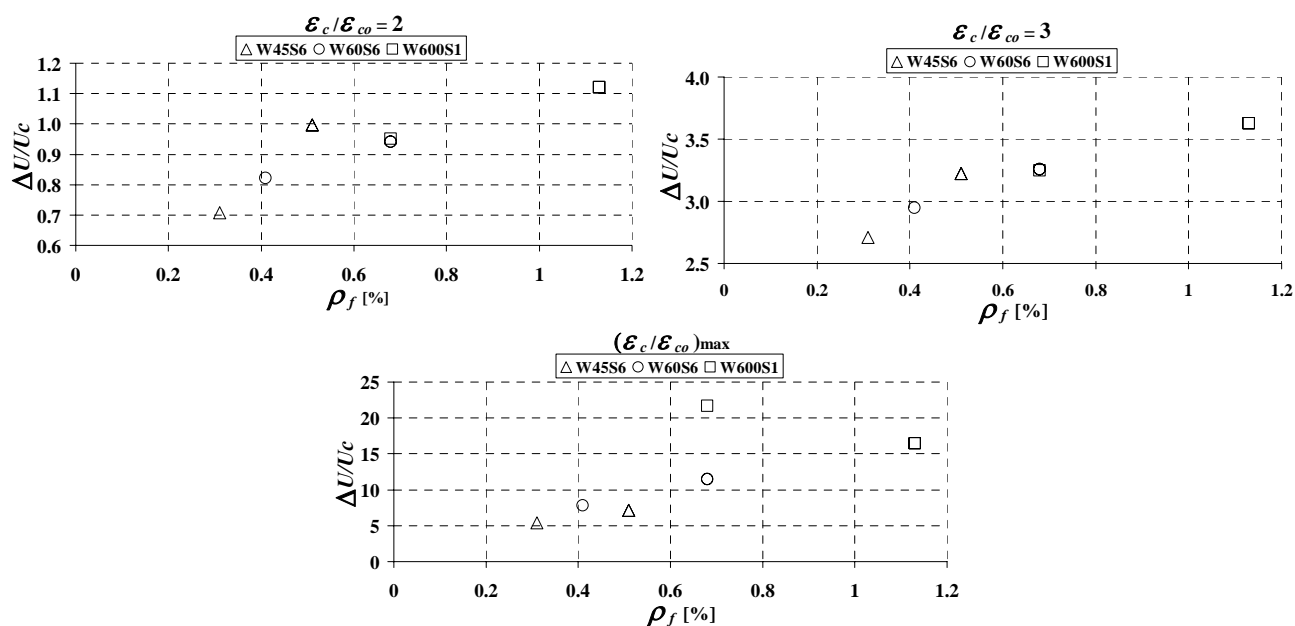


Figura 5.23 – Relação entre a variação de energia ( $\Delta U/U_c$ ) e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) nas séries do grupo C32S200 $\phi$ 8.

Da análise dos gráficos apresentados na Figura 5.23 verifica-se que:

- A capacidade de absorção de energia aumenta com  $\rho_f$ ;
- para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}=2$  o valor máximo de  $\Delta U/U_c$  alcançado pelas séries ensaiadas foi de aproximadamente igual 1.1, enquanto para  $(\varepsilon_c/\varepsilon_{co})_{max}$  foi de cerca de 22;
- para as séries com a mesma percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) W60S6L5 e W600S1L3, independente do nível de deformação, o aumento da capacidade de absorção de energia foi semelhante em ambas as séries.

## 5.8 ENSAIOS DO GRUPO C32S200 $\phi$ 10

As séries do grupo C32S200 $\phi$ 10 representam os ensaios realizados em provetes de betão com uma resistência média à compressão, aos 28 dias, de 32 MPa e armados com varões longitudinais  $\phi$ 10. Os provetes deste grupo foram reforçados com manta de CFRP designada comercialmente por CF120 S&P 240 com 200 g de fibra por  $m^2$  de manta e 0.113 mm de espessura.

### 5.8.1 Curvas tensão versus extensão e síntese dos resultados mais relevantes

Na Figura 5.24 representa-se a relação entre a tensão axial de compressão ( $\sigma_c$ ) e a extensão axial do provete, bem como a relação entre  $\sigma_c$  e a extensão no CFRP.

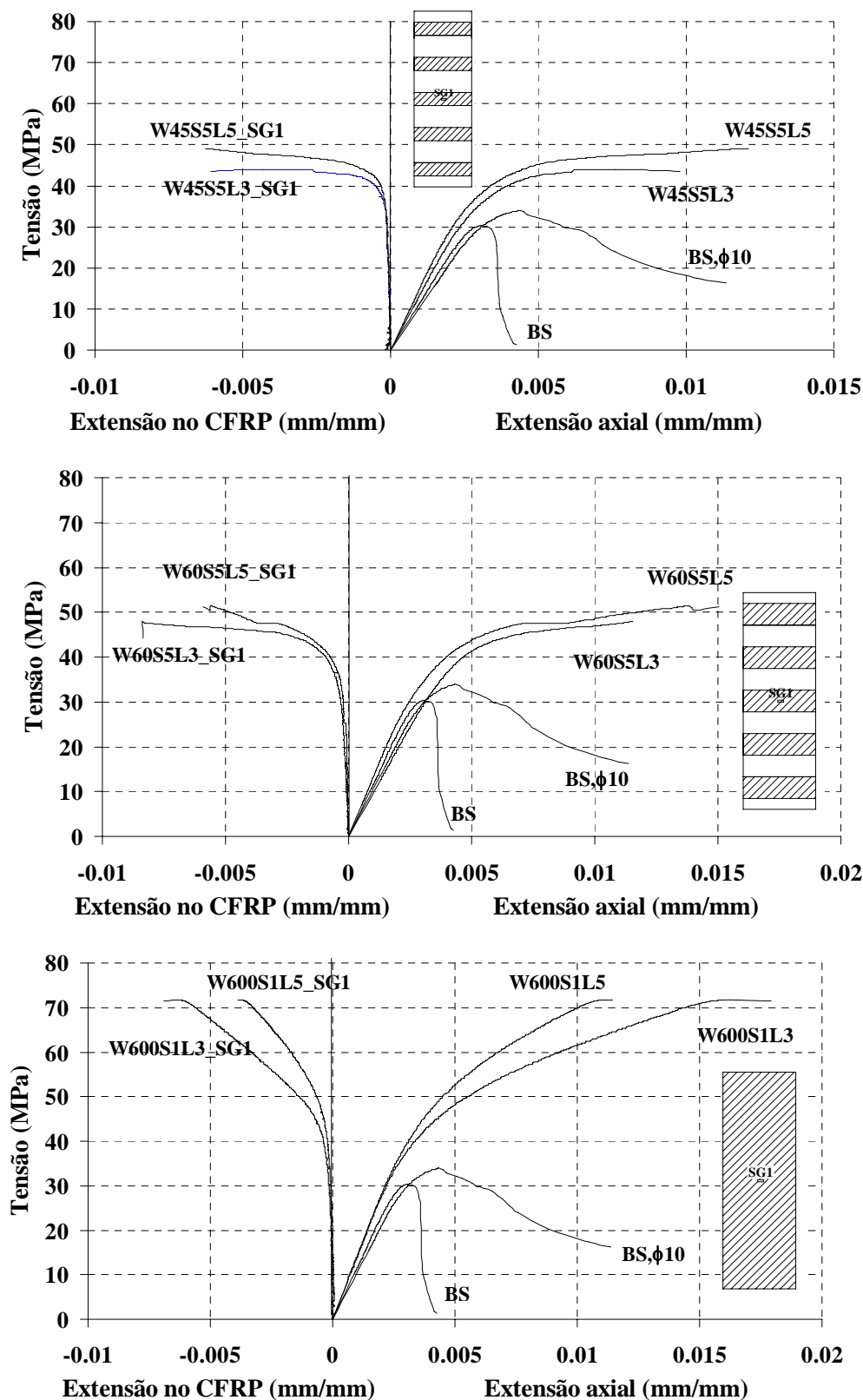


Figura 5.24 – Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries do grupo C32S200φ10.

Na Tabela 5.6 apresentam-se os valores dos indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento do grupo de ensaios C32S200φ10.

Tabela 5.6 - Indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento referentes ao grupo C32S200φ10

Desig. do provete	S	Idade provetes	Tipo manta	L	$\rho_f$ [%]	$f_{cc}$ (MPa)	$\varepsilon_{cc}$	$f_{cc}/f_{co}$	$\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$	$\varepsilon_s$	$\varepsilon_{fmax}$	$\varepsilon_{fmax}/\varepsilon_{fu}$	$\varepsilon_{fl}/\varepsilon_{fl,r}$	
Betão simples_BS				-	-	30.31 ( $f_{co}$ )	0.0031 ( $\varepsilon_{co}$ )	-	-		-	-	-	
Betão simples_BS,φ10						33.99 ( $f_{co}$ )	0.0043 ( $\varepsilon_{co}$ )	-	-	0.0271 (SG1)	-	-	-	
										0.0064 (SG2)				
W45S5L3	5	90 (dias)	CF120 S&P C-240 (200g/m <sup>2</sup> )	3	0.25	43.45	0.0098	1.28	2.28	0.0273 (SG1)	0.0061 (SG1)	0.39 (SG1)	1.0	
											0.0271 (SG2)			
W45S5L5	5			5	0.42	49.10	0.0121	1.47	2.81	0.0276 (SG1)	0.0063 (SG1)	0.40 (SG1)	0.79	
											0.0207 (SG2)			
W60S5L3	5			3	0.34	47.91	0.0115	1.43	2.67	0.0229 (SG1)	0.0084 (SG1)	0.54 (SG1)	1.0	
											0.0278 (SG2)			
W60S5L5	5			5	0.57	51.18	0.0151	1.53	3.51	0.0203 (SG1)	0.0059 (SG1)	0.38 (SG1)	0.59	
											0.0185 (SG2)			
W600S1L3	1			3	0.68	71.51	0.0179	2.14	4.16	0.0282 (SG1)	0.0069 (SG1)	0.44 (SG1)	0.87	
										0.0280 (SG2)				
W600S1L5	1			5	1.13	71.68* 100.3**	0.0114	2.15* 2.95**	2.65	0.0252 (SG1)	0.0039 (SG1)	0.25 (SG1)	1.0	
										0.0272 (SG2)				

\*valores registados quando a capacidade de carga do equipamento foi atingida sem haver rotura do provete

\*\* valores registados quando os provetes atingem a rotura.

Da análise dos valores incluídos na Tabela 5.6 e das curvas dos gráficos da Figura 5.24 podem retirar-se as seguintes observações:

- nas séries confinadas parcialmente o aumento da capacidade de carga variou entre 28% e 53%. Nas séries totalmente confinadas, mesmo nos provetes que não alcançaram a rotura na fase de ensaio em malha fechada, o incremento de capacidade de carga foi de 115% para os provetes com três e cinco camadas;
- o valor máximo de  $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$  foi superior a 4;
- a extensão máxima no CFRP ( $\varepsilon_{fmax}$ ) variou entre 40% e 54% da sua extensão de rotura, nos provetes que atingiram a rotura do sistema de confinamento durante a fase de ensaio em malha fechada;
- quanto ao parâmetro  $\varepsilon_{fl}/\varepsilon_{fl,r}$ , nesta série não se verificou a tendência observada nas séries realizadas com betão de 16MPa, dado que nas séries parcialmente

confinadas, W45S5 e W60S5, aquele parâmetro diminuiu com o aumento de  $\rho_f$ , mas, no entanto, na série W600S1 o valor daquele parâmetro aumentou com  $\rho_f$ .

Para ajudar a validar estes resultados alguns provetes foram instrumentados com extensómetros de fibra óptica. Os extensómetros de fibra óptica constituem uma alternativa cada vez mais crescente, em termos de desempenho e custo. Dos vários tipos de sensores de fibra óptica que têm sido utilizados na monitorização de estruturas, as redes de Bragg, em fibra óptica, oferecem um conjunto de vantagens que faz delas a melhor opção, (mais pormenores sobre estes sensores estão Ferreira et al. [2004]).

Os provetes foram instrumentados conforme está ilustrado na Figura 3.12, onde se pode ver a localização dos extensómetros de fibra óptica aplicados, bem como dos extensómetros eléctricos.

Na Figura 5.25 e na Tabela 5.7 apresentam-se os resultados obtidos para o provete W45S5L3 do grupo C32S200 $\phi$ 10. Estes resultados são representativos dos restantes provetes instrumentados com extensómetros de fibra óptica. No anexo C são apresentados todos os resultados obtidos.

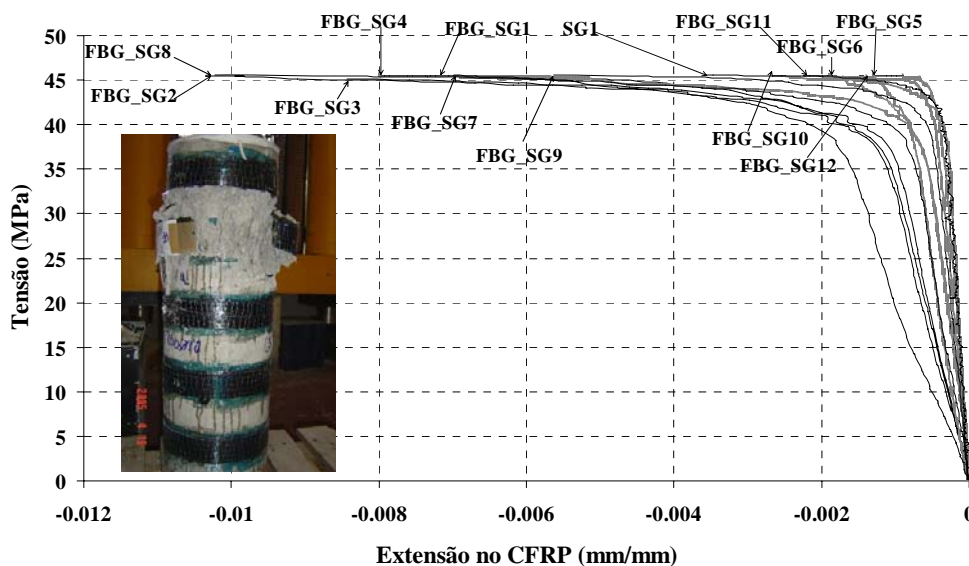
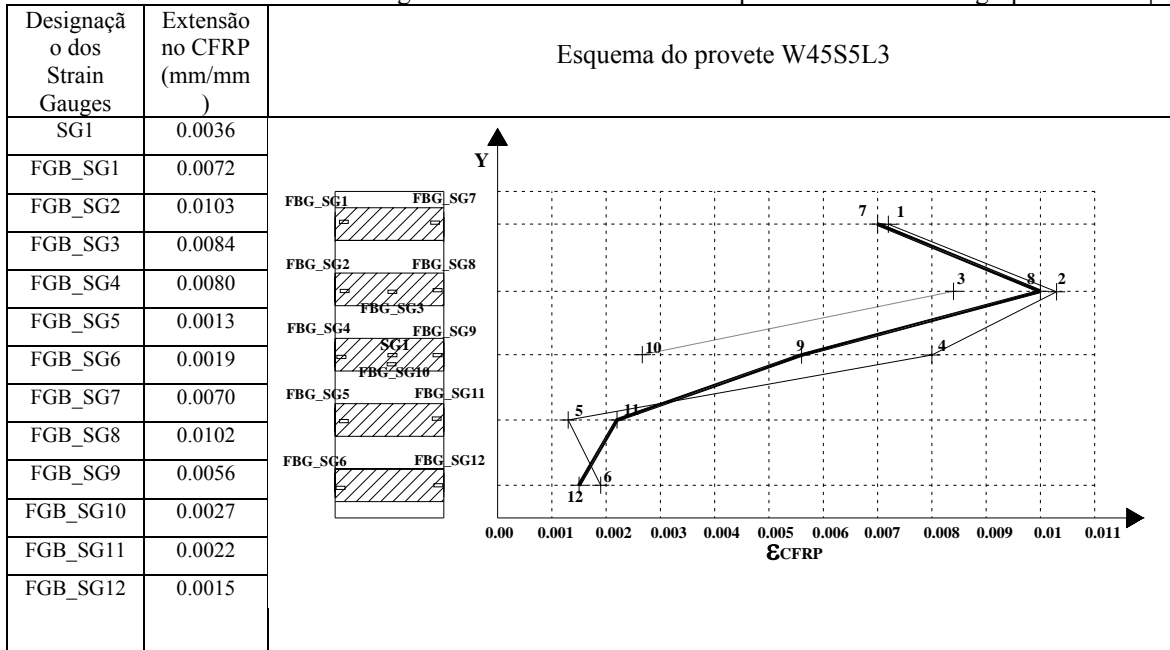


Figura 5.25 – Curvas tensão versus extensão para o provete W45S5L3 do grupo C32S200 $\phi$ 10 (ver figura 3.12).

Tabela 5.7 – Extensões últimas registadas no CFRP referentes ao provete W45S5L3 do grupo C32S200φ10.



Da análise da Figura 5.25 e da Tabela 5.7 verifica-se que:

- as extensões mais elevadas foram registadas nos extensómetros 2, 3 e 8, os quais estão localizados na segunda faixa superior que de acordo com a foto da figura 5.25, foi nesta faixa que ocorreu a rotura do sistema de confinamento;
- da Tabela 5.7 verifica-se que as maiores extensões estão localizadas na metade superior do provete, zona onde se localiza a rotura da faixa e a maior degradação do betão;
- o extensómetro mecânico (SG1), localizado junto ao extensómetro de fibra óptica (FGB\_SG10), obteve um resultado para a extensão muito próximo do registado no extensómetro de fibra óptica, com uma diferença de 9%, dando indicação da fiabilidade dos resultados obtidos com extensómetros de fibra óptica.

### 5.8.2 Curvas $\sigma_c/f_{co}$ versus $\epsilon_c/\epsilon_{co}$

Na Figura 5.26 representam-se as curvas  $\sigma_c/f_{co}$  versus  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  para as séries do grupo C32S200φ10. Estes gráficos evidenciam o incremento da capacidade de carga proporcionado pelos sistemas de confinamento aplicados.

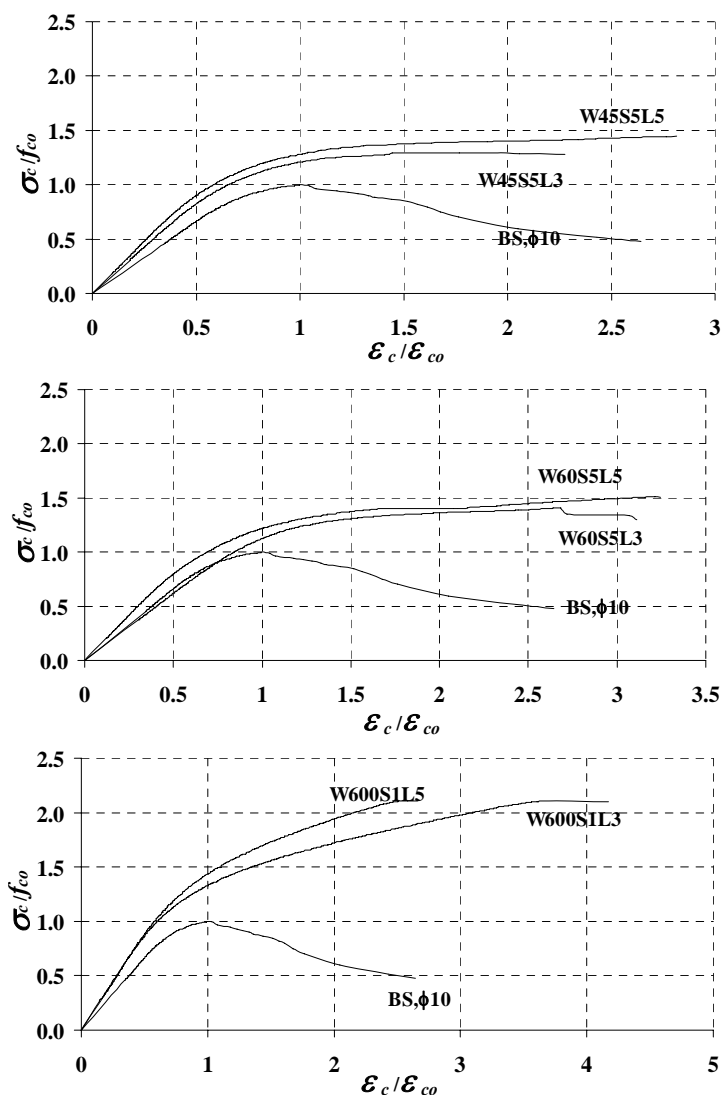


Figura 5.26 – Curvas  $\sigma_c/f_{co}$  versus  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  para as séries do grupo C32S200φ10.

Nos provetes confinados com três e cinco camadas por faixa das séries confinadas com seis faixas de 45 mm de largura a capacidade de carga aumentou 28% e 47% respectivamente. Em termos de  $\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$  o aumento foi de 2.3 e 2.8 nas séries W45S5L3 e W45S5L5, respectivamente.

Nas séries com faixas de 60 mm de largura de 3 e 5 camadas, o aumento em termos de capacidade de carga foi 1.4 e 1.5, respectivamente, enquanto em termos de  $\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$  foi 2.7 e 3.5 nas séries W60S5L3 e W60S5L5.

Comparando-se os valores registados nesta série com os obtidos na série homóloga, mas realizada com betão mais fraco (16MPa) verifica-se que aumentando a resistência do betão resultam menores valores de  $f_{cc}/f_{co}$  e  $\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$ .

### 5.8.3 Relação entre $\sigma_c/f_{co}$ e percentagem de confinamento ( $\rho_f$ )

Na Figura 5.27 representa-se a relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e  $\rho_f$  para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  de 2 e max.

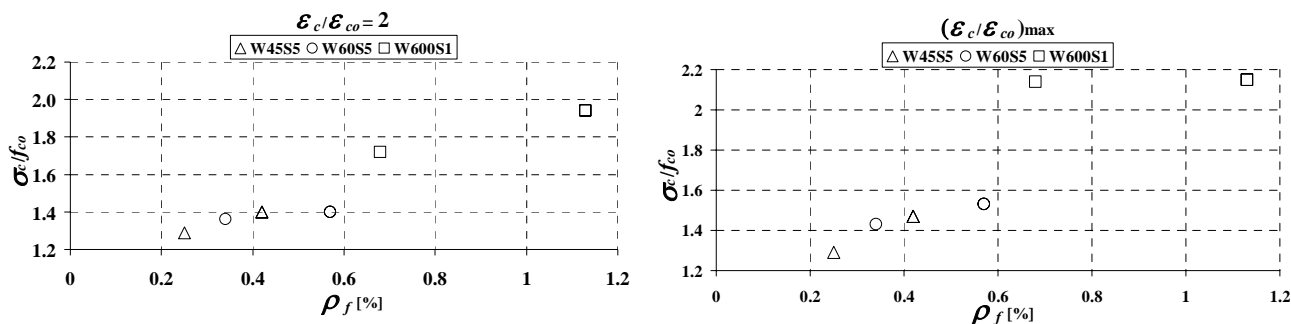


Figura 5.27 – Relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) para as séries do grupo C32S200φ10.

Da análise dos gráficos da Figura 5.27 verifica-se que:

- a capacidade de carga aumentou com ( $\rho_f$ );
- para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}=2$  o nível de incremento de capacidade de carga, para as séries parcialmente confinadas, com 3 e 5 camadas, foi de apenas 5% e 10% para as séries confinadas com faixas de 60 mm e 45 mm, respectivamente. Para as séries totalmente confinadas foi de 24%.

### 5.8.4 Relação entre a variação de energia ( $\Delta U/U_c$ ) e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ )

Na Figura 5.28 representa-se a eficácia dos sistemas de confinamento em termos de capacidade de absorção de energia, avaliada a partir da relação  $\Delta U/U_c$ - $\rho_f$ , para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  de 2 e max. O modo como  $\Delta U$  e  $U_c$  foram obtidos está descrito na secção 5.1.4.

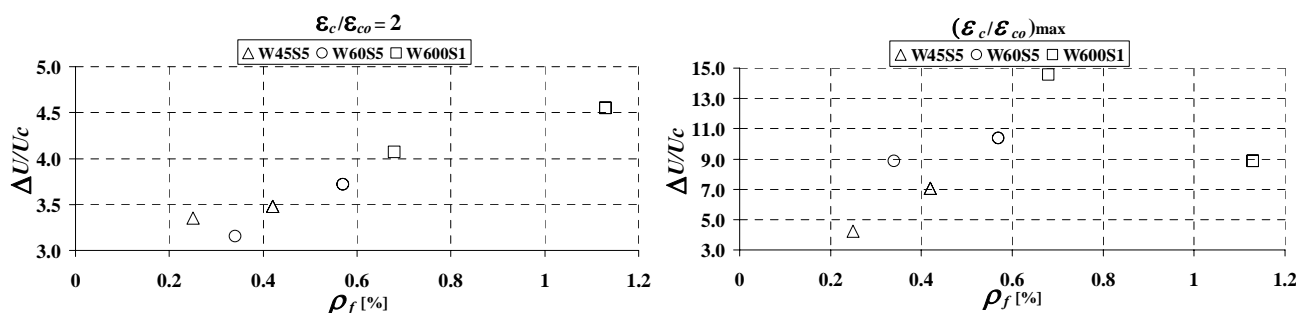


Figura 5.28 – Relação entre a variação de energia ( $\Delta U/U_c$ ) e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) para as séries do grupo C32S200φ10.

Da análise dos gráficos apresentados na Figura 5.28 observa-se que:

- a capacidade de absorção de energia aumentou com  $\rho_f$ ;
- para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}=2$ , a série W45S5 obteve um valor de  $\Delta U/U_c$  de 3.4 e 3.5 para 3 e 5 camadas, respectivamente. Para a série W60S5 o valor  $\Delta U/U_c$  foi de 3.2 e 3.7 para os provetes confinados com três e cinco camadas, respectivamente;
- a série W600S1L3 foi a mais efectiva em termos de aumento de capacidade de absorção de energia do provete;
- para  $(\varepsilon_c/\varepsilon_{co})_{max}$  a série W600S1L5 teve um incremento de capacidade de absorção de energia inferior ao esperado, mas este comportamento é justificado observando os gráficos da figura 5.24. A área abaixo da curva tensão-extensão axial para o provete W600S1L5 é inferior a do provete W600S1L3 e como a energia necessária para produzir a rotura é dada por essa área, então o  $\Delta U/U_c$  para o provete W600S1L5 foi de apenas 9 enquanto para o provete W600S1L3 foi de 15.

## 5.9 ENSAIOS DO GRUPO C32S300 $\phi$ 8

As séries do grupo C32S300 $\phi$ 8 representam os ensaios realizados em provetes de betão com uma resistência à compressão, aos 28 dias, de 32 MPa e armados com varões longitudinais  $\phi$ 8. Os provetes deste grupo foram reforçados com manta de CFRP designada comercialmente por CF130 S&P 240 com 300 g de fibra por m<sup>2</sup> de manta e 0.176 mm de espessura.

### 5.9.1 Curvas tensão versus extensão e síntese dos resultados mais relevantes

Na Figura 5.29 representa-se a relação entre a tensão axial de compressão ( $\sigma_c$ ) e a extensão axial do provete bem como a relação entre  $\sigma_c$  e a extensão no CFRP. Na Tabela 5.8 apresentam-se os valores dos indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento utilizados nesta série de ensaios.

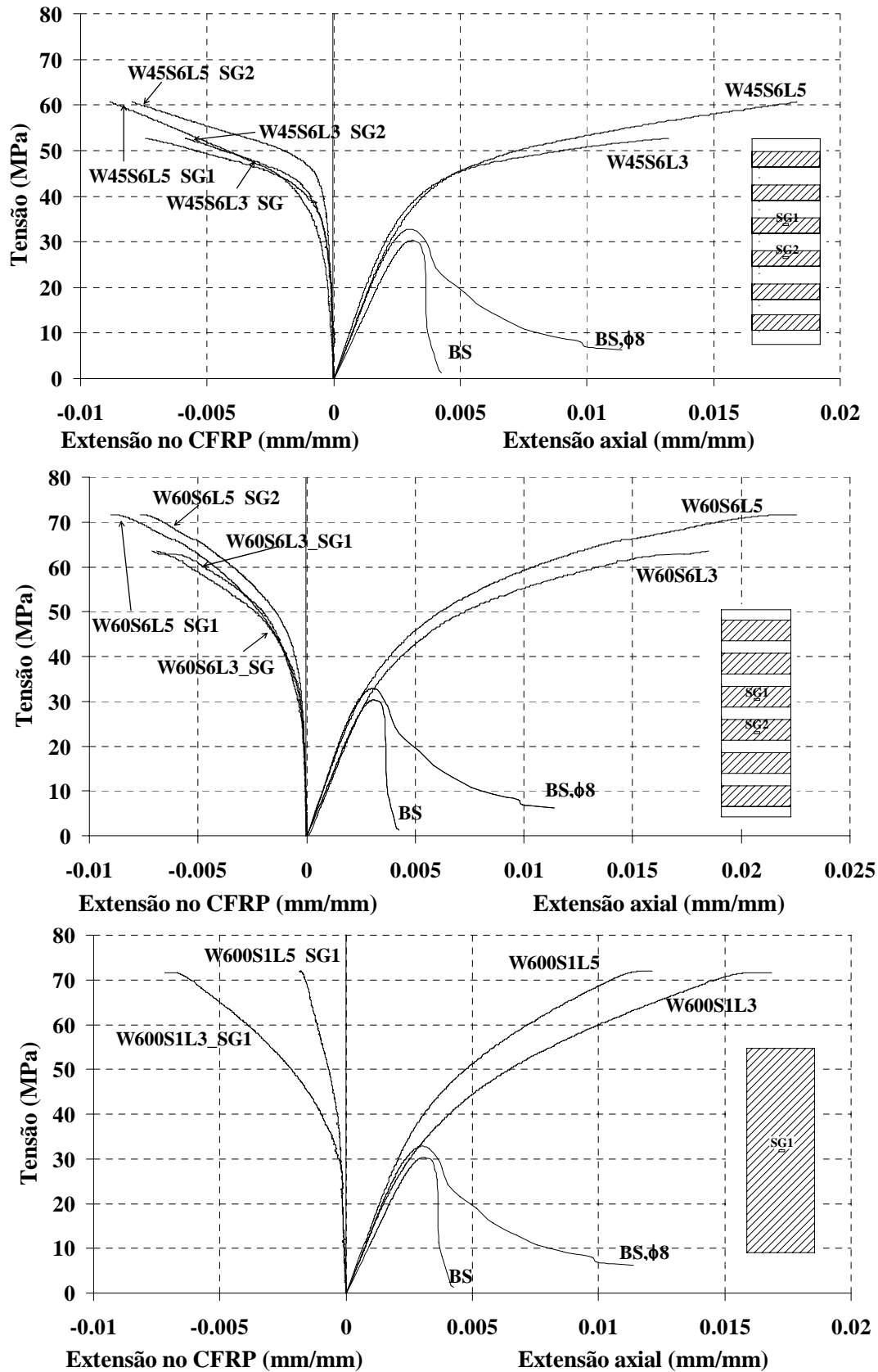


Figura 5.29 – Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries do grupo C32S300φ8.

Tabela 5.8 - Indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento referentes ao grupo C32S300φ8

Desig. do provete	S	Idade provete	Tipo manta	L	$\rho_f$ [%]	$f_{cc}$ (MPa)	$\varepsilon_{cc}$	$f_{cc}/f_{co}$	$\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$	$\varepsilon_s$	$\varepsilon_{fmax}$	$\varepsilon_{fmax}/\varepsilon_{fu}$	$\varepsilon_{fl}/\varepsilon_{fl,r}$
Betão simples BS				-	-	30.31 ( $f_{co}$ )	0.0031 ( $\varepsilon_{co}$ )	-	-		-	-	-
Betão simples_BS,φ8						32.80 ( $f_{co}$ )	0.0030 ( $\varepsilon_{co}$ )	-	-	0.0273 (SG1)	-	-	-
										0.03256 (SG2)			
W45S6L3	6	90 (dias)	CF130 S&P C-240 (300g/m <sup>2</sup> )	3	0.48	52.76	0.0132	1.60	4.40	0.0282 (SG1)	0.00743 (SG1)	0.47 (SG1)	1.0
W45S6L5	6			5	0.80	60.70	0.0185	1.85	6.17	0.0285 (SG1)	0.00883 (SG1)	0.57 (SG1)	0.94
W60S6L3	6			3	0.63	63.50	0.0185	1.94	6.17	0.0290 (SG1)	0.00689 (SG3)	0.44 (SG1)	1.0
W60S6L5	6			5	1.06	71.52* 84.44**	0.0225	2.18* 2.57**	7.50	0.0286 (SG1)	0.00902 (SG1)	0.58 (SG1)	1.04
W600S1L3	1			3	1.06	71.56* 93.59**	0.0168	2.18* 2.86**	5.60	0.0282 (SG1)	0.00718 (SG1)	0.46 (SG1)	2.66
W600S1L5	1			5	1.76	71.88* 111.1**	0.0121	2.19* 3.27**	4.03	0.0291 (SG1)	0.00188 (SG1)	0.12 (SG1)	1.0

\*valores registados quando a capacidade de carga do equipamento foi atingida sem haver rotura do provete

\*\* valores registados quando os provetes atingem a rotura.

Da análise das curvas dos gráficos da Figura 5.29 e dos valores incluídos na Tabela 5.8 podem sintetizar-se as seguintes observações:

- o valor máximo de  $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$  foi próximo de 8;
- nos provetes confinados parcialmente a extensão máxima no CFRP ( $\varepsilon_{fmax}$ ) variou entre 38% e 58% da sua extensão de rotura;
- quanto ao parâmetro  $\varepsilon_{fl}/\varepsilon_{fl,r}$ , nesta série não se verificou a tendência deste parâmetro diminuir com o aumento de  $\rho_f$ , como aconteceu em séries anteriores, dado que na série W60S6L5 aquele parâmetro aumentou com o  $\rho_f$ . Para as séries totalmente confinadas os valores de  $\varepsilon_{fl}/\varepsilon_{fl,r}$  incluídos na Tabela 5.11 dizem respeito a provetes ensaiados sem que tenham atingido a sua capacidade máxima de carga;
- as séries W60S6L5 e W600S1L3, com igual  $\rho_f$ , obtiveram incrementos de capacidade de carga semelhantes, enquanto em termos de  $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$  foi de 7.5 e 5.6, respectivamente.

### 5.9.2 Curvas $\sigma_c/f_{co}$ versus $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$

Na Figura 5.30 representam-se as curvas  $\sigma_c/f_c$  versus  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  para as séries do grupo C32S300 $\phi$ 8. Estes gráficos evidenciam o incremento da capacidade de carga proporcionado pelos sistemas de confinamento aplicados.

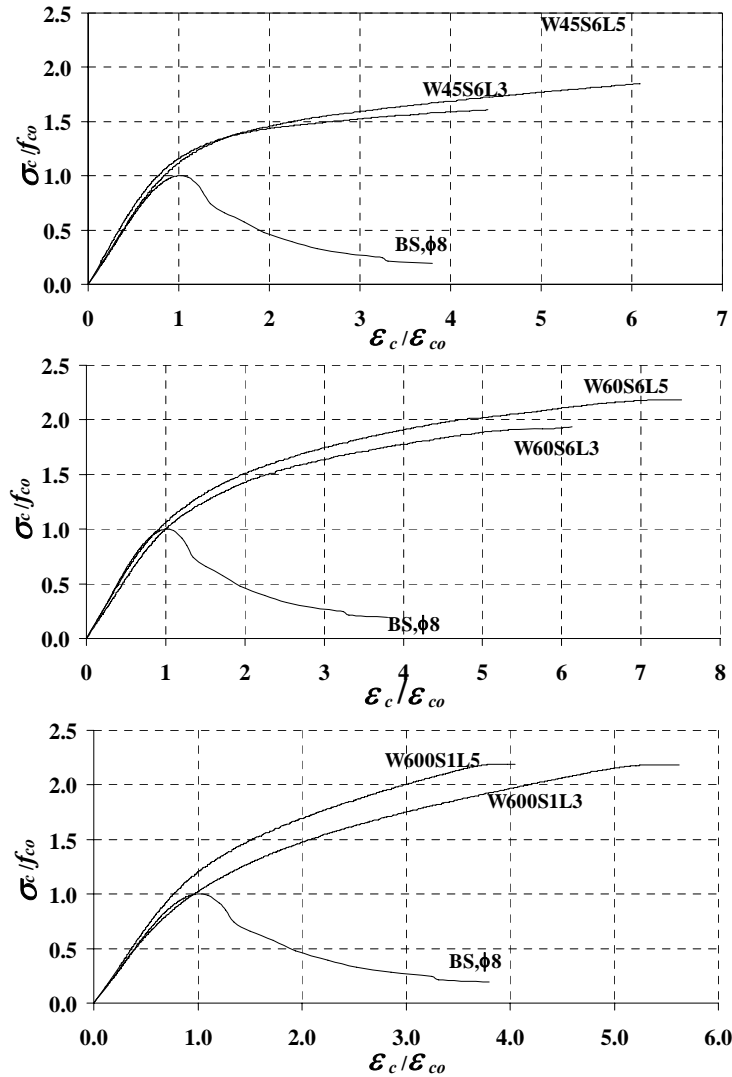


Figura 5.30 – Curvas  $\sigma_c/f_{co}$  versus  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  para as séries do grupo C32S300 $\phi$ 8.

Nas séries confinadas com quatro faixas de 45 mm de largura de 3 e 5 camadas a capacidade de carga aumentou 1.60 e 1.85 vezes o valor registado na série não confinada. Em termos de  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  o aumento foi de 4.4 e 6.2 nas séries W45S6L3 e W45S6L5, respectivamente.

Nas séries com faixas de 60 mm de largura de 3 e 5 camadas, o aumento em termos de capacidade de carga foi 1.9 e 2.18, respectivamente, enquanto em termos de  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  foi de 6 e 7.5 nas séries W60S6L3 e W60S6L5. Um dos provetes confinadas com 5

camadas de faixas de 60 mm não atingiu a rotura até aos 2500 kN pelo que o provete voltou a ser ensaiado, mas agora sob controlo manual.

### 5.9.3 Relação entre $\sigma_c/f_{co}$ e percentagem de confinamento ( $\rho_f$ )

Na Figura 5.31 representa-se a relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e  $\rho_f$  para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  de 2, 3, 4 e valor máximo.

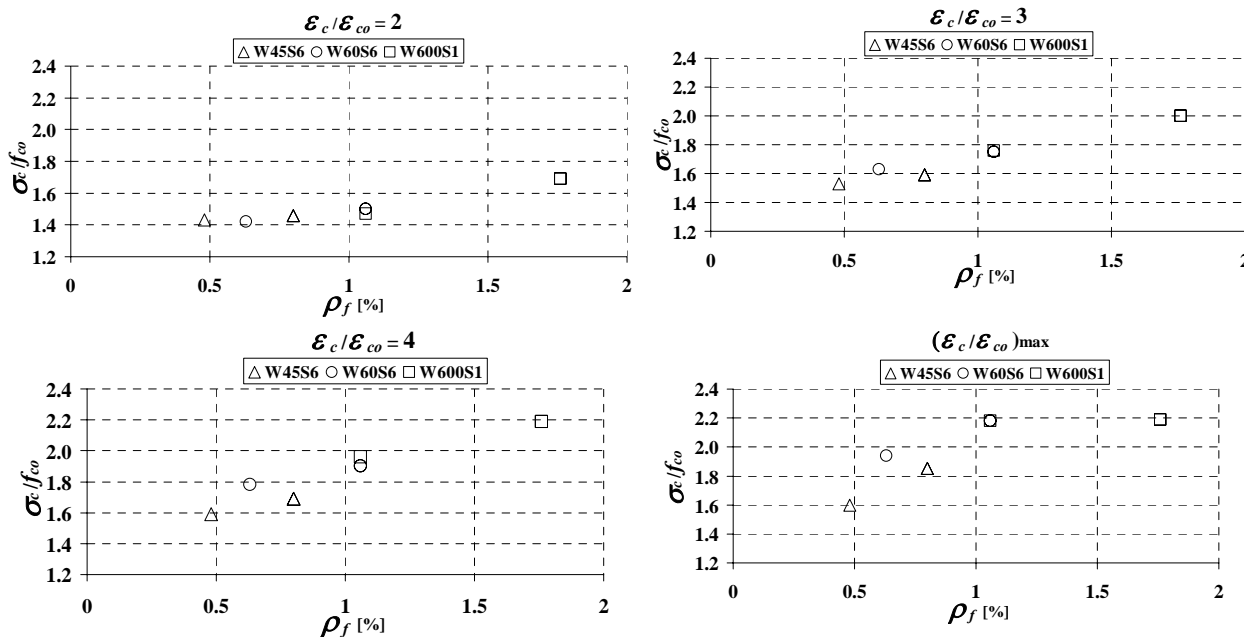


Figura 5.31 – Relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) para as séries do grupo C32S300 $\phi$ 8.

Da análise dos gráficos da Figura 5.31 verifica-se que:

- a capacidade de carga aumentou com  $\rho_f$ ;
- para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}=2$  a diferença de incremento de capacidade de carga, para a série W45S6 com 3 e 5 camadas foi 3%, enquanto para a W60S6 foi de 8 %. Para as séries totalmente confinadas essa diferença foi de 22%;
- independentemente do valor de  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$ , a capacidade de carga das séries com igual  $\rho_f$  foi similar.

### 5.9.4 Relação entre a variação de energia ( $\Delta U/U_c$ ) e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ )

Na Figura 5.32 representa-se a eficácia dos sistemas de confinamento em termos de capacidade de absorção de energia, avaliada a partir da relação  $\Delta U/U_c-\rho_f$ , para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  de 2, 3, 4 e max. O modo como  $\Delta U$  e  $U_c$  foram obtidos está descrito na secção 5.1.4.

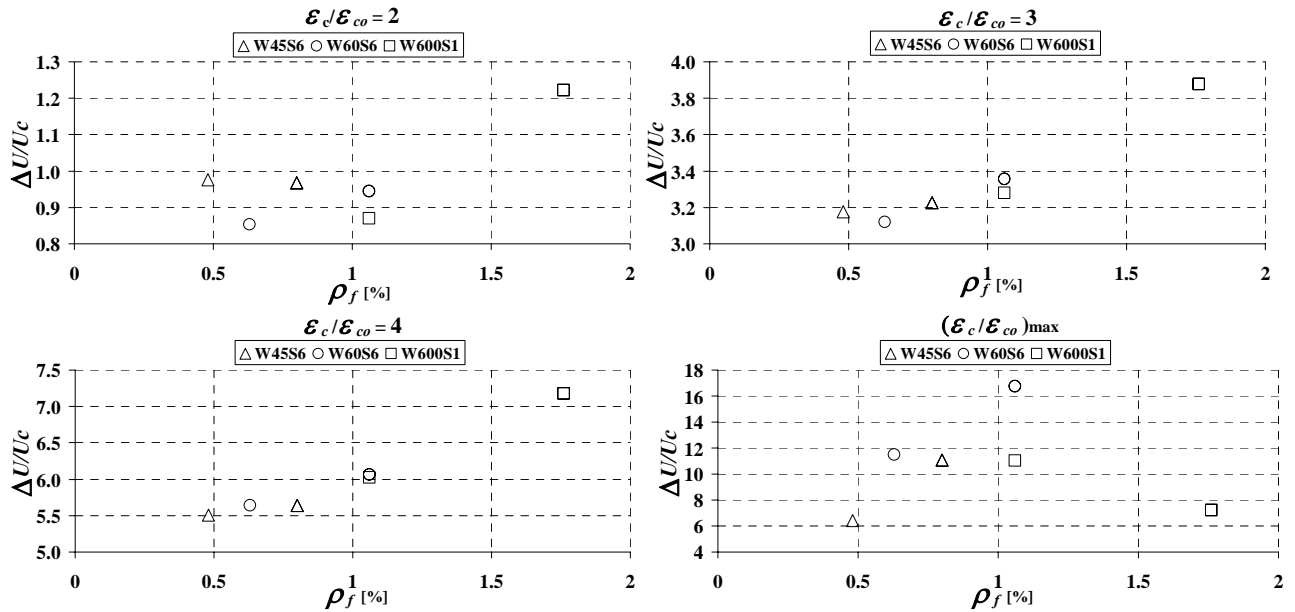


Figura 5.32 – Relação entre a variação de energia ( $\Delta U/U_c$ ) e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) para as séries do grupo C32S300 $\phi$ 8.

Da análise dos gráficos apresentados na Figura 5.32 observa-se que:

- para  $\epsilon_c/\epsilon_{co}=2, 3$  e  $4$ , a capacidade de absorção de energia aumentou com  $\rho_f$ ;
- para  $\epsilon_c/\epsilon_{co}=2$ ,  $\Delta U/U_c$  foi ligeiramente inferior ao valor unitário, excepto para a série W600S1L5, enquanto para  $(\epsilon_c/\epsilon_{co})_{max}$   $\Delta U/U_c$  foi cerca de 6.
- para  $(\epsilon_c/\epsilon_{co})_{max}$ ,  $\Delta U/U_c$  da série W600S1L5 foi próximo de 7 enquanto para a série W600S1L3 foi de 11.

## 5.10 ENSAIOS DO GRUPO C32S300 $\phi$ 10

As séries do grupo C32S300 $\phi$ 10 representam os ensaios realizados em provetes de betão com resistência média à compressão, aos 28 dias, de 32 MPa, armados com varões longitudinais  $\phi$ 10. Os provetes deste grupo foram reforçados com manta de CFRP designada comercialmente por CF130 S&P 240 com 300 g de fibra por  $m^2$  de manta e 0.176 mm de espessura.

### 5.10.1 Curvas tensão versus extensão e síntese dos resultados mais relevantes

Na Figura 5.33 representa-se a relação entre a tensão axial de compressão ( $\sigma_c$ ) e a extensão axial do provete bem como a relação entre  $\sigma_c$  e a extensão no CFRP das séries do grupo de ensaios C32S300 $\phi$ 10.

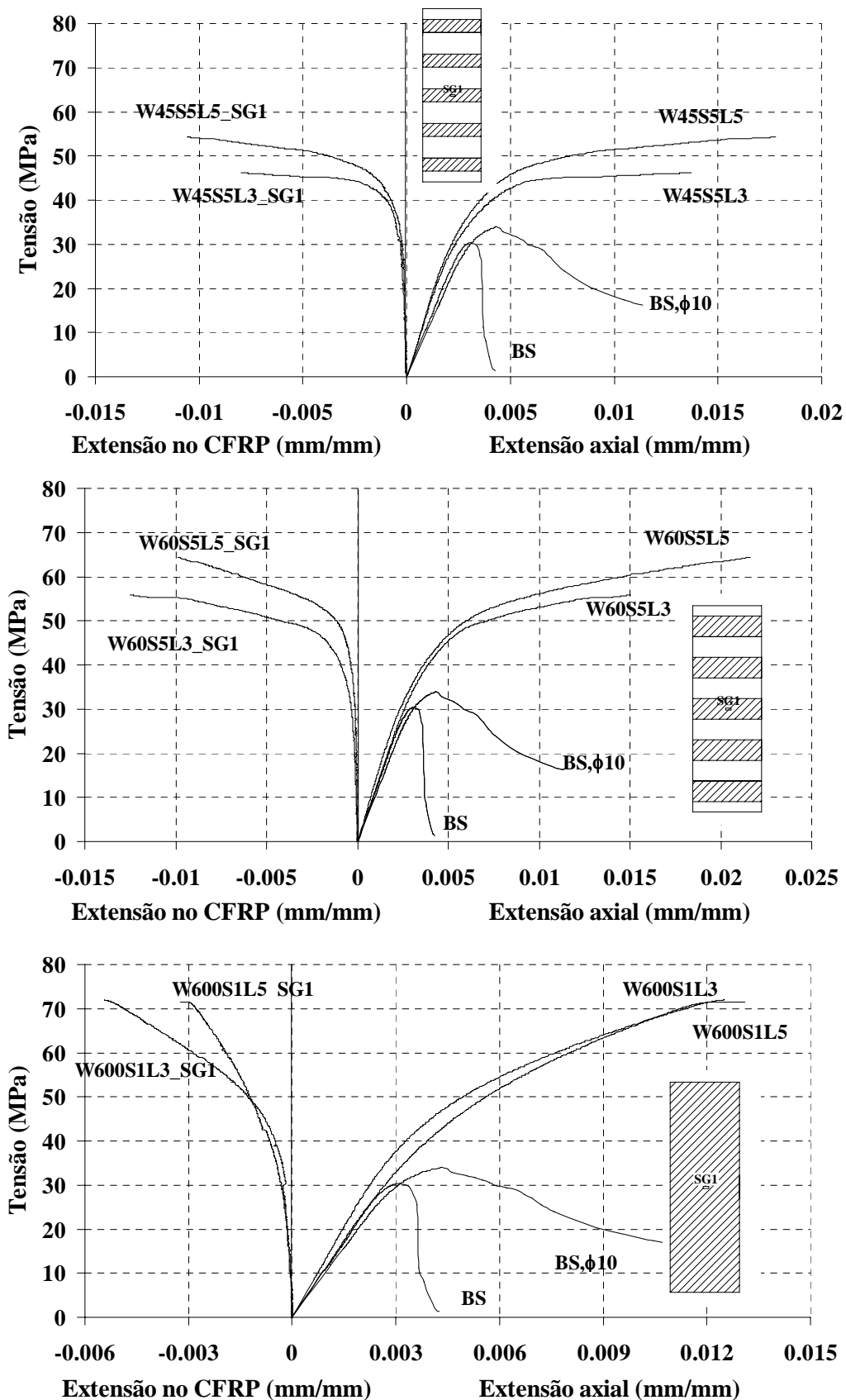


Figura 5.33 – Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries do grupo C32S300φ10.

Na Tabela 5.9 apresentam-se os valores dos indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento do grupo de séries de ensaios C32S300 $\phi$ 10.

Tabela 5.9 - Indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento referentes ao grupo C32S300 $\phi$ 10

Desig. do provete	S	Idade provetes	Tipo manta	L	$\rho_f$ [%]	$f_{cc}$ (MPa)	$\varepsilon_{cc}$	$f_{cc}/f_{co}$	$\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$	$\varepsilon_s$	$\varepsilon_{fmax}$	$\varepsilon_{fmax}/\varepsilon_{fu}$	$\varepsilon_{f1}/\varepsilon_{f1,r}$
Betão simples_BS				-	-	30.31 ( $f_{co}$ )	0.0031 ( $\varepsilon_{co}$ )	-	-		-	-	-
Betão simples_BS, $\phi$ 10						33.99 ( $f_{co}$ )	0.0043 ( $\varepsilon_{co}$ )	-	-	0.0271 (SG1) 0.0064 (SG2)	-	-	-
W45S5L3	5	90 (dias)	CF130 S&P C-240 (300g/m <sup>2</sup> )	3	0.40	46.11	0.0138	1.38	3.21	0.0171 (SG1) 0.0295 (SG2)	0.0080 (SG1)	0.51 (SG1)	1.0
W45S5L5	5			5	0.66	54.34	0.0177	1.63	4.12	0.0287 (SG1) 0.0270 (SG2)	0.010 (SG1)	0.65 (SG1)	1.03
W60S5L3	5			3	0.53	55.93	0.0150	1.67	3.49	0.0273 (SG1) 0.280 (SG2)	0.0125 (SG1)	0.81 (SG1)	1.0
W60S5L5	5			5	0.88	64.38	0.0216	1.93	5.02	0.0285 (SG1) 0.0278 (SG2)	0.0098 (SG1)	0.63 (SG1)	0.52
W600S1L3	1			3	1.06	71.99* 96.09**	0.0126	2.16	2.93	0.0279 (SG1) 0.0271 (SG2)	0.0054 (SG1)	0.35 (SG1)	1.0
W600S1L5	1			5	1.76	71.43 111.12**	0.0131	2.14	3.05	0.0264 (SG1) 0.0249 (SG2)	0.0032 (SG1)	0.21 (SG1)	0.60

\*valores registados quando a capacidade de carga do equipamento (funcionando em malha fechada) foi atingida sem haver rotura do provete

\*\* valores registados quando os provetes alcançaram a sua rotura.

Da análise dos valores incluídos na Tabela 5.9 e das curvas dos gráficos da Figura 5.33 podem extrair-se as seguintes observações:

- das séries parcialmente confinadas as W60S5 foram as que registaram maiores aumentos da capacidade de carga, cerca de 30% mais que os valores registados nas séries W45S5 para três e cinco camadas;
- para as séries parcialmente confinadas o valor máximo de  $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$  foi próximo de 5,
- para as séries W45S5 e W60S5 a extensão máxima no CFRP ( $\varepsilon_{fmax}$ ) variou entre 50% e 80% da sua extensão de rotura. Nas séries W600S1 esse valor variou entre 21% e 35%, no entanto estes valores não correspondem à rotura dos provetes, pois esta não ocorreu quando foi alcançada a máxima capacidade do equipamento, trabalhando como servo-mecanismo;

### 5.10.2 Curvas $\sigma_c/f_{co}$ versus $\epsilon_c/\epsilon_{co}$

Na Figura 5.34 representam-se as curvas  $\sigma_c/f_{co}$  versus  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  para as séries do grupo C32S300 $\phi$ 10. Estes gráficos evidenciam o incremento da capacidade de carga proporcionado pelos sistemas de confinamento aplicados.

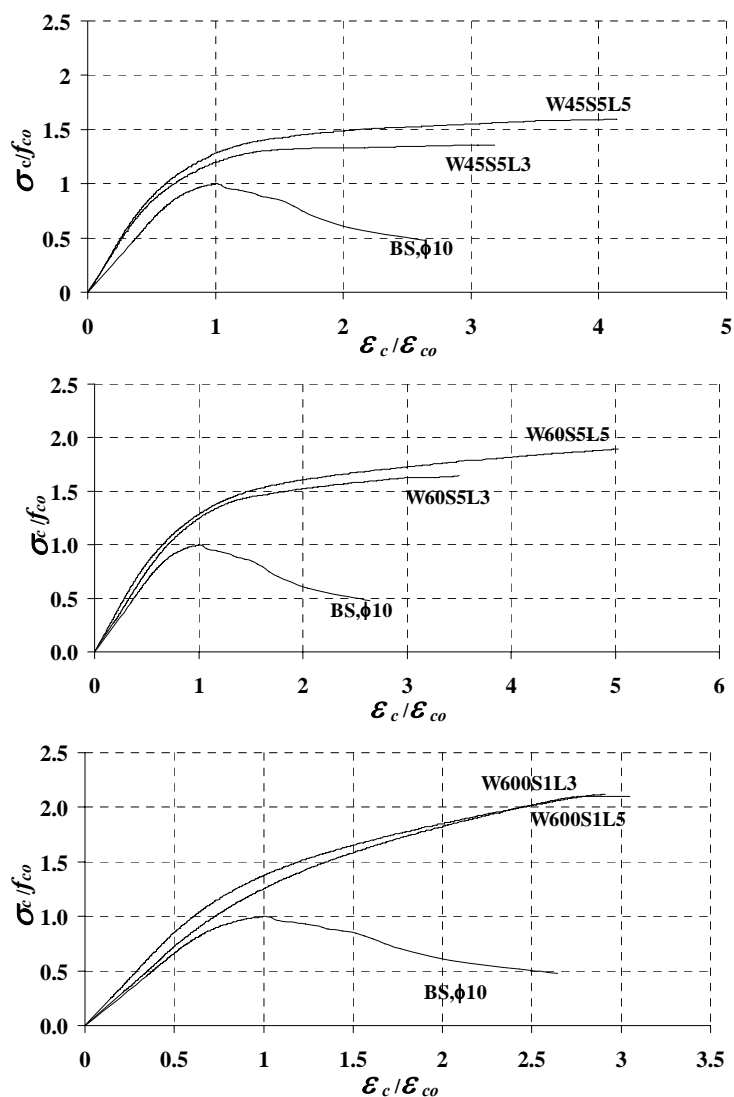


Figura 5.34 – Curvas  $\sigma_c/f_{co}$  versus  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  para as séries do grupo C32S300 $\phi$ 10.

Nas séries confinadas com cinco faixas de 45 mm de largura a capacidade de carga aumentou 1.4 e 1.6 vezes os valores registados na série não confinada. A série confinada com 5 camadas obteve um incremento de capacidade de carga 20% superior ao registado na série confinada com 3 camadas. Em termos de  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  o aumento foi de 3 e 4 nas séries W45S4L3 e W45S4L5, respectivamente.

Nas séries com faixas de 60 mm de largura de 3 e 5 camadas, o aumento em termos de capacidade de carga foi 1.7 e 1.9, respectivamente, enquanto em termos de  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  foi 3.5 e

5 nas séries W60S3L3 e W60S3L5. Tal como nas séries confinadas com faixas de 45 mm também esta série teve uma diferença de 20% de incremento na capacidade de carga entre os provetes confinados com 3 e 5 camadas de CFRP.

### 5.10.3 Relação entre $\sigma_c/f_{co}$ e percentagem de confinamento ( $\rho_f$ )

Na Figura 5.35 representa-se a relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e  $\rho_f$  para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co} = 2$  e para um nível de deformação correspondente ao valor máximo de  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$ .

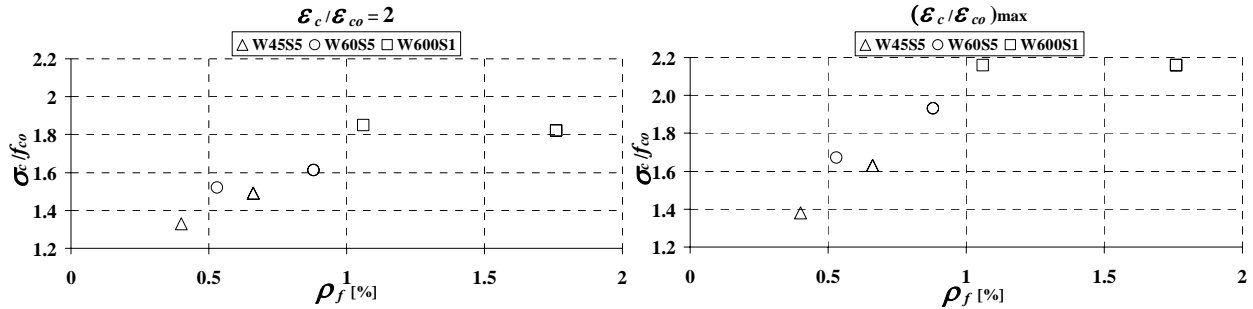


Figura 5.35 – Relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) para as séries do grupo C32S300 $\phi$ 10.

Da análise dos gráficos da Figura 5.35 verifica-se que:

- a capacidade de carga aumentou com  $\rho_f$ ;
- para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}=2$  o incremento de capacidade de carga, para as séries W45S6 e W60S6, foi de aproximadamente 1.5 vezes;
- na rotura, as séries W45S5 e W60S5 atingiram valores de aumento de capacidade de carga da ordem de 1.6 e 1.9, enquanto nas série W600S1 a capacidade de carga mais do que duplicou a série de referência.

### 5.10.4 Relação entre a variação de energia ( $\Delta U/U_c$ ) e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ )

Na Figura 5.36 representa-se a eficácia dos sistemas de confinamento em termos de capacidade de absorção de energia, avaliada a partir da relação  $\Delta U/U_c$ - $\rho_f$ , para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  de 2 e max. O modo como  $\Delta U$  e  $U_c$  foram obtidos está descrito na secção 5.1.4.

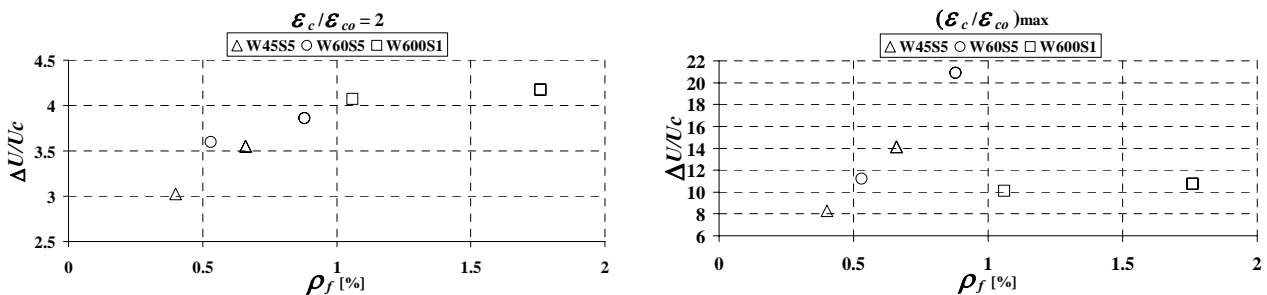


Figura 5.36 – Relação entre a variação de energia ( $\Delta U/U_c$ ) e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ )

Da análise dos gráficos apresentados na Figura 5.36 verifica-se que:

- a capacidade de absorção de energia aumentou com  $\rho_f$ ,
- para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}=2$ ,  $\Delta U/U_c$  variou entre 3 e 4.5, enquanto para  $(\varepsilon_c/\varepsilon_{co})_{max}$ ,  $\Delta U/U_c$  foi cerca de 22.

### 5.11 MODOS DE ROTURA TÍPICOS DOS PROVETES C30/35

Na Figura 5.37 é caracterizada e localizada a rotura típica verificada nas diferentes séries constituídas por betão da classe de resistência C30/35.


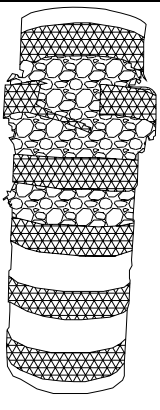

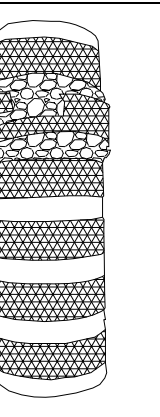

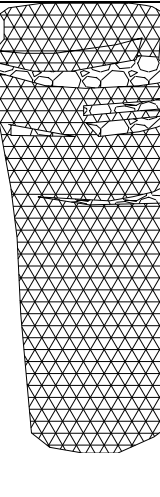
<p>Provetes confinados com faixas de 45 mm</p>			<p>Em geral, a rotura ocorreu nas faixas superiores.</p> <p>Em todos os provetes verificou-se esmagamento do betão entre faixas e posterior rotura de uma ou mais faixas na zona de concentração de maior dano do betão.</p>
<p>Provetes confinados com faixas de 60 mm</p>			<p>De um modo geral, os provetes apresentaram um dano elevado no betão, em especial na parte superior do provete, zona onde se localizou a rotura das faixas de fibra de carbono.</p> <p>A rotura dos provetes confinados com 5 camadas caracterizou-se por ser muito violenta.</p>
<p>Provetes totalmente confinados</p>			<p>A rotura caracterizou-se por ser muito violenta e o betão no interior da manta ficou completamente desagregado.</p>

Figura 5.37 – Modos de rotura dos provetes do grupo C16S200φ8.

## 5.12 SÍNTESE DAS PRINCIPAIS OBSERVAÇÕES REGISTRADAS NOS PROVETES C30/35

A rigidez da manta é um dos factores responsáveis pelo tipo de rotura do provete. Os provetes reforçados com manta CF120 S&P 240 (menos rígida,  $e = 0.113$  mm) tiveram roturas mais violentas e o betão ficou mais danificado que os provetes reforçados com manta CF130 S&P 240 ( $e = 0.176$  mm).

A capacidade de carga dos provetes aumentou com  $\rho_f$ . Em séries com a mesma percentagem de confinamento de CFRP verificou-se maiores aumentos de capacidade de carga nas que dispunham de menor espaço livre entre faixas. Este comportamento foi mais acentuado nas séries confinadas com a manta de maior rigidez ( $300$  g/m<sup>2</sup>), dado que, quanto mais rígido for o sistema de confinamento discreto, maior concentração de dano ocorre no betão entre as faixas de confinamento. As séries de provetes do grupo C32S300 $\phi$ 8 foram as que registaram maiores incrementos quer em termos de capacidade de carga quer em termos de ductilidade.

No que se refere à extensão máxima no CFRP, os valores registados dependem significativamente dos modos de rotura ocorridos, dado que as extensões registadas apenas representam o estado de extensão da zona onde os extensómetros ficaram colados, mas, em geral, as extensões mais elevadas foram registadas nas faixas superiores onde ocorreu a rotura do confinamento, bem como nos provetes com menor percentagem de confinamento.

Em termos do parâmetro do índice de ductilidade ( $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$ ) verificou-se que aumenta com a percentagem de confinamento.

Neste grupo de ensaios, o parâmetro  $\varepsilon_f/\varepsilon_{f,r}$  apresentou uma tendência clara de diminuir com o aumento de  $\rho_f$ , para todas as séries.

A capacidade de absorção de energia ( $\Delta U/U_c$ ) aumentou com  $\rho_f$ , tendo esse aumento sido mais significativo nos provetes totalmente confinados.

### 5.13 INFLUÊNCIA DO TIPO DE BETÃO NA EFICÁCIA DO CONFINAMENTO

No programa experimental do presente trabalho pretendeu-se avaliar a influência da resistência do betão no nível de confinamento alcançado. Foram considerados dois níveis de resistência média à compressão aos 28 dias, 16 MPa e 32 MPa. Para tal, os resultados obtidos em séries com o mesmo tipo de manta e com o mesmo tipo de armadura longitudinal, mas com betão de distinta resistência, foram comparados. Pormenores sobre este estudo podem ser encontrados em Ferreira e Barros [2007]. Assim, foram comparados os resultados das séries C16S200φ8 e C32S200φ8, das séries C16S200φ10 e C32S200φ10, das séries C16S300φ8 e C32S300φ8 e das séries C16S300φ10 e C32S300φ10.

Nesta secção são apresentados e analisados, como exemplo representativo do comportamento das séries ensaiadas em termos de influência de betão, os dois grupos de séries de ensaios C16S200φ8 e C32S200φ8.

Na Figura 5.38 apresenta-se a relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e  $\rho_f$  para  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  de 2, 3 e para a extensão máxima (max) referente aos grupos de ensaios C16S200φ8 e C32S200φ8, ou seja, comparam-se os resultados obtidos nas séries de provetes confinados com manta CF120 S&P 240 de 200 g de fibra por m<sup>2</sup> de manta e armados com varões longitudinais φ8.

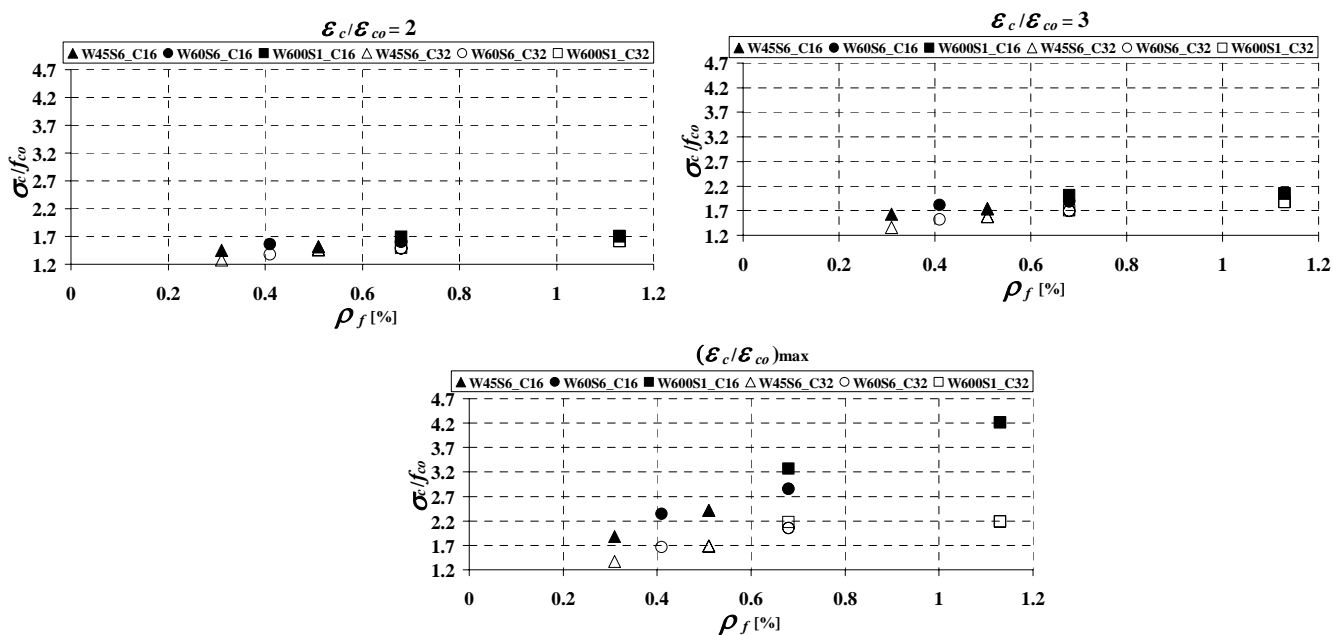


Figura 5.38 – Relação entre  $\sigma_c/f_c$  e  $\rho_f$  referente aos grupos de ensaios C16S200φ8 e C32S200φ8.

Da análise da Figura 5.38 verifica-se que:

- para todos os níveis de extensão axial analisados, o aumento de  $\sigma_c/f_{co}$  com  $\rho_f$  é tão mais pronunciado quanto menor é a resistência do betão, sendo esta tendência tão mais evidente quanto maior é o nível de deformação;
- nas séries de igual percentagem de confinamento, como é o caso das séries W60S6L5 e W600S1L3, a efectividade do confinamento contínuo, em relação ao confinamento discreto é tão mais pronunciada quanto menor é a resistência do betão, dado que nos provetes parcialmente confinados, a concentração de dano entre cintas é tão mais significativa quanto menor é a resistência do betão.

Na Figura 5.39 apresenta-se a relação entre  $\Delta U/U_c$  e  $\rho_f$  para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  de 2, 3 e para a extensão máxima (max), referentes às séries de ensaios dos grupos C16S200φ8 e C32S200φ8.

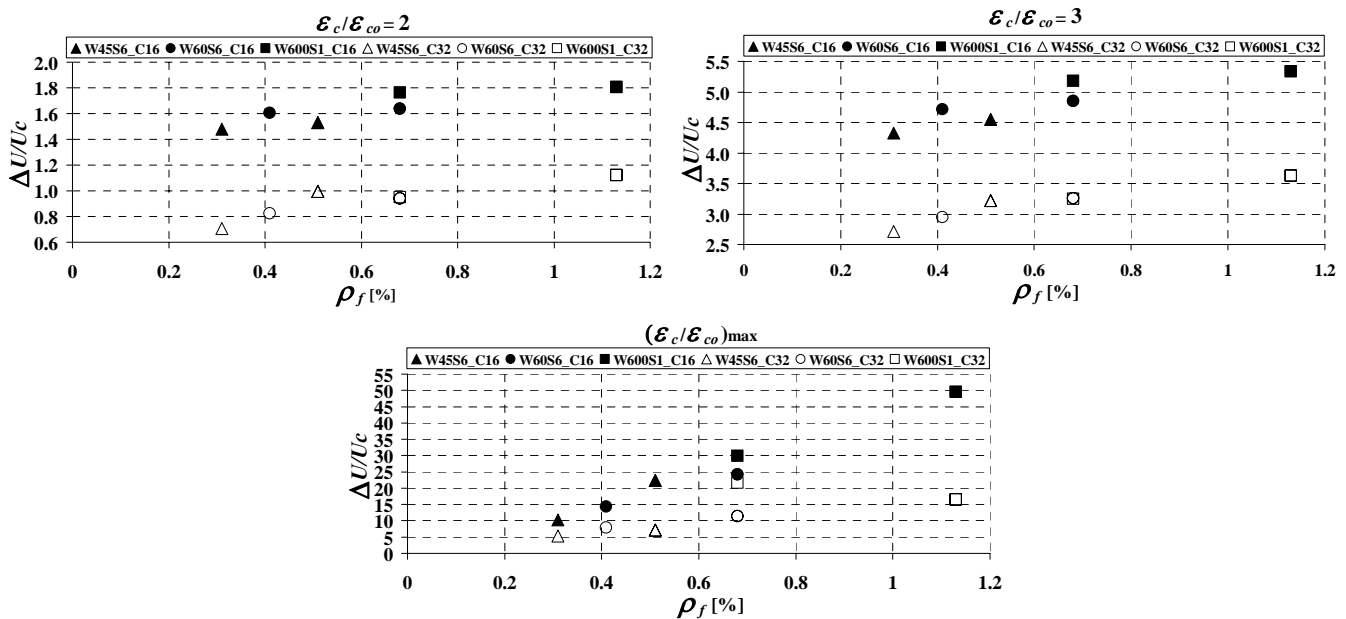


Figura 5.39 – Relação entre  $\Delta U/U_c$  referente aos grupos de ensaios C16S200φ8 e C32S200φ8.

Da análise da Figura 5.39 verifica-se que:

- para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  de 2, 3 e max, os provetes de betão de menor resistência à compressão alcançaram maiores valores de  $\Delta U/U_c$ . As diferenças  $\Delta U/U_c$  entre as séries em análise variaram entre os 50% e os 80% para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co} = 2$ . Com o aumento dos níveis de deformação estas diferenças aumentaram, a eficácia dos sistemas de CFRP em termos de aumento de capacidade de absorção de energia é tão maior quanto menor for a resistência do betão (dentro dos limites estudados e no âmbito do presente trabalho);

- para as séries de igual percentagem de confinamento a série W600S1L3 teve maior capacidade de absorção de energia ( $\Delta U/U_c$ ) do que a série W60S6L5. Esta diferença foi mais pronunciada nos provetes de betão de menor resistência à compressão.

#### 5.14 INFLUÊNCIA DO TIPO DE MANTA NA EFICÁCIA DO CONFINAMENTO

No programa experimental do presente trabalho pretendeu-se avaliar a influência do tipo de manta no nível de confinamento alcançado. Foram considerados dois tipos de manta distintos, uma designada por CF130 S&P 240 de 300 g de fibra por m<sup>2</sup> de manta e outra designada por CF120 S&P 240 de 200 g de fibra por m<sup>2</sup> de manta. Para se avaliar a influência do tipo de manta na eficácia do confinamento, os resultados obtidos em séries com o mesmo tipo de betão e com o mesmo tipo de armadura longitudinal, mas com distinto tipo de manta, foram comparados. Pormenores sobre este estudo podem ser encontrados em Ferreira e Barros [2007]. Assim, serão comparados os resultados dos grupos C16S200 $\phi$ 8 e C16S300 $\phi$ 8, do grupo C16S200 $\phi$ 10 e C16S300 $\phi$ 10, do grupo C32S200 $\phi$ 8 e C32S300 $\phi$ 8 e do grupo C32S200 $\phi$ 10 e C32S300 $\phi$ 10. Nesta secção é apresentado e analisado, como exemplo representativo do comportamento das séries ensaiadas em termos de influência do tipo de manta, os dois grupos de séries de ensaios C16S200 $\phi$ 8 e C16S300 $\phi$ 8.

Na Figura 5.40 apresenta-se a relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e  $\rho_f$  para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  de 2, 3, 4 e max referentes aos grupos de ensaios C16S200 $\phi$ 8 e C16S300 $\phi$ 8, ou seja, comparam-se os resultados obtidos nas séries de ensaios de provetes com o mesmo tipo de betão, isto é, de 16 MPa de resistência à compressão e com a mesma armadura longitudinal  $\phi$ 8.

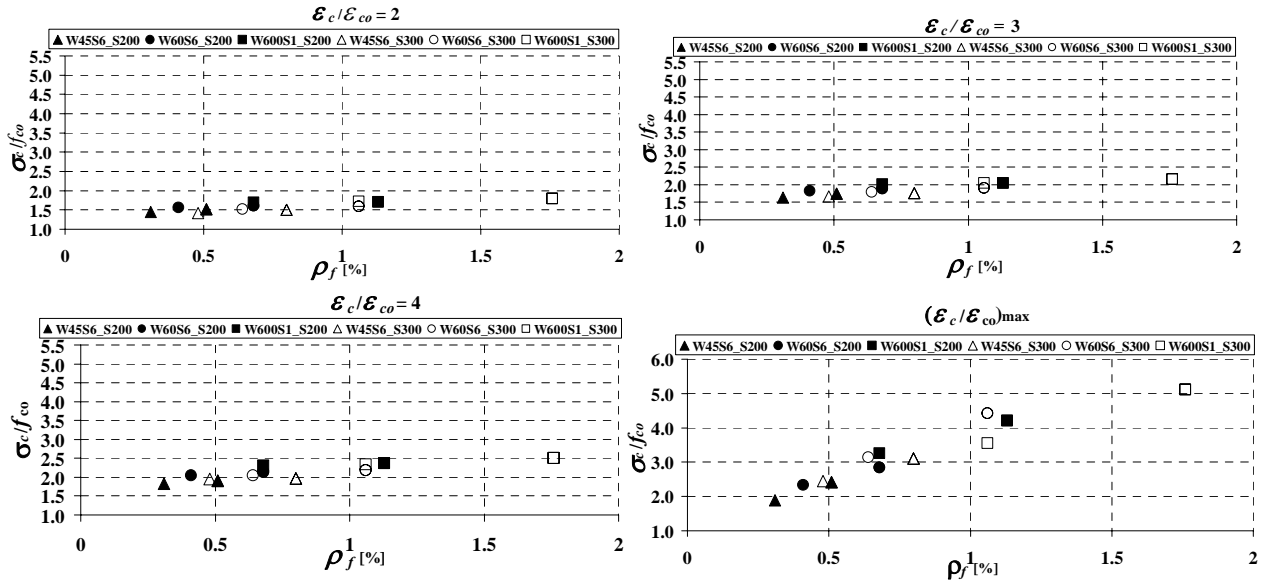


Figura 5.40 – Relação entre  $\sigma_c/f_c$  e  $\rho_f$  referente aos grupos de ensaios C16S200φ8 e C16S300φ8.

Da análise da Figura 5.40 verifica-se que:

- Para todos os níveis de deformação não são registadas diferenças significativas nos valores de  $\sigma_c/f_c$  entre as séries de provetes reforçados com a manta tipo CF130 S&P 240 com 300 g/m<sup>2</sup> e as séries de provetes reforçados com a manta tipo CF120 S&P 240 com 200 g/m<sup>2</sup>.

Na Figura 5.41 apresenta-se a relação entre  $\Delta U/U_c$  e  $\rho_f$  para  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  de 2, 3 e max referentes às séries de ensaios dos grupos C16S200φ8 e C16S300φ8.

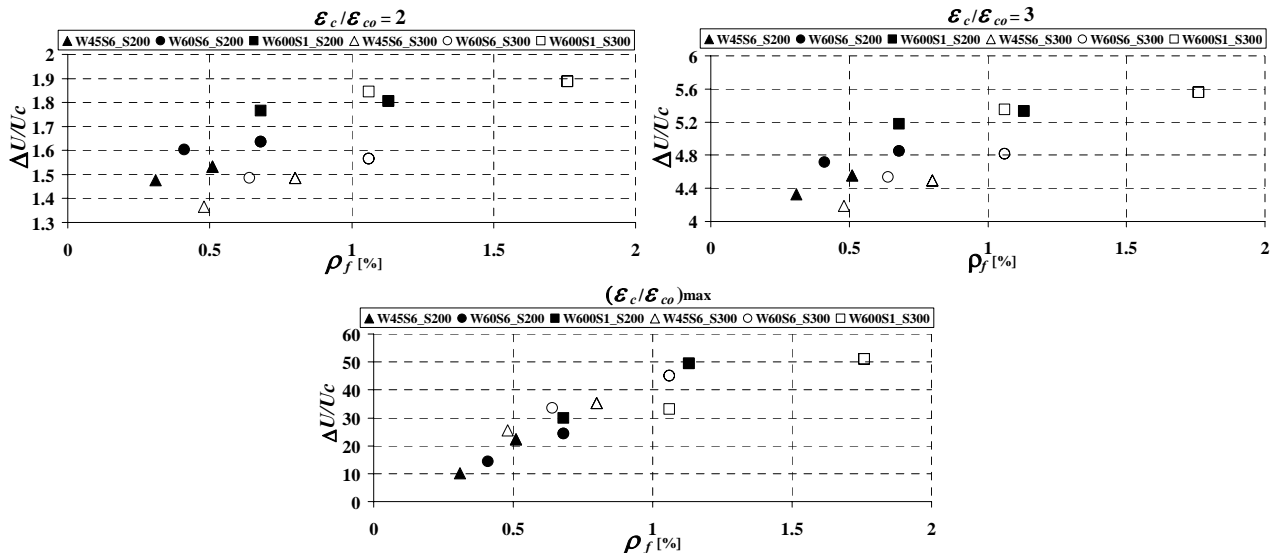


Figura 5.41 – Relação entre  $\Delta U/U_c$  referente aos grupos de ensaios C16S200φ8 e C16S300φ8.

Da análise da Figura 5.41 verifica-se que:

- para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  de 2 e 3 constata-se que nas séries confinadas parcialmente com a manta de 200 g/m<sup>2</sup> de manta foram alcançados maiores valores de  $\Delta U/U_c$  que as séries confinadas com a manta de 300 g/m<sup>2</sup> de manta.

### 5.15 INFLUÊNCIA DA PERCENTAGEM DE ARMADURA LONGITUDINAL NA EFICÁCIA DO CONFINAMENTO

No programa experimental do presente trabalho pretendeu-se avaliar a influência da armadura longitudinal no nível de confinamento alcançado. Foram consideradas duas percentagens de armadura longitudinal  $\rho_{sl} = \phi 8$  e  $\rho_{sl} = \phi 10$  que correspondem, respectivamente, a 4 $\phi 8$  e a 4 $\phi 10$ . Notar que a percentagem de cintas também variou com a variação de  $\rho_{sl}$ , dado que o espaçamento entre cintas respeitou o recomendado no REBAP, isto é, 12 $\phi$ l, em que  $\phi$ l é o diâmetro dos varões longitudinais. Para se avaliar a influência da percentagem de armadura longitudinal na eficácia do confinamento, os resultados obtidos em séries com o mesmo tipo de manta e de betão mas com percentagem distinta de armadura longitudinal foram comparados. Pormenores sobre este estudo podem ser encontrados em Ferreira e Barros [2007]. Assim foram comparados os resultados das séries C16S200 $\phi 8$  e C16S200 $\phi 10$ , das séries C16S300 $\phi 8$  e C16S300 $\phi 10$ , das séries C32S200 $\phi 8$ , e C32S200 $\phi 10$  e das séries C32S300 $\phi 8$  e C32S300 $\phi 10$ . Nesta secção é apresentado e analisado, como exemplo representativo do comportamento das séries ensaiadas em termos de influência da percentagem de armadura longitudinal, os dois grupos de séries de ensaios C16S200 $\phi 8$  e C16S200 $\phi 10$ .

Na Figura 5.42 apresenta-se a relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e  $\rho_f$  para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  de 2, 3, 4 e max, referentes aos grupos de ensaios C16S200 $\phi 8$  e C16S200 $\phi 10$ , ou seja, comparam-se os resultados obtidos nas séries de provetes confinados com o mesmo tipo de manta CF120 S&P 240 de 200 g de fibra por m<sup>2</sup> de manta e o mesmo tipo de betão de 16 MPa de resistência à compressão.

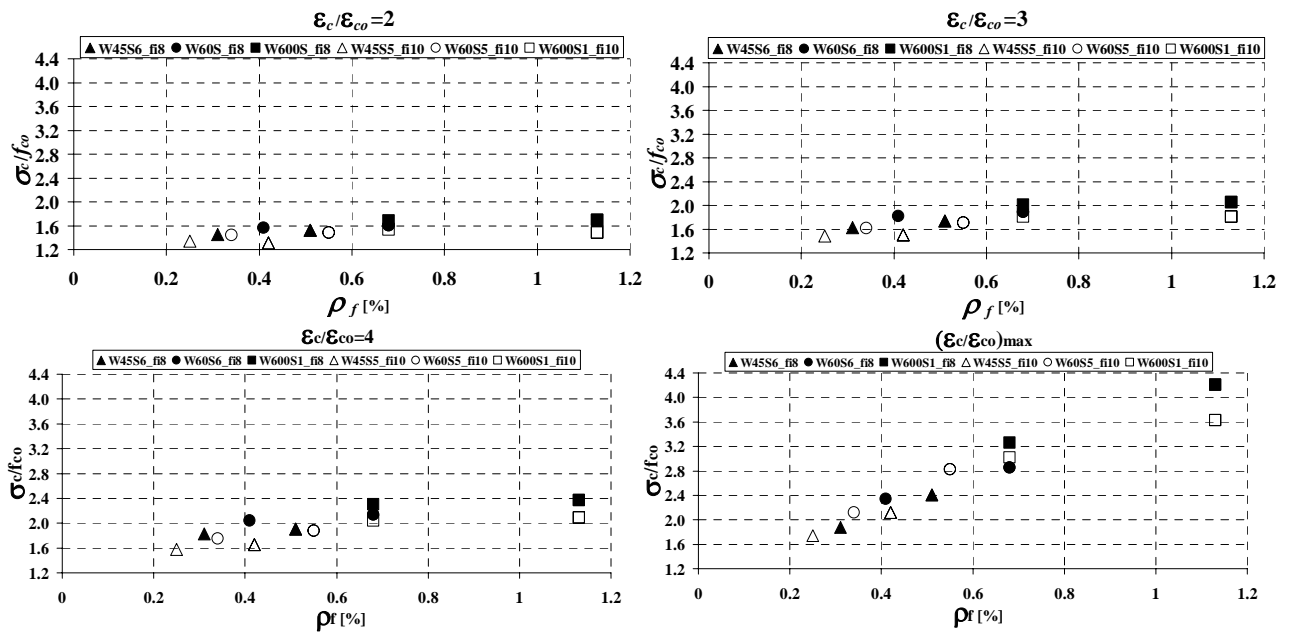


Figura 5.42 – Relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e  $\rho_f$  referente aos grupos de ensaios C16S200 $\phi$ 8 e C16S200 $\phi$ 10.

Da análise da Figura 5.42 verifica-se que:

- para todos os níveis de deformação, e para provetes com a mesma percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ), os provetes com varões longitudinais  $\phi$ 8 alcançaram maiores valores de  $\sigma_c/f_{co}$ . O confinamento foi mais efectivo nos provetes de armadura longitudinal de menor diâmetro. Este comportamento era o esperado, porque os provetes armados longitudinalmente com  $\phi$ 8 têm menor volume de betão não confinado, ou seja, tem maior percentagem de confinamento (ver Figura 3.3);
- para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}=2$ , a diferença registada para o parâmetro  $\sigma_c/f_{co}$ , entre as séries com  $\phi$ 8 e as séries armada com  $\phi$ 10 variou entre 10% e 25%. Com o aumento dos níveis de deformação esta diferença também aumentou.

Na Figura 5.43 apresenta-se a relação entre  $\Delta U/U_c$  e  $\rho_f$  para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  de 2, 3, 4 e max referentes às séries de ensaios dos grupos C16S200 $\phi$ 8 e C16S200 $\phi$ 10, ou seja, comparam-se os resultados obtidos nas séries de provetes confinados com manta CF120 S&P 240 de 200 g/m<sup>2</sup> e de betão de 16 MPa de resistência à compressão.

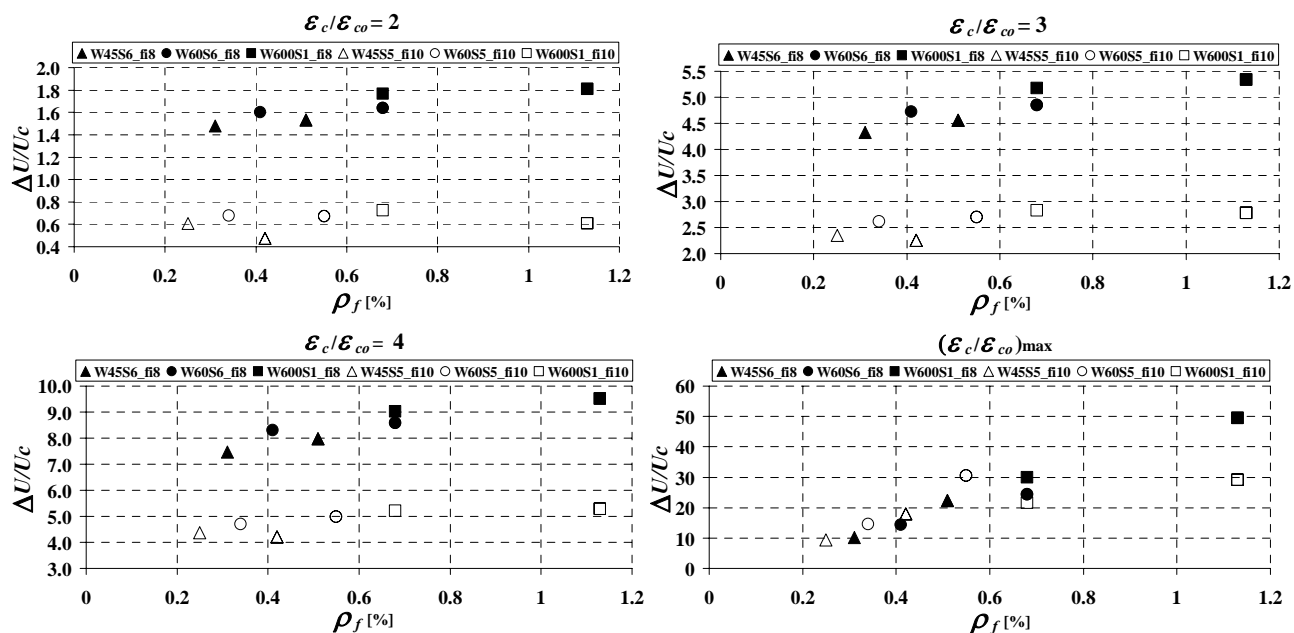


Figura 5.43 – Relação entre  $\Delta U/U_c$  referente aos grupos de ensaios C16S200 $\phi$ 8 e C16S200 $\phi$ 10.

Da análise da Figura 5.43 verifica-se que:

- nos provetes de menor diâmetro ( $\phi 8$ ), devido a encurvadura das armaduras,  $U_c$  é menor em comparação com  $U_c$  de provetes com varões de maior diâmetro ( $\phi 10$ ), pelo que  $\frac{\Delta U}{U_c}$  será, naturalmente, maior nos provetes reforçados com armaduras de menor diâmetro.



## **CAPÍTULO 6**

---

### **CONFINAMENTO DE ELEMENTOS DE PILAR DE BETÃO ARMADO SUBMETIDOS A COMPRESSÃO CÍCLICA**

#### **6.1 INTRODUÇÃO**

A preocupação com a vulnerabilidade sísmica dos edifícios é um tema que vem merecendo preocupação crescente, dada a natureza catastrófica que tem uma ocorrência sísmica de elevada amplitude, quer em termos de dimensão humana quer material, Priestley et . al. [1996], Seible et. al. [1997], Nanni et al. [1999].

Podendo, de forma simplificada, considerar-se a acção sísmica como de carácter cíclica, e sendo os pilares elementos fulcrais na garantia da estabilidade global de uma estrutura porticada de betão armado, será de todo oportuno explorarem-se os benefícios proporcionados por sistemas de reforço que aumentem a capacidade de absorção de energia deste tipo de elementos, quando submetidos a acções cíclicas, Saadatmanesh et. al. [1997], Rodrigues e Silva [2001], Ulusay et. al. [2002], Monti [2003], Ye, et. al. [2003], Tsuno e Park [2004], Lam et. al. [2006]. Sendo a acção cíclica horizontal a que merece especial cuidado, dado introduzirem esforços de flexão e corte, é, no entanto, também importante avaliar a eficácia de sistemas de reforço no comportamento de elementos de pilar submetidos a acções cíclicas de compressão. Neste caso, importa que os sistemas de reforço aumentem o confinamento do betão dos pilares e evitem a encurvadura das armaduras longitudinais.

No sentido de contribuir para o aumento do conhecimento no âmbito do confinamento com sistemas de CFRP de elementos de pilar submetidos a carregamentos cíclicos de compressão, foi efectuado um programa experimental, cujos resultados são apresentados e analisados no presente capítulo.

## 6.2 SÉRIES DE ENSAIOS E SISTEMAS DE CONFINAMENTO

Este capítulo tem por objectivo o estudo do comportamento de elementos de pilar de betão armado, de secção circular confinados parcial e totalmente com mantas de fibras de carbono, sujeitos a acções cíclicas.

Para avaliar a influência do carregamento cíclico de compressão no comportamento de provetes de betão armado confinados com sistemas discretos e contínuo em manta de CFRP, efectuou-se um programa experimental constituído por uma série de ensaios monotónicos e cíclicos com 14 provetes cilíndricos de 600 mm de altura e 200 mm de diâmetro (ver Tabela 6.1), em betão de 30 MPa de resistência à compressão aos 28 dias, armados com varões longitudinais  $\phi 8$  e confinados com manta tipo CF120 S&P 240 ( $200 \text{ g/m}^2$ ).

Tabela 6.1 – Características das séries de ensaios.

Designação do provete (WiLk_c/m)	Tipo de ensaio	W [mm]	L	Sistema de confinamento
W45L3_c	Cíclico	45	3	
W45L3_m	Monotónico			
W45L5_c	Cíclico		5	
W45L5_m	Monotónico			
W60L3_c	Cíclico	60	3	
W60L3_m	Monotónico			
W60L5_c	Cíclico		5	
W60L5_m	Monotónico			
W600L3_c	Cíclico	600	3	
W600L3_m	Monotónico			

A influência dos ciclos de carga/descarga na evolução da rigidez da resposta tensão-extensão e na capacidade de carga do provete entre ciclos consecutivos foi investigada. A cada provete foi atribuída a designação  $WiLk_c/m$ , em que  $Wi$  é a largura da faixa com  $i= 45, 60$  e  $600$  mm e  $Lk$  é o número de camadas por faixa com  $k$  igual a 3 e 5. Para

distinguir os ensaios cíclicos dos monotónicos foi atribuído aos ensaios cíclicos a letra *c* e aos ensaios monotónicos a letra *m*. Para cada série de ensaios (*WiLk*) ensaiaram-se dois provetes, um à compressão monotónica e outro à compressão cíclica. Também foram ensaiados provetes de controlo, dois de betão simples e dois de betão armado com varões longitudinais  $\phi 8$ . Os procedimentos relativos ao confinamento dos provetes estão apresentados, com pormenor, no capítulo 2.

### 6.3 PROCEDIMENTO DE ENSAIO E MONITORIZAÇÃO

Os ensaios cíclicos e monotónicos de compressão directa foram realizados numa prensa servo-controlada que permite efectuar ensaios em malha fechada até uma carga máxima de cerca de 2250 kN. A descrição do programa experimental e instrumentação utilizada foi apresentada no capítulo 3.

Os provetes sujeitos a carregamento cíclicos foram ensaiados sob controlo de força à velocidade de 15 kN/s e, para tal, optou-se por uma história de carga com três repetições e com incrementos consecutivos de amplitude de força de 250 kN entre séries de repetições (ver Figura 6.1). Os carregamentos cíclicos de igual amplitude, permitem avaliar a degradação da rigidez e da resistência, Gomes [1992]. O último procedimento de ensaio é constituído por uma rampa sob controlo de deslocamento até à rotura do provete.

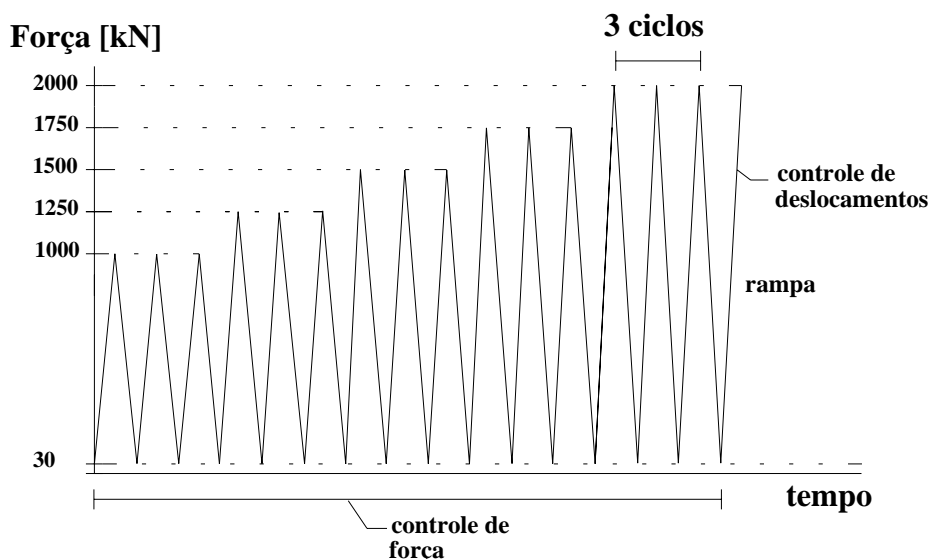


Figura 6.1 – História de carga utilizada nos ensaios.

Os provetes sujeitos a carregamento monotónico foram ensaiados sob controlo de deslocamentos, à velocidade de 5  $\mu\text{m/s}$ , utilizando-se para tal o deslocamento lido num LVDT de 20 mm de campo e 0.05% de linearidade. O ensaio terminava quando o limite máximo do cursor do LVDT de controlo era atingido (ver capítulo 3).

Os ensaios foram efectuados tendo os provetes cerca de 40 dias de idade.

## **6.4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

### **6.4.1 Modos de rotura**

Na Figura 6.2 representam-se os modos de rotura observados nos provetes ensaiados no âmbito deste grupo de ensaios.

Após a rotura do provete verificou-se que uma camada de betão ficou fixa às faixas de CFRP, indicando que as condições de ligação entre estes dois materiais ficaram bem asseguradas. Tal como nas séries de provetes ensaiados e apresentados nos capítulos 4 e 5, a rotura destes provetes deu-se de forma violenta, por rotura da manta de CFRP a qual era precedida por sons originados pelo rompimento das fibras. A rotura era tão mais violenta quanto menor era o volume de betão não confinado entre faixas de CFRP, dado que a deformação plástica do betão destas zonas contribuiu para diminuir a violência da rotura típica de materiais de elevado módulo, elevada rigidez e comportamento linear-elástico, como é o caso das mantas utilizadas no presente trabalho.

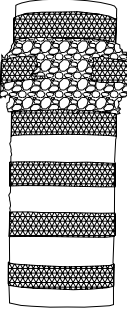
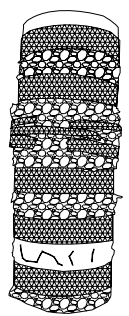
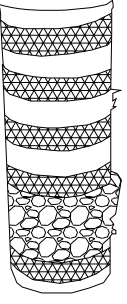
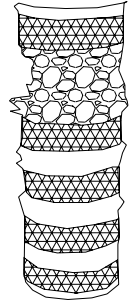
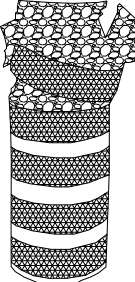
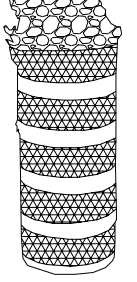
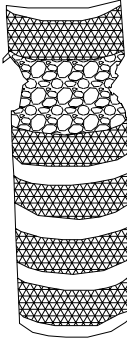
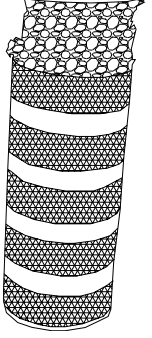
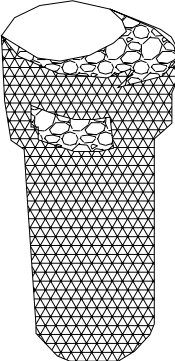
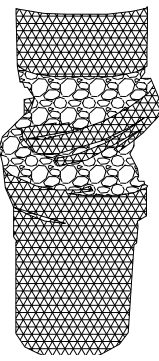
	Ensaio monotónico	Ensaio cíclico	Observações
<b>Provetes confinados com faixas de CFRP de 45 mm de largura</b>			
3 camadas			Rotura da 2ª e 3ª faixa superior de CFRP, nos provetes ensaiados à compressão monotónica e à compressão cíclica, respectivamente. Betão entre cintas muito danificado.
5 camadas			Nos ensaios monotónicos houve a rotura da 2ª faixa inferior de CFRP e nos ensaios cíclicos a rotura ocorreu na 2ª faixa superior. Betão bastante danificado entre faixas.
<b>Provetes confinados com faixas de CFRP de 60 mm largura</b>			
3 camadas			Em ambos os ensaios houve rotura das faixas superiores de CFRP. Betão bastante danificado entre faixas.
5 camadas			Ambos os provetes tiveram uma rotura similar à registada nos provetes confinados com 3 camadas de manta de CFRP.
<b>Provetes totalmente confinados com CFRP</b>			
3 camadas			Em todos os provetes totalmente confinados houve rotura da manta na metade superior do provete. Rotura muito violenta do provete. Ocorreu rotura precoce no provete ensaiado monotónicamente.

Figura 6.2 – Modos de rotura dos provetes.

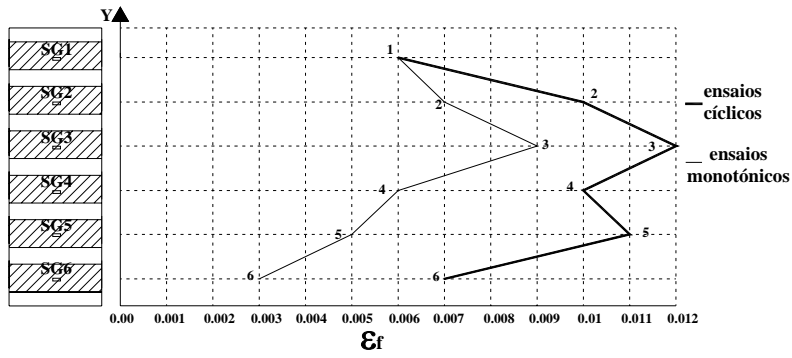
#### 6.4.2 Extensões ao longo do provete

Na Figura 6.3 apresentam-se as extensões registadas nos extensómetros aplicados nos provetes para um nível de carga próximo da rotura. No ensaio cíclico do provete W45L3 a extensão máxima registada ocorreu no extensómetro 3, cerca de 12‰, localizado na faixa que rompeu, como se pode observar na Figura 6.2. No ensaio monotónico a extensão máxima também foi registada na 3ª faixa, da ordem dos 9‰, embora a rotura tenha ocorrido na segunda faixa superior, onde a extensão máxima registada foi da ordem dos 7‰. No provete igualmente confinado com faixas de 45 mm, mas com 5 camadas, as extensões máximas registadas, nos ensaios cíclicos e nos ensaios monotónicos foram iguais e da ordem dos 9‰, correspondendo aos extensómetros localizadas nas faixas que atingiram a rotura.

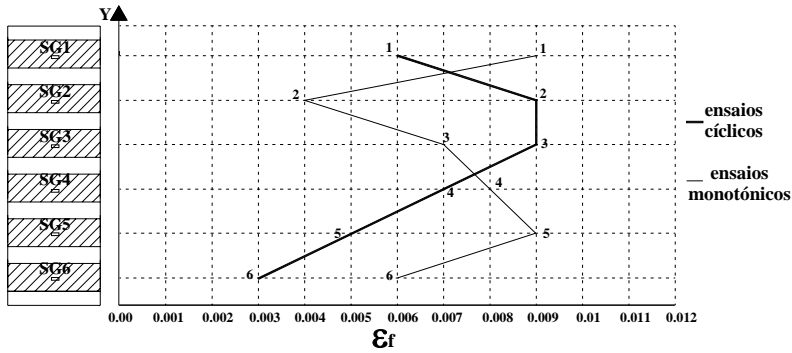
Nos provetes confinados com faixas de 60 mm de largura e 3 camadas de CFRP, a extensão registada foi máxima na faixa que rompeu, da ordem dos 11‰. Nos ensaios cíclicos as extensões registadas foram inferiores, tendo sido a extensão máxima registada da ordem dos 7‰ e localizada na 2ª faixa inferior. A rotura do provete ocorreu no terço superior. No ensaio cíclico do provete W60L5 a extensão registada foi máxima na faixa superior, da ordem dos 10‰, e mínima na zona central, cerca de 3‰, enquanto no ensaio monotónico a extensão máxima ocorreu na zona inferior do provete, próximo de 10‰, e a mínima foi de 4‰ na parte superior.

Por sua vez, nos provetes W600L3, principalmente no provete com carregamento cíclico, as extensões foram máximas nas extremidades do provete. A extensão máxima registada foi da ordem dos 10‰. No provete W600L3 submetido a carregamento monotónico os extensómetros das faixas das extremidades danificaram-se durante o ensaio, pelo que não se dispõe de registos para estas faixas.

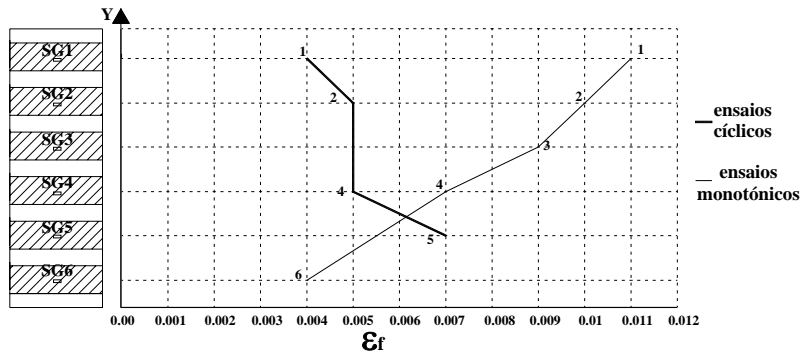
Apesar de se ter registado uma tendência para a ocorrência da rotura no terço superior dos provetes, a impossibilidade de localizar previamente os locais de rotura não possibilita afirmar que as extensões registadas nos extensómetros sejam as máximas instaladas no CFRP. Assim, os valores registados nos extensómetros representam apenas as extensões instaladas nesses locais, pelo que as conclusões retiradas com base nestes valores têm de ser enquadradas neste tipo de limitação do sistema de monitorização utilizado para este efeito.



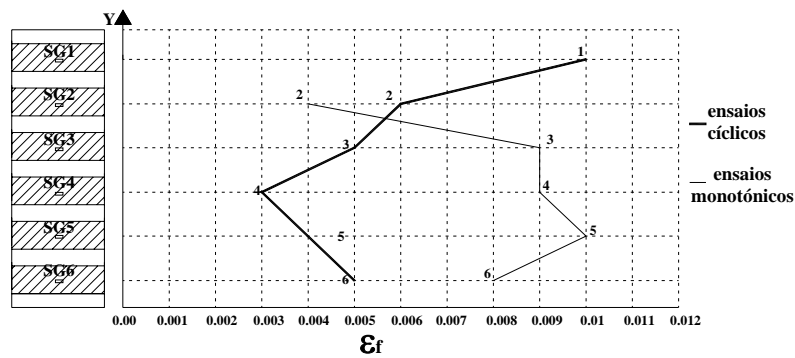
W45L3



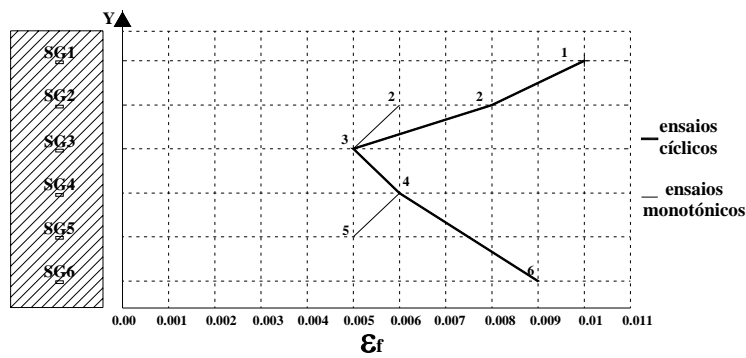
W45L5



W60L3



W60L5



W600L3

Figura 6.3 – Extensões últimas no CFRP dos provetes.

### 6.4.3 Síntese dos resultados mais relevantes

Os principais indicadores de eficácia registados nos ensaios cíclicos e monotónicos à compressão directa estão indicados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Valores dos indicadores de eficácia registados nos ensaios efectuados.

Designação do provete	$\rho_f$ [%]	$f_{cc}$ (MPa)	$\frac{f_{cc}}{f_{co,\phi 8}}$	$\varepsilon_{cc}$	$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co,\phi 8}}$	$\varepsilon_{fmax}$					
						SG1	SG2	SG3	SG4	SG5	SG6
Betão simples_c	-	29.10	-	0.003	-	-	-	-	-	-	-
Betão simples_m		30.36	-	0.003	-	-	-	-	-	-	-
Betão armado_φ8_c	-	27.50	-	0.002	-	-	-	-	-	-	-
Betão armado_φ8_m		27.38	-	0.004	-	-	-	-	-	-	-
W45L3_c	0.31	44.40	1.61	0.018	9.0	0.006	0.010	0.012	0.010	0.011	0.007
W45L3_m		40.97	1.50	0.015	3.8	0.006	0.007	0.009	0.006	0.005	0.003
W45L5_c	0.51	50.74	1.85	0.024	12.0	0.006	0.009	0.009	0.007	0.005	0.003
W45L5_m		54.14	1.98	0.025	6.3	0.009	0.004	0.007	0.008	0.009	0.006
W60L3_c	0.41	48.84	1.78	0.019	9.5	0.004	0.005	-	0.005	0.007	-
W60L3_m		51.83	1.89	0.019	4.8	0.011	0.010	0.009	0.007	-	0.004
W60L5_c	0.68	55.64	2.02	0.020	10.0	0.010	0.006	0.005	0.003		0.005
W60L5_m		66.27	2.42	0.028	7.0	-	0.004	0.009	0.009	0.01	0.008
W600L3_c	0.68	73.70	2.68	0.025	12.5	0.010	0.008	0.005	0.006	-	0.009
W600L3_m		58.01	2.12	0.014	3.5	-	0.006	0.005	0.006	0.005	-

Da análise dos valores apresentados na Tabela 6.2 verifica-se que:

- os sistemas de confinamento proporcionaram aumentos significativos de capacidade de carga ( $f_{cc}$ ). Tomando como base de referência os valores de  $f_{cc}$  registados nos provetes armados não confinados ( $f_{co,\phi 8}$ ), constata-se que  $f_{cc}/f_{co,\phi 8}$  variou de 1.5 para  $\rho_f = 0.31$  até 2.7 para  $\rho_f = 0.68$ , representando  $f_{cc}$  a tensão máxima nos provetes confinados. Constata-se ainda que, se for excluído o resultado obtido no ensaio cíclico em provete com confinamento contínuo ( $\rho_f = 0.68$ ), existe uma tendência de aumento linear de  $f_{cc}/f_{co,\phi 8}$  com  $\rho_f$ , tanto nos provetes submetidos a carregamento monotónico como cíclico. O maior aumento registado neste caso indicia que o confinamento contínuo é mais eficaz que o discreto quando os elementos de pilar de betão armado são submetidos a carregamentos cíclicos. A existência de volume de betão não

confinado entre as faixas de manta de CFRP permite que durante os sucessivos carregamentos cíclicos ocorra uma concentração de dano nestas zonas, o que não acontece nos sistemas de confinamento contínuo, o que justifica o menor desempenho dos sistemas de confinamento discreto quando comparado com o dos sistemas de confinamento contínuo, em provetes submetidos a carregamento cíclico;

- em termos do parâmetro do índice de ductilidade ( $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co,\phi 8}$ ) verifica-se que aumenta com a percentagem de confinamento, tendo-se registado valores de 7 a 10;
- de uma maneira geral, as extensões mais elevadas no CFRP foram registadas nos extensómetros colocados nas cintas superiores onde porquanto verificou a rotura do CFRP. Comportamento similar foi registado por Carrazedo [2002].

Na Figura 6.4 apresentam-se as curvas que relacionam a tensão, quer com a extensão axial do provete, quer com a extensão axial média na manta de CFRP, para os provetes ensaiados com carregamento cíclico (WiLk\_c) e com carregamentos monotónicos (WiLk\_m), confinados com faixas de 45, 60 e 600 mm de altura. A tensão é o cociente entre a força aplicada e a área da secção transversal do provete. A extensão axial é a média registada nos três LVDTs a dividir pela altura inicial do provete e a extensão axial média no CFRP é média das extensões registadas nos extensómetros aplicados ao longo da altura do provete, (ver Tabela 6.1).

- Da observação das curvas tensão versus extensão axial e extensão média no CFRP, das diferentes séries é possível concluir que, em geral, a curva monotónica pode considerar-se como sendo a envolvente da resposta cíclica. Contudo, esta concordância é um pouco menor nos modelos confinados com faixas de 45 mm de largura em comparação com os modelos confinados com faixas de 60 mm. Uma possível justificação para este comportamento pode estar no maior afastamento entre cintas que existe nos provetes confinados com faixas de 45 mm, o que provoca uma maior encurvadura dos varões de aço e, conseqüentemente, uma maior degradação do betão entre cintas. Justificação similar foi apontada por Rodrigues [2005]. Para o provete totalmente confinado esperava-se uma maior aproximação entre a curva monotónica e a envolvente do

ensaio cíclico, mas tal não se verificou. Uma possível justificação poderá estar relacionada com alguma irregularidade no fabrico do provete.

No terceiro dos três ciclos que constitui cada série de ciclos a capacidade de carga do provete supera a registada no seu homólogo submetido a carregamento monotónico. Tal deve estar relacionado com o facto de que, durante o carregamento cíclico, e devido à acumulação de deformação plástica do betão, o sistema de confinamento em CFRP sofre acréscimos de extensão entre ciclos subsequentes, resultando um aumento de confinamento do betão com o conseqüente aumento da capacidade de carga do provete.

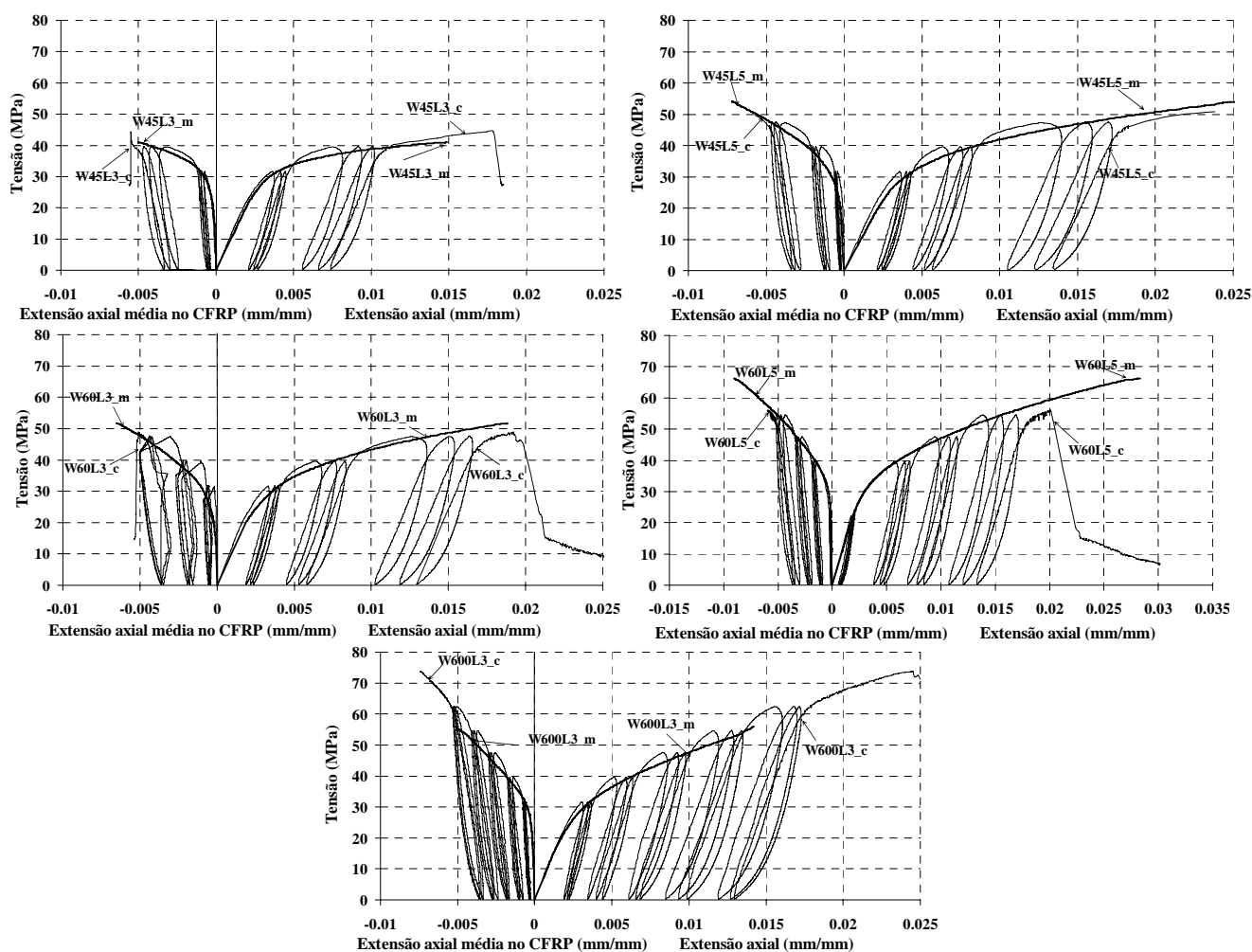


Figura 6.4 – Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP.

Da análise da configuração dos ciclos de descarga/recarga e da relação tensão-extensão axial constata-se que o ramo de descarga é eminentemente não linear, enquanto o ramo de recarga apresenta nas extremidades dois pequenos trechos não lineares ligados por um ramo linear. Para avaliar a evolução da rigidez das fases de descarga e de recarga, no presente trabalho admitiu-se que ambas as fases podem ser modeladas por tramos

rectilíneos, tal como esquematizado na Figura 6.5 ( $r$  para o ramo de recarga e  $d$  para o ramo de descarga).

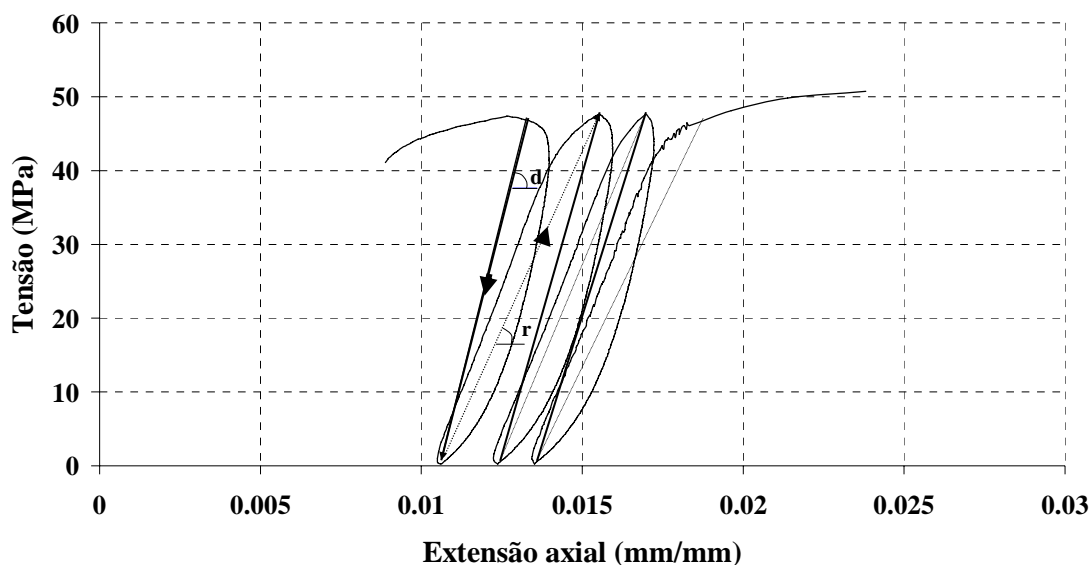
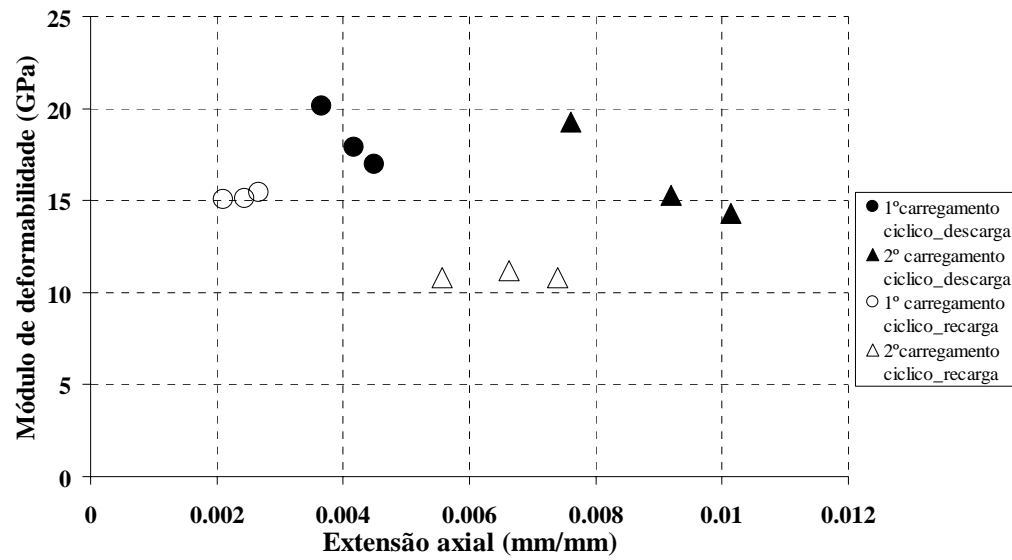


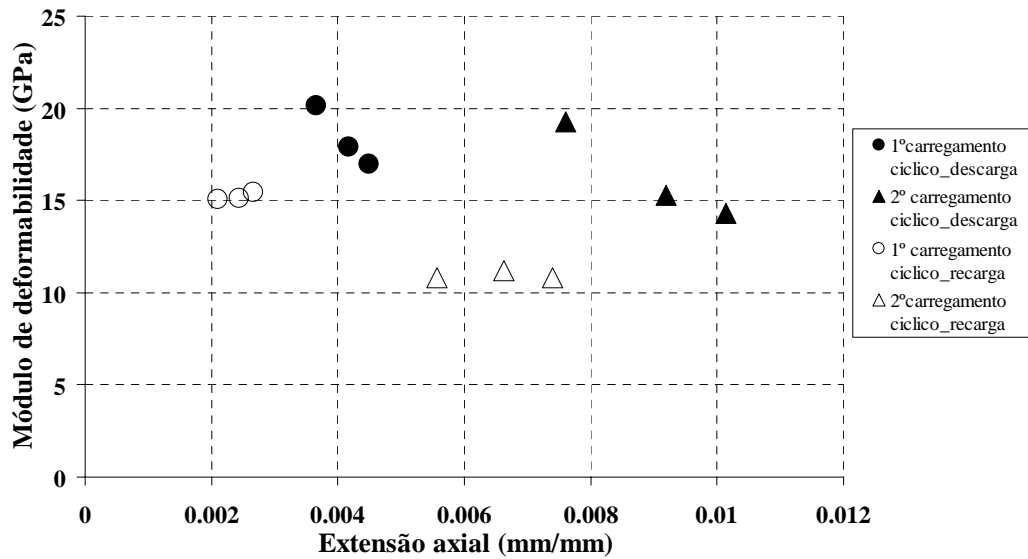
Figura 6.5 – Módulo de deformabilidade para cada 3 ciclos de recarga e descarga.

Na Figura 6.6 representa-se a evolução da rigidez das fases de descarga e de recarga nos provetes ensaiados.

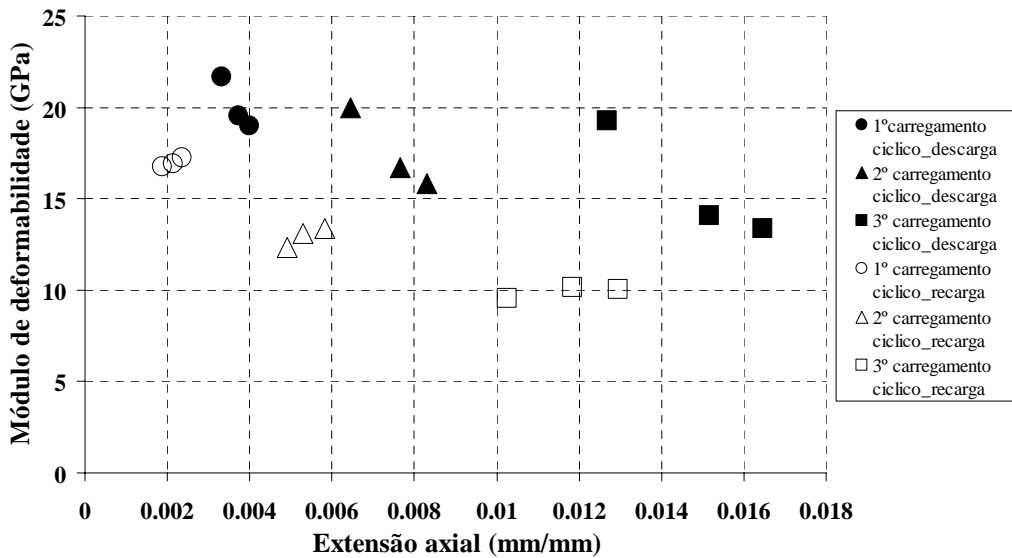
Da análise destes gráficos constata-se que a rigidez de descarga é maior do que em recarga. Entre cíclicos correspondentes à mesma amplitude de carga verifica-se que a rigidez de descarga diminui. Tal deve-se ao acréscimo de deformação plástica do betão com o acréscimo de extensão axial aplicado ao provete. A tendência para o decréscimo de rigidez de descarga diminui com o aumento da extensão axial do provete, podendo essa tendência ser aproximada por uma lei do tipo exponencial (ver Figura 6.6) referente ao provete W600L3. Quanto à evolução da rigidez dos ramos de recarga verifica-se também haver uma tendência para o seu decréscimo com o aumento da extensão axial do provete, não sendo, no entanto, tão acentuada como o verificado na rigidez dos ramos de descarga. Entre ciclos de mesma amplitude de carga verifica-se haver uma tendência para um aumento ligeiro da rigidez de recarga, justificável pelo acréscimo de tensão no CFRP entre estes ciclos, que tem como consequência aumentar o confinamento do betão.



a) W45L3



b) W45L5



c) W60L3

Figura 6.6 – Evolução da rigidez dos ramos de descarga e recarga registada nos ensaios cíclicos (cont).

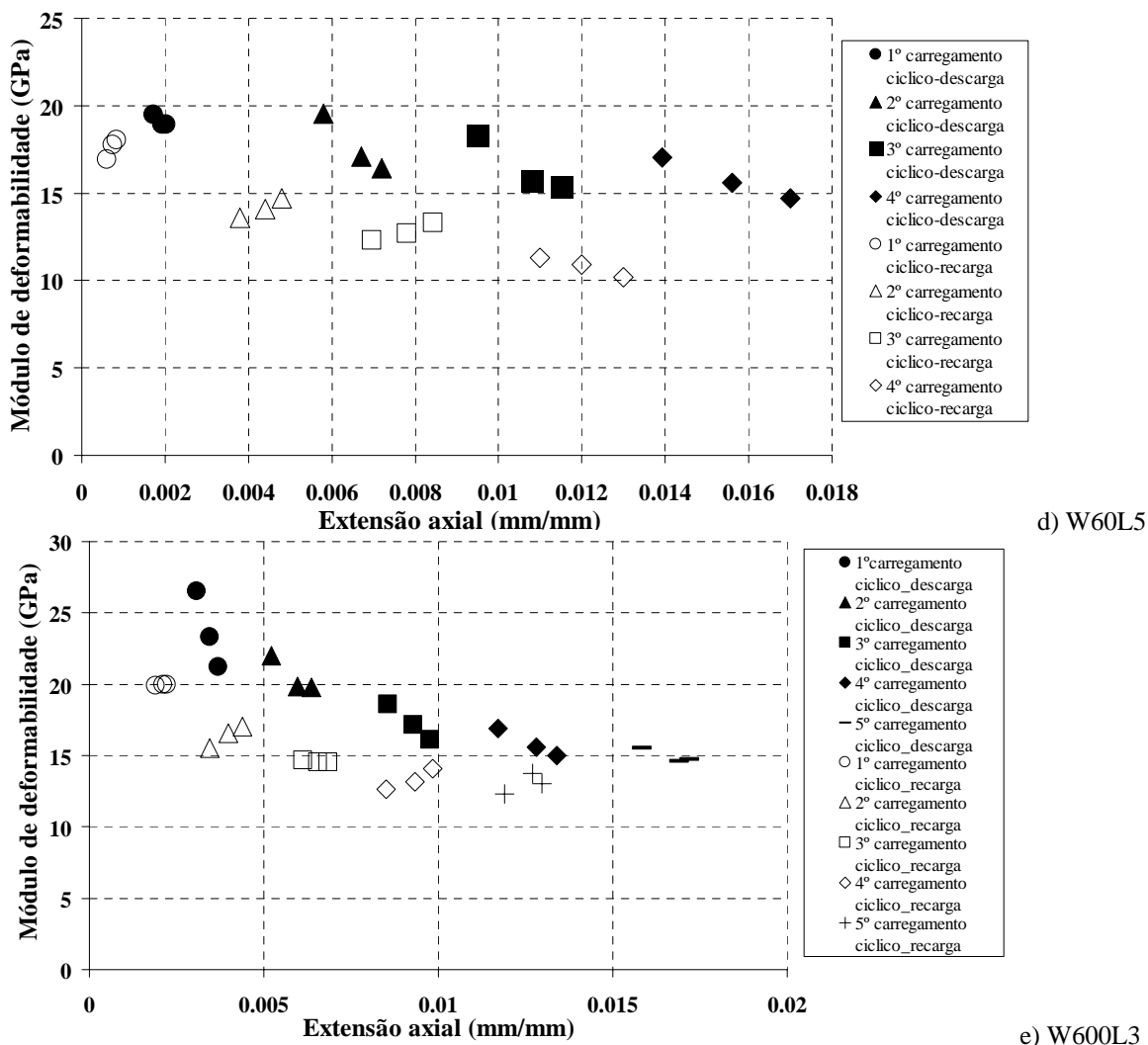


Figura 6.6 (cont.) – Evolução da rigidez dos ramos de descarga e recarga registada nos ensaios cíclicos.

Na Figura 6.7 representam-se as curvas que relacionam a tensão, quer com a extensão axial do provete, quer com a extensão média na manta de CFRP (na direcção das fibras), para a série parcialmente confinada W60L5 e para a série totalmente confinada W600L3, ambas as séries têm a mesma percentagem de confinamento, ver tabela 6.2.

Verifica-se que o sistema de confinamento contínuo permitiu maior capacidade de carga. No entanto, tal só é significativa para extensões axiais do provete superiores a cerca de 10%. Além disto deve ser tido em conta o maior custo de aplicação do sistema contínuo, pois requer o tratamento de toda a superfície do provete, enquanto que os sistemas discretos só exigem o tratamento das áreas onde são instaladas as faixas de CFRP. A rigidez dos ramos de descarga e recarga parece ser bastante similar em ambos os provetes. No que se refere à extensão máxima no CFRP ela foi maior no provete com sistema de confinamento discreto, apesar do provete com este sistema ter tido menor capacidade de carga. No entanto, dada a maior concentração de tensões nas faixas de

CFRP (efeito de arco interno) era expectável a ocorrência, pelo menos para um mesmo nível de tensão axial, maiores extensões nos sistemas discretos do que nos sistemas contínuos.

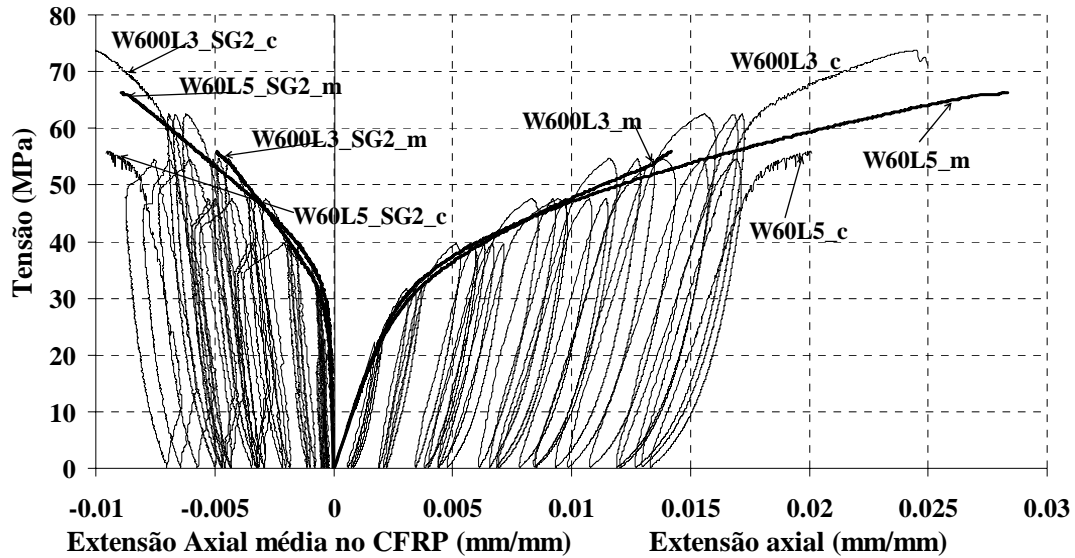


Figura 6.7 – Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries com mesma percentagem de confinamento: W60L5 e W600L3.

## **CAPÍTULO 7**

---

### **MODELO ANALÍTICO DE PILARES REFORÇADOS COM CFRP**

Neste capítulo é apresentado um modelo analítico desenvolvido para simular o comportamento à compressão monotónica de provetes de betão armado, de secção circular, reforçados parcial e totalmente com CFRP. Os parâmetros do modelo foram calibrados com base nos resultados experimentais obtidos nos ensaios do capítulo 5. Estes resultados foram utilizados para avaliar o desempenho do modelo desenvolvido.

#### **7.1 INTRODUÇÃO**

Durante os últimos anos foram publicados inúmeros trabalhos sobre modelos analíticos que permitem prever o comportamento do betão confinado, Spoelstra e Monti [1999], Triantafyllou e Antonopoulos [2000], Lorenzis [2001], Li et. al. [2003], Ramesh et. al. [2003]. Tradicionalmente, estes modelos eram desenvolvidos considerando a hipótese da pressão de confinamento ser constante. No entanto, esta hipótese não é válida quando se utilizam sistemas em que a tensão instalada aumenta de forma linear com o aumento da extensão, até à rotura desse sistema, tal como acontece no confinamento com materiais compósitos. Por outro lado, os modelos desenvolvidos para prever o comportamento do betão armado confinado com CFRP baseiam-se em modelos desenvolvidos para confinamento com sistemas constituídos por elementos de aço, Mirmiran e Shahawy [1997], Samaan et al. [1998] e Saafi et. al. [1999]. Neste âmbito, o modelo mais utilizado foi o desenvolvido por Mander et al. [1988].

No entanto, existe uma grande diferença entre o perfil de pressões laterais que se desenvolvem por confinamento com estribos de aço (ou tubos de aço) ou com CFRP, Karbhari e Gao [1997], Miyauchi et. al. [1999] Toutanji [1999] e Xiao e Wu [2000]. De facto, o aço, após atingir a tensão de cedência, proporciona uma pressão constante,

enquanto o compósito proporciona uma pressão crescente até à sua rotura. O betão confinado com aço pode absorver mais energia que o betão confinado com CFRP, (ver Figura 7.1). Segundo Samaan et al. [1998] e Mirmiran [2000], os modelos para o aço sobrestimam o aumento da capacidade de carga proporcionado por sistemas em CFRP.

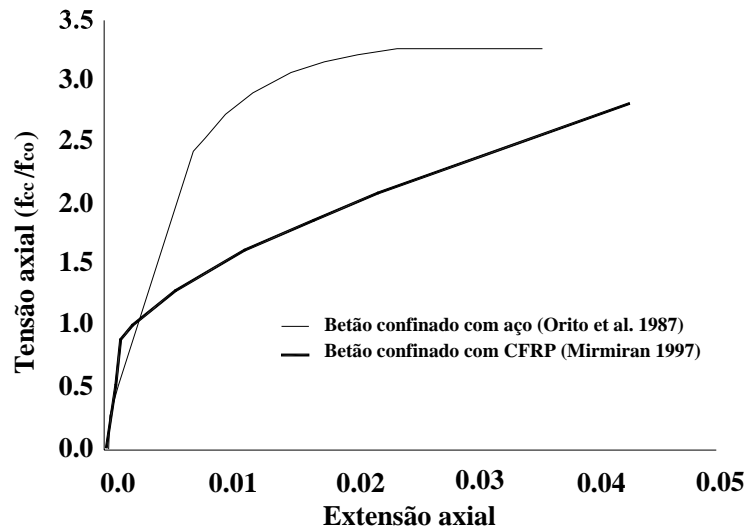


Figura 7.1 – Gráfico tensão versus extensão para o betão confinado com aço e com CFRP (Samaan et al. [1998]).

De modo a prever, com maior rigor, o comportamento dos provetes de betão armado confinados com mantas de CFRP, foram vários os investigadores que desenvolveram modelos analíticos, utilizando uma lei de comportamento tensão-extensão bi-linear, Samaan et al. [1998], Toutanji e Deng [2001], Lam e Teng [2003], Lin e Liao [2004], Rodrigues [2005] e Harajli et al. [2006] Harajli [2006]. Estes modelos foram desenvolvidos sobretudo para provetes totalmente confinados mas, no que se refere ao confinamento parcial, são poucos os modelos desenvolvidos, Saadatmanesh et. al. [1994], Saadatmanesh et. al. [1997], Parvin e Wang [2002], Harajli et al. [2006]. Assim, o presente trabalho pretende dar um contributo para o aumento do conhecimento nesta área.

## 7.2 MODELO PROPOSTO

Para simular o comportamento de provetes de betão armado de secção circular reforçados total ou parcialmente com CFRP e sujeitos a compressão axial monotónica é proposto um modelo analítico, em que a relação tensão-extensão está representada na Figura 7.2. O modelo analítico desenvolvido é baseado em conceitos propostos por Lam e Teng [2003] e Harajli et al. [2006].

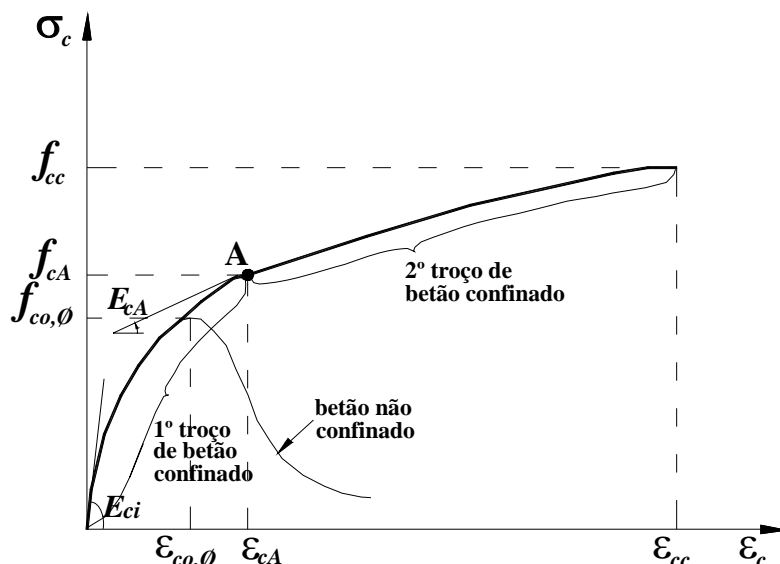


Figura 7.2 – Modelo para a relação tensão - extensão proposto para o betão confinado com CFRP.

O ponto A, definido por uma extensão  $\epsilon_{cA}$  e por uma tensão  $f_{cA}$ , separa dois troços da curva tensão-extensão, em que no primeiro troço a influência do confinamento é marginal ao contrário do que ocorre no segundo troço em que se verifica uma influência significativa da pressão lateral de confinamento exercida pelos diferentes arranjos de CFRP.

Se a expansão volumétrica do betão ocorrer antes da tensão de compressão máxima do betão não confinado, o ponto A é obtido para a extensão mínima no CFRP,  $\epsilon_f$ . As curvas tensão versus extensão,  $\sigma_c - \epsilon_c$  apresentadas no capítulo 5 mostram que para os provetes de baixa resistência à compressão, os valores de  $\epsilon_{cA}$  e  $f_{cA}$  podem ser considerados iguais a  $\epsilon_{co, \phi}$  e  $f_{co, \phi}$ , respectivamente, desde que a expansibilidade do betão antes de se atingir a tensão de pico do betão seja marginal, ou seja, não seja activado o sistema de confinamento de CFRP. Baseado nas extensões axiais medidas no CFRP correspondentes a  $\epsilon_{co, \phi}$ , o valor de  $3.0 \times 10^{-5}$  é assumido para  $\epsilon_f$  definindo-se, assim,  $\epsilon_{cA}$  e  $f_{cA}$ . Para obter as curvas  $\sigma_c - \epsilon_c$  que definem o segundo troço, são utilizadas as equações seguintes (Harajli *et al.* 2006):

$$\sigma_c = f_{co, \phi} + k_1 f_1 \quad \text{para } \epsilon_c \geq \epsilon_{cA} \quad (7.1)$$

$$\epsilon_c = \epsilon_{co, \phi} \left[ 1 + k_2 \left( \frac{\sigma_c}{f_{co, \phi}} - 1 \right) \right] \quad \text{para } \epsilon_c \geq \epsilon_{cA} \quad (7.2)$$

em que

$$f_l = f_{fl} + f_{sl} \frac{A_{cc}}{A_g} \quad (7.3)$$

é a pressão lateral efectiva de confinamento, e  $k_1$  e  $k_2$  são dois parâmetros obtidos dos resultados experimentais referentes as séries de ensaio em provetes de betão armado confinados com CFRP e apresentados no capítulo 5. Na eq. (7.3)  $f_{fl}$  e  $f_{sl}$  representam a pressão lateral de confinamento exercida pelo CFRP e pela armadura de aço, respectivamente, e podem ser determinadas pelas seguintes equações:

$$f_{fl} = \frac{\alpha_{fe} \alpha_{fv} \rho_f E_f}{2} \varepsilon_f \quad (7.4)$$

$$f_{sl} = \frac{\alpha_{se} \alpha_{sv} \rho_{st}}{2} f_{syt} \quad (7.5)$$

onde  $\rho_f$  é a percentagem volumétrica de confinamento de CFRP,  $E_f$  é o modulo de elasticidade do CFRP,  $\rho_{st}$  é a percentagem de confinamento do estribos de aço (Mander *et al.* 1988),  $\alpha_{fe}$  e  $\alpha_{se}$  são coeficientes relacionados com geometria do provete, e  $\alpha_{fv}$  e  $\alpha_{sv}$  são coeficientes que atendem à configuração do confinamento. Para provetes de secção circular,  $\alpha_{fe} = \alpha_{ve} = 1.0$ , e para provetes totalmente confinados com CFRP  $\alpha_{fv} = 1.0$ . Para provetes confinados parcialmente com faixas de CFRP o valor de  $\alpha_{fv}$  é obtido através da equação seguinte (Mander *et al.* 1988):

$$\alpha_{fv} = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2D}\right)^2}{1 - \frac{A_{sl}}{A_g}} \quad (7.6)$$

e para o confinamento de provetes com estribos de aço o valor de  $\alpha_{sv}$  é obtido através da Eq. (7.7).

$$\alpha_{sv} = \frac{\left(1 - \frac{s_s}{2d_{st}}\right)^2}{1 - \frac{A_{sl}}{A_g}} \quad (7.7)$$

Na Eq. (7.6)  $s'$  é o espaçamento livre entre faixas de CFRP (para provetes totalmente confinados  $s'=0$ ), e  $D$  é o diâmetro do provete de betão armado, enquanto  $s_s$  e  $d_{st}$  da Eq. (7.7) são, respectivamente, o espaçamento livre entre cintas de aço (96 mm e 120 mm, para provetes confinados com estribos de  $\phi 8$  e  $\phi 10$ , respectivamente) e o diâmetro do núcleo de betão confinado com estribos (160 mm) (ver Figura 3.3). Nestas duas equações,  $A_{sl}$  é área da secção transversal do reforço longitudinal e  $A_g$  é a área da secção transversal do provete de betão.

A expressão de  $k_l$  utilizado na Eq. 7.1 foi obtida através dos resultados experimentais entre  $k_l=(\sigma_c-f_{co,\phi})/f_l$  e  $f_l/f_{co,\phi}$ . Estes valores foram distintos consoante a classe resistente do betão. Os resultados estão apresentados na Figura 7.3.

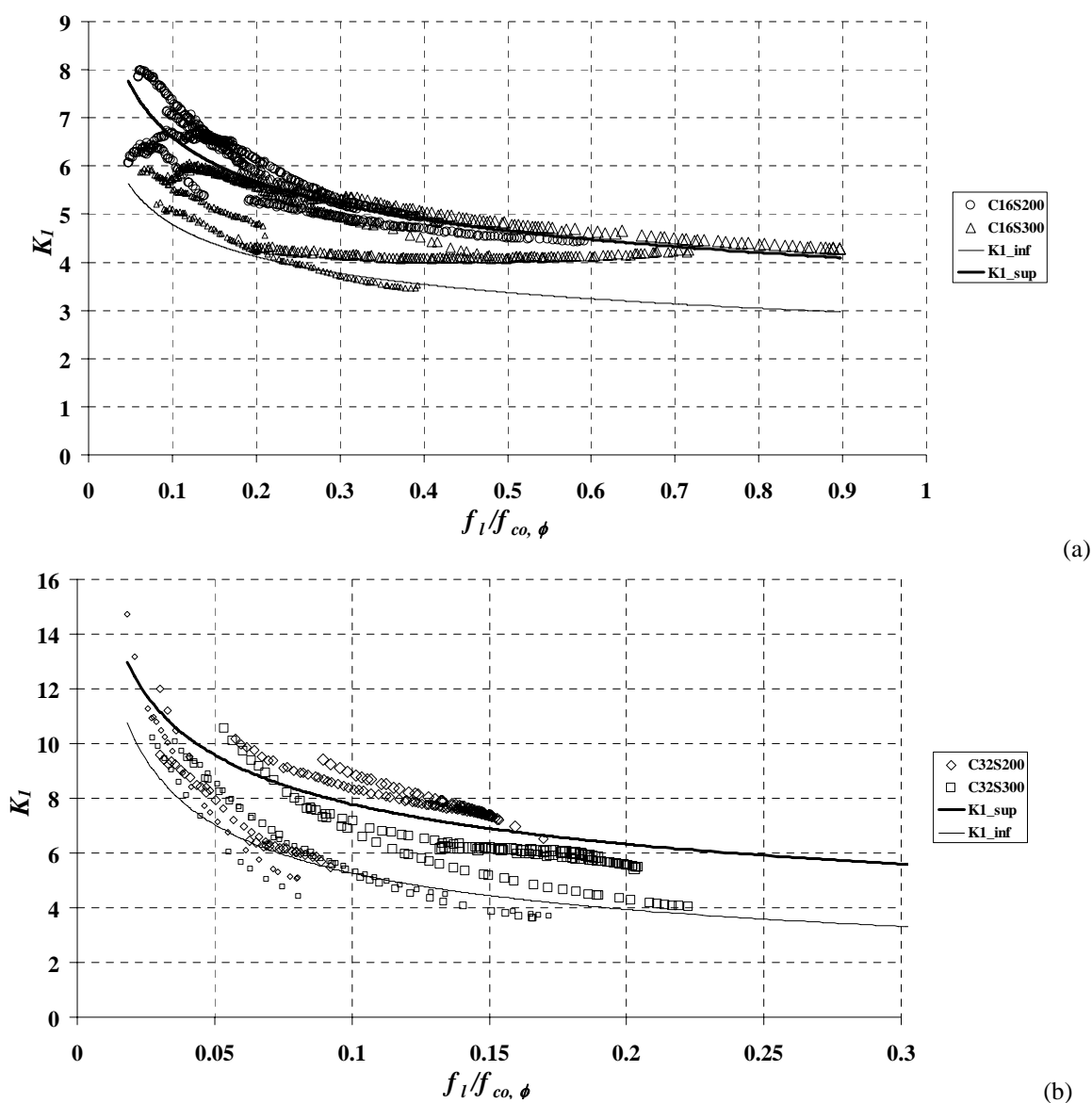


Figura 7.3 – Variação do parâmetro de confinamento  $k_l$  com a pressão lateral de confinamento para: (a) C16, (b) C32

O tamanho dos símbolos utilizados nos gráficos para distinguir as quatro séries é proporcional ao valor de  $\rho_f$ . Os resultados apresentados nesta figura mostram que para,  $f_l/f_{co, \phi}$  até 0.15, existe uma tendência para  $k_l$  crescer com o aumento da tensão de compressão do betão, e, em geral, para cada classe resistente de betão, os valores mais elevados de  $k_l$  correspondem a maior percentagem de confinamento  $\rho_f$ . Para a capacidade resistente adoptada neste trabalho (C16 e C32), os valores de  $k_l$  são obtidos a partir da seguinte expressão:

$$k_l = a \left( \frac{f_l}{f_{co, \phi}} \right)^{-b}$$

$$a = 2.9 + 72.848(\rho_f - 0.0025); b = 0.2177 \text{ para C16 e } \rho_f \in [0.0025; 0.0176] \quad (7.8)$$

$$a = 2.0 + 125.828(\rho_f - 0.0025); b = 0.42 - 7.947(\rho_f - 0.0025) \text{ para C32 e}$$

$$\rho_f \in [0.0025; 0.0176]$$

Para provetes com capacidade resistente,  $f_{co, \phi}$ , entre 16 MPa (C16) e 32 MPa (C32) os valores de  $k_l$  podem ser obtidos por interpolação linear, usando para tal os valores de  $k_l$  obtidos da equação (7.8).

Os valores de  $k_2$  da Eq. (7.2) foram obtidos com base nos resultados experimentais resultantes da relação entre  $k_2 = (\varepsilon_c / \varepsilon_{co, \phi} - 1) / (\sigma_c / f_{co, \phi} - 1)$  e  $\varepsilon_f$  que se encontra na figura 7.4. Estes valores foram distintos consoante a classe de resistência do betão dos provetes ensaiados.

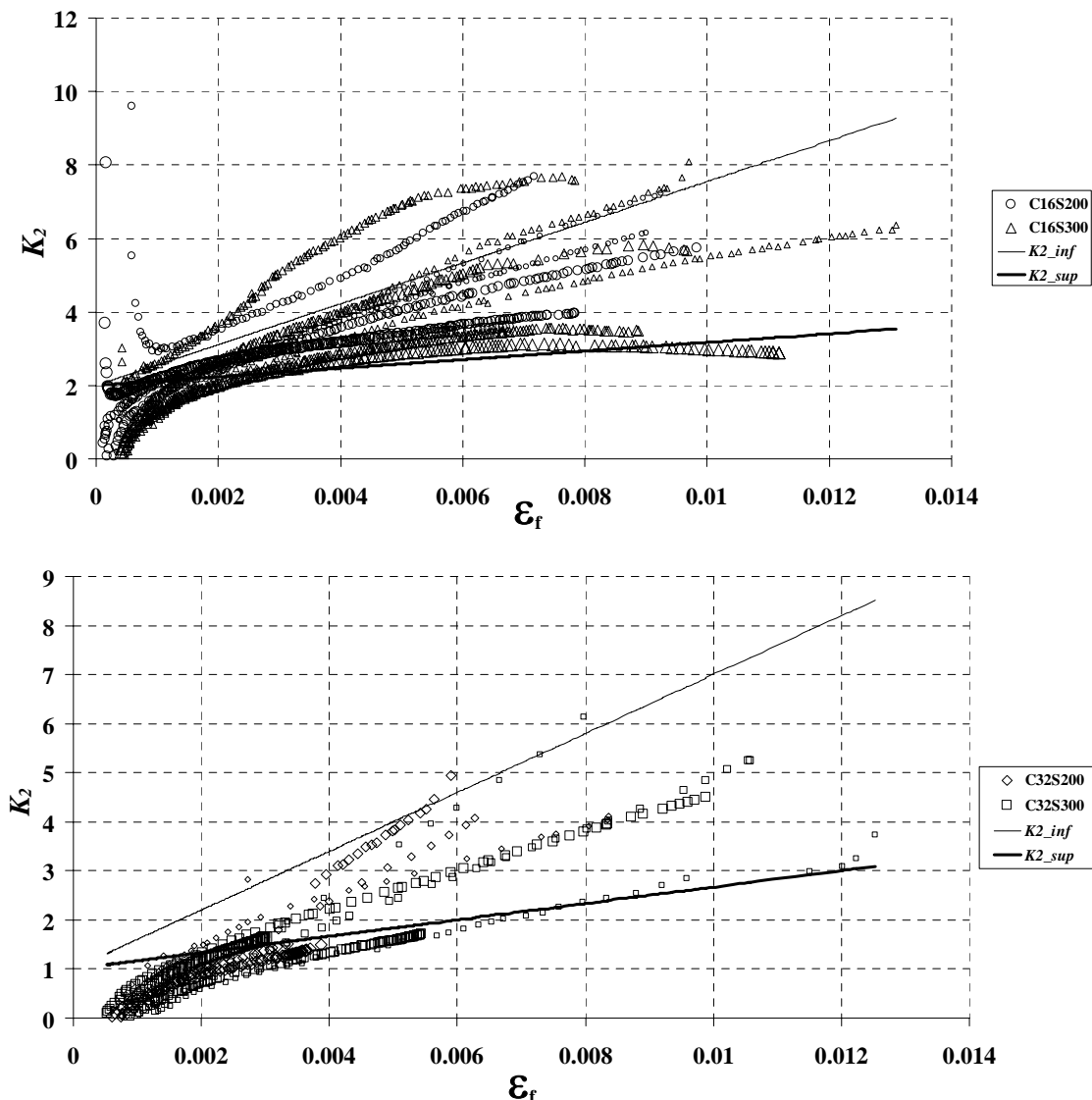


Figura 7.4 – Variação do parâmetro de confinamento  $k_2$  com a extensão axial.

Os resultados desta figura mostram que  $k_2$  tem 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  $\epsilon_f$  tende a ser tão mais elevada quanto menor for a percentagem de confinamento  $\rho_f$ . De facto, a deformabilidade axial máxima do betão aumenta com a diminuição da capacidade resistente do betão, dado que a fragilidade pós-pico do betão decresce com a diminuição da capacidade resistente do betão, o que justifica a tendência verificada entre  $k_2$  e  $\epsilon_f$ . Além disso, a deformação transversal do betão tende a aumentar com a diminuição do  $\rho_f$ , resultando numa maior deformação axial do betão. Baseado nos resultados obtidos, as equações seguintes foram determinadas para um betão com classe resistente de 16 MPa (C16) e outro de 32 MPa (C32), respectivamente:

$$k_2 = \left[ 555 - 29006(\rho_f - 0.0025) \right] \varepsilon_f + 2.0 \text{ para C16 e } \rho_f \in [0.0025; 0.0176] \quad (7.9)$$

$$k_2 = \left[ 600 - 28695(\rho_f - 0.0025) \right] \varepsilon_f + 1.0 \text{ para C32 e } \rho_f \in [0.0025; 0.0176] \quad (7.10)$$

Para provetes com capacidade resistente,  $f_{co, \phi}$  entre 16 MPa (C16) e 32 MPa (C32) os valores de  $k_2$  podem ser obtidos por interpolação linear, usando para tal os valores de  $k_2$  obtidos das equações (7.9) e (7.10).

Para simular o primeiro troço da curva  $\sigma_c - \varepsilon_c$ , podem ser utilizadas as expressões propostas por Mander *et al.* (1998) ou as equações recomendadas pelo CEB-FIP Model Code (1990). No presente trabalho, contudo, foi utilizada uma equação de terceiro grau de modo a ajustar o primeiro troço com maior exactidão.

$$\begin{aligned} \sigma_c &= B \varepsilon_c^3 + C \varepsilon_c^2 + E_{ci} \varepsilon_c \text{ para } \varepsilon_c < \varepsilon_{cA} \\ B &= -\frac{2}{\varepsilon_{cA}^3} D \\ C &= \frac{E_{cA}}{2 \varepsilon_{cA}} - \frac{E_{ci}}{2 \varepsilon_{cA}} + \frac{3}{\varepsilon_{cA}^2} D \\ D &= f_{cA} - 0.5 \varepsilon_{cA} (E_{ci} + E_{cA}) \end{aligned} \quad (7.11)$$

onde  $E_{cA}$  é a tangente ao segundo troço das curva  $\sigma_c - \varepsilon_c$  no ponto A (ver Figura 7.2):

$$E_{cA} = \left. \frac{d\sigma_c}{d\varepsilon_c} \right|_{\varepsilon_c = \varepsilon_{cA}} = \frac{f_{cA}}{k_{2R} \varepsilon_{cA}} \quad (13)$$

e  $k_{2R}$  é o valor de  $k_2$  obtido para  $\varepsilon_f = 0.3\%$  por forma assumir a continuidade, tanto quanto possível, entre as tangentes do primeiro e do segundo troço da curva  $\sigma_c - \varepsilon_c$ , no ponto A. Adoptando para  $\varepsilon_{co, \phi}$ ,  $f_{co, \phi}$  e para  $E_{ci}$  os valores obtidos das curvas tensão-extensão dos provetes não confinados, os resultados experimentais (traço fino) e os obtidos analiticamente (traço grosso) para a relação tensão-extensão ( $\sigma_c - \varepsilon_c$ ) são apresentados na Figura 7.5 à Figura 7.12.

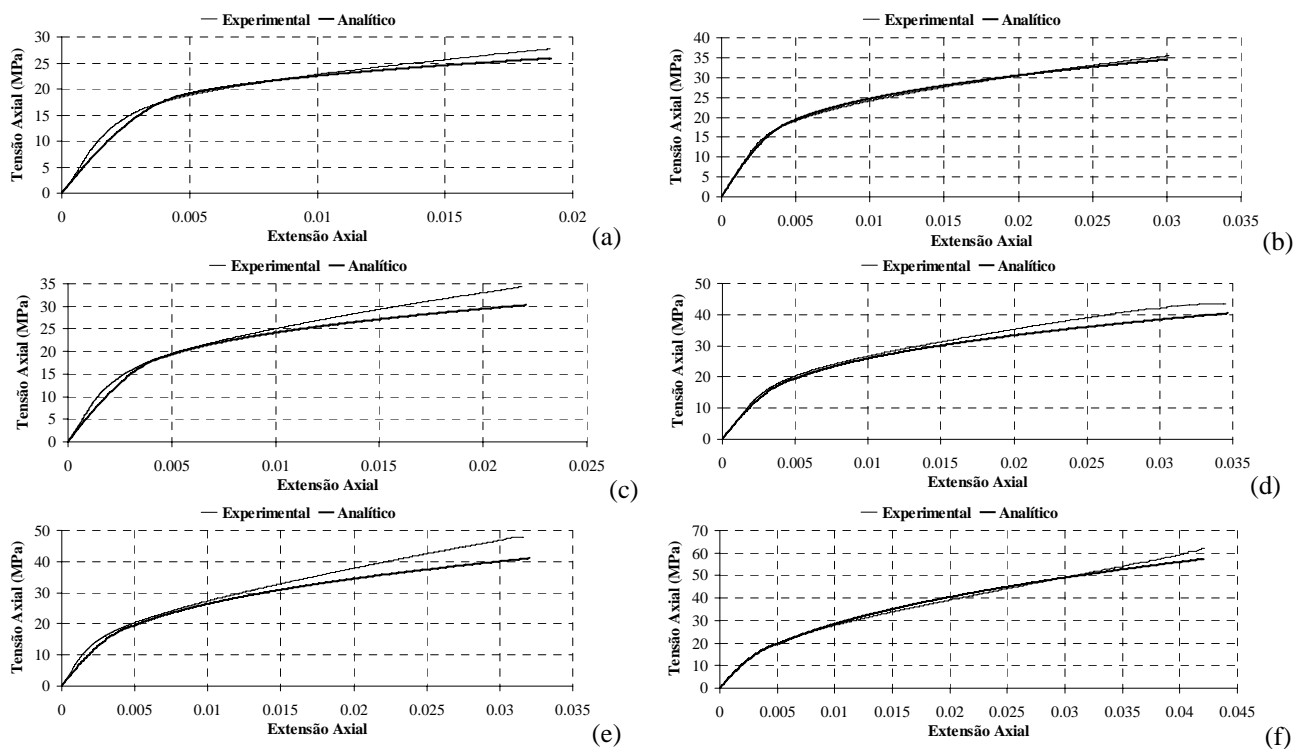


Figura 7.5 – Comparação entre os resultados experimentais e o modelo analítico para os provetes C16S200φ8: (a) W45L3, (b) W45L5, (c) W60L3, (d) W60L5, (e) W600L3, (f) W600L5.

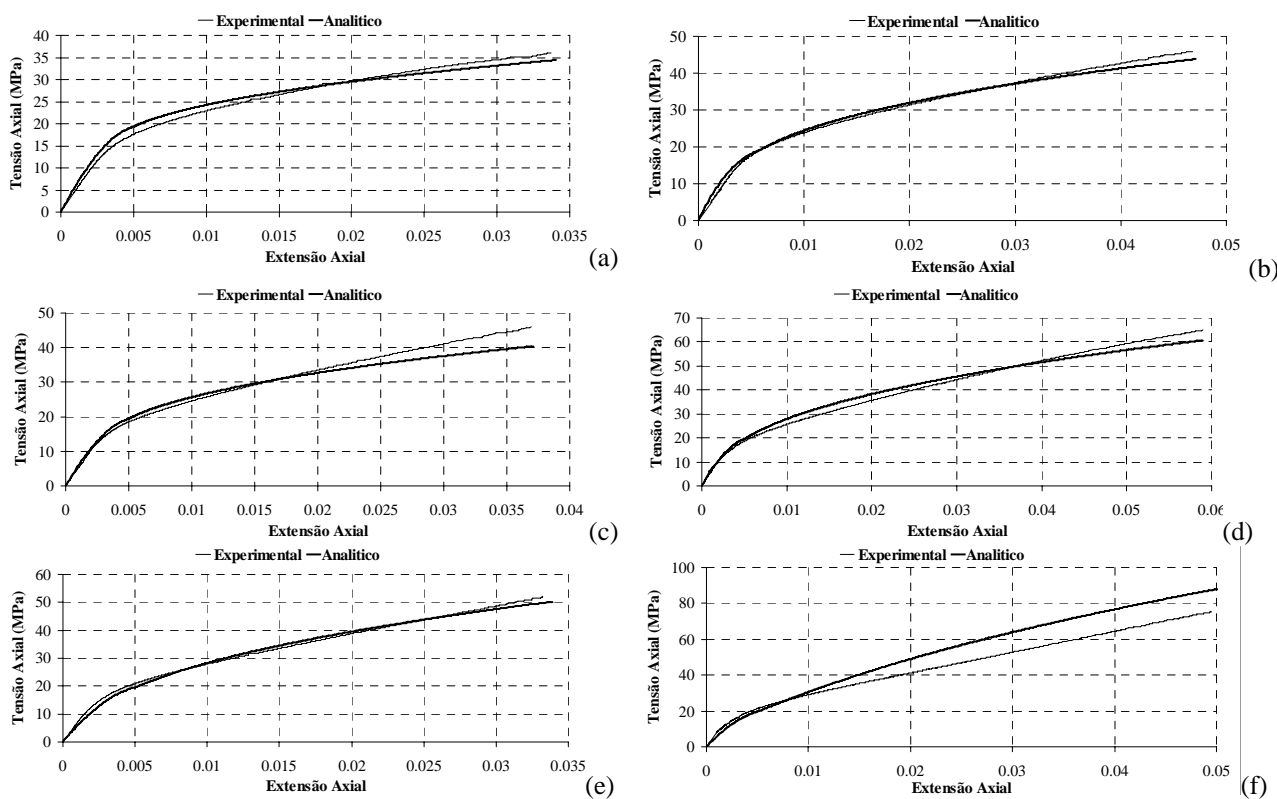


Figura 7.6 – Comparação entre os resultados experimentais e o modelo analítico para os provetes C16S300φ8: (a) W45L3, (b) W45L5, (c) W60L3, (d) W60L5, (e) W600L3, (f) W600L5.

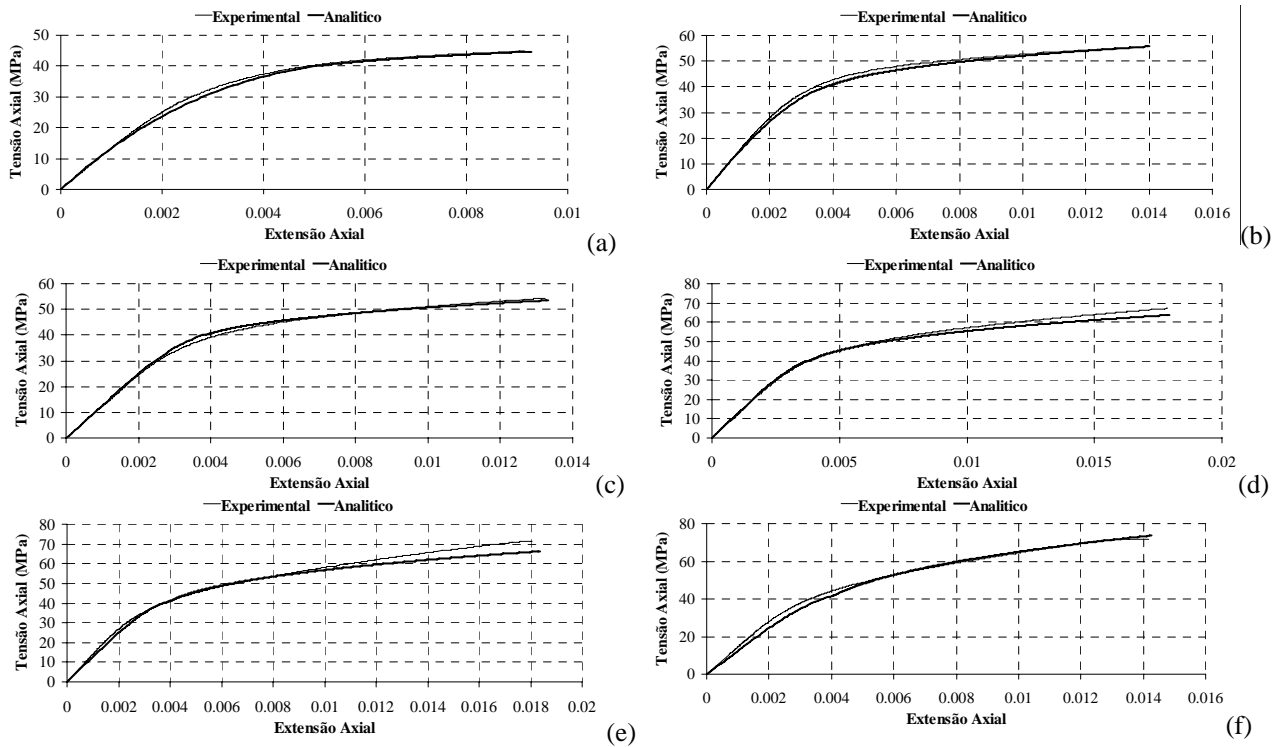


Figura 7.7 – Comparação entre os resultados experimentais e o modelo analítico para os provetes C32S200φ8: (a) W45L3, (b) W45L5, (c) W60L3, (d) W60L5, (e) W600L3, (f) W600L5.

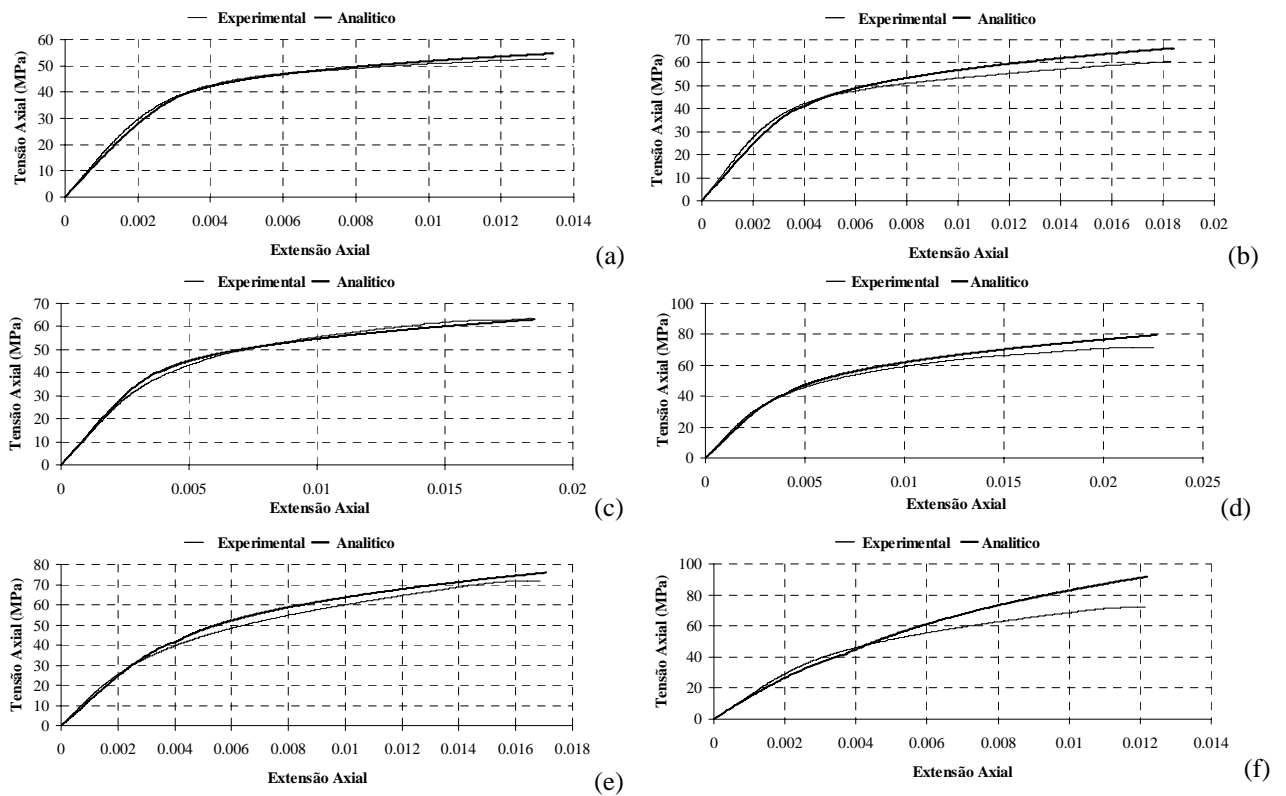


Figura 7.8 – Comparação entre os resultados experimentais e o modelo analítico para os provetes C32S300φ8: (a) W45L3, (b) W45L5, (c) W60L3, (d) W60L5, (e) W600L3, (f) W600L5.

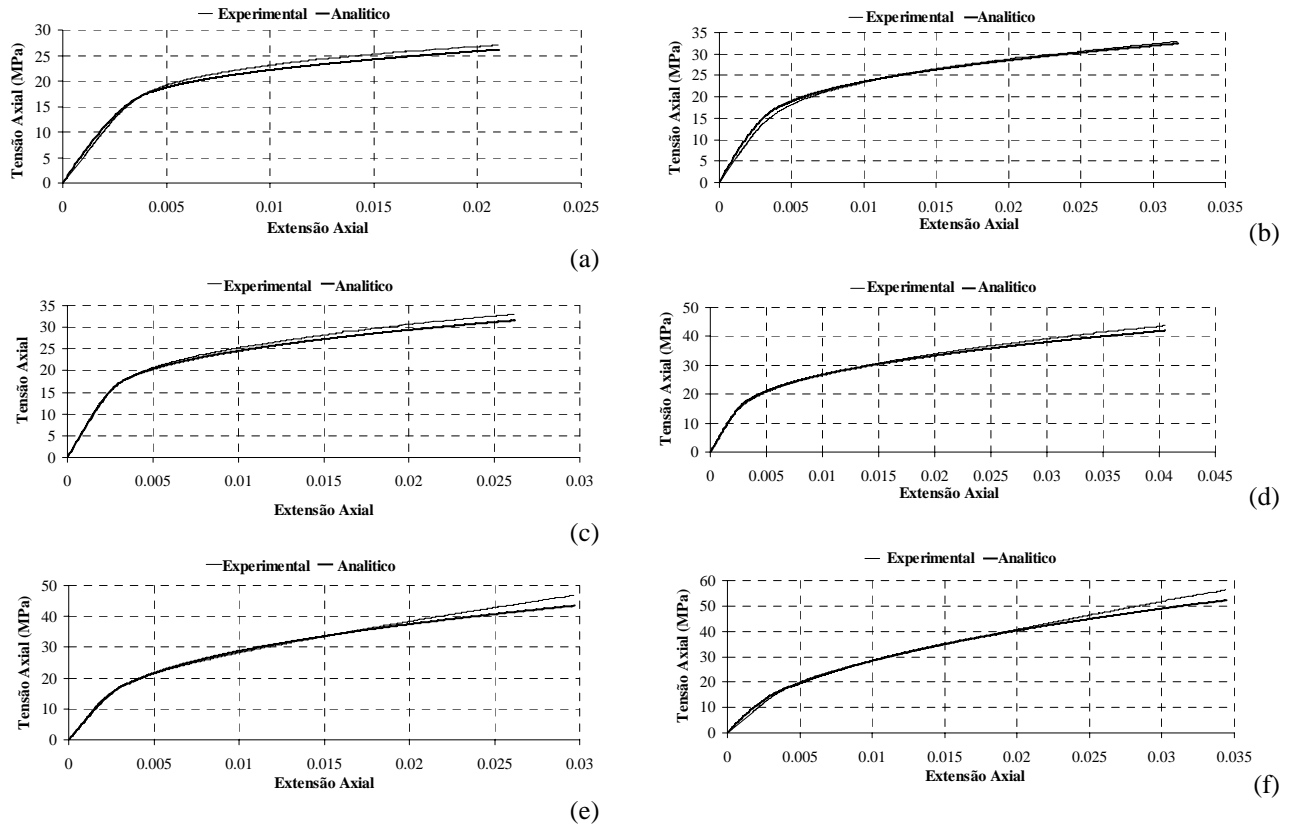


Figura 7.9 – Comparação entre os resultados experimentais e o modelo analítico para os provetes C16S200φ10: (a) W45L3, (b) W45L5, (c) W60L3, (d) W60L5, (e) W600L3, (f) W600L5.

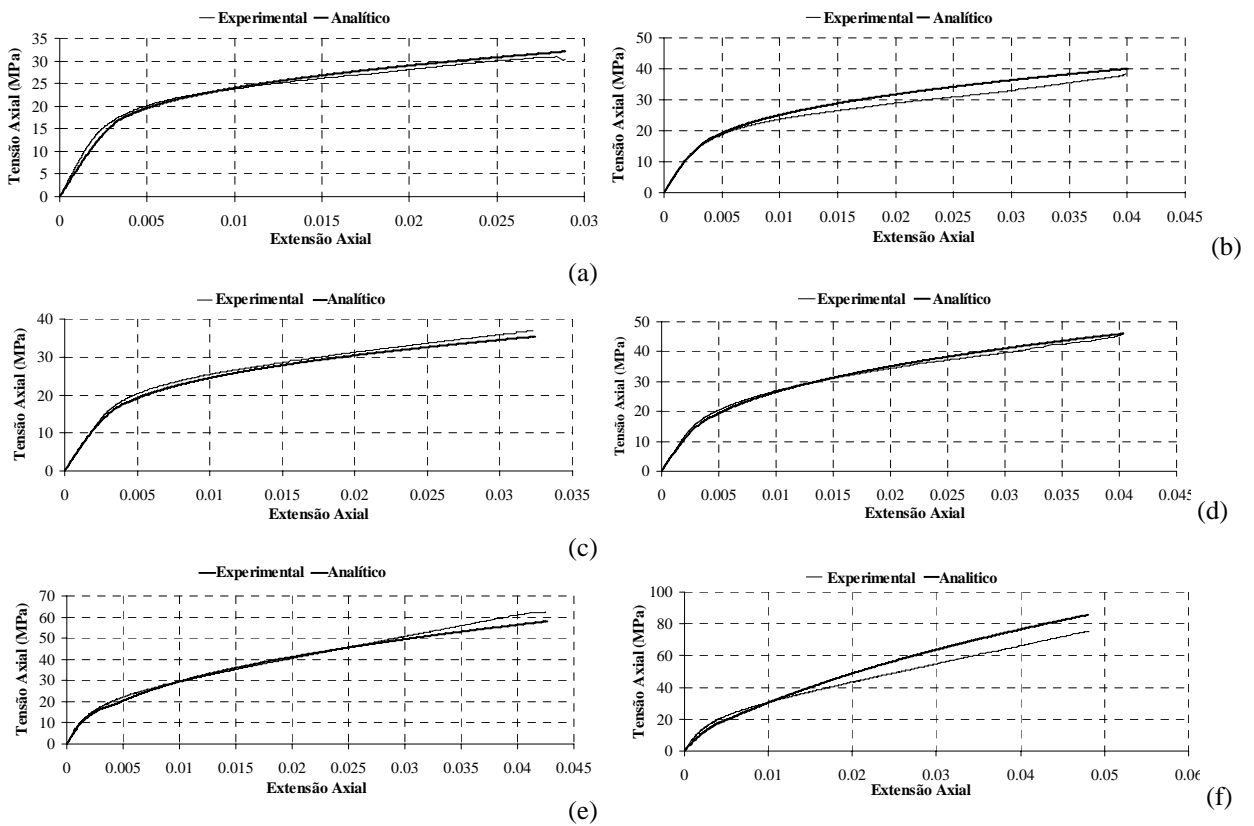


Figura 7.10 – Comparação entre os resultados experimentais e o modelo analítico para os provetes C16S300φ10: (a) W45L3, (b) W45L5, (c) W60L3, (d) W60L5, (e) W600L3, (f) W600L5.

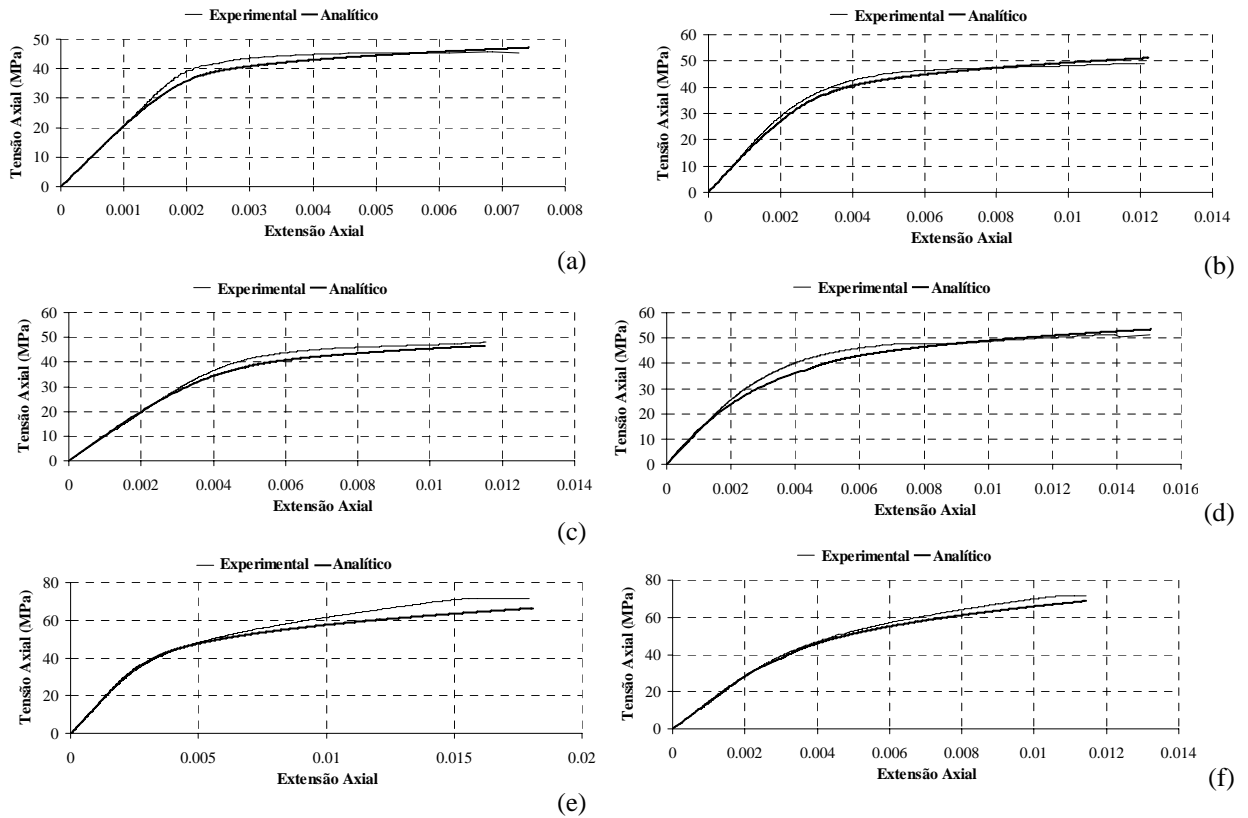


Figura 7.11 – Comparação entre os resultados experimentais e o modelo analítico para os provetes C32S200φ10: (a) W45L3, (b) W45L5, (c) W60L3, (d) W60L5, (e) W600L3, (f) W600L5.

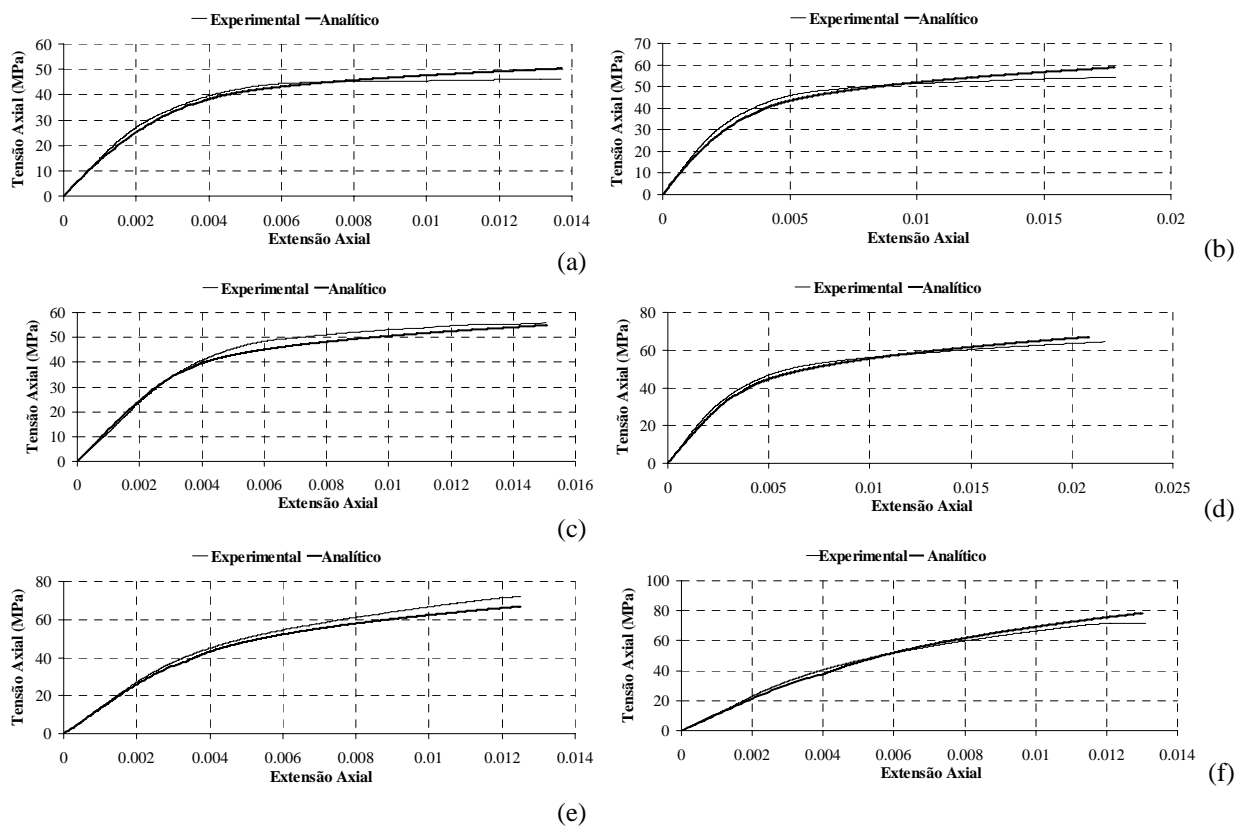


Figura 7.12 – Comparação entre os resultados experimentais e o modelo analítico para os provetes C32S300φ10: (a) W45L3, (b) W45L5, (c) W60L3, (d) W60L5, (e) W600L3, (f) W600L5.

Apesar de alguma discrepância, especialmente em alguns provetes totalmente confinados, a análise dos diagramas permite concluir que o modelo analítico prevê com uma boa aproximação os resultados experimentais  $\sigma_c-\varepsilon_c$ , quer em termos de andamento da curva quer na estimativa da tensão máxima do betão confinado ou das correspondentes extensões axiais. Como se pode ver das Figura 7.3 e Figura 7.4, os valores de  $k_1$  e  $k_2$  são obtidos a partir da equação que melhor se aproximam da nuvem de resultados experimentais, contudo para os pontos mais afastados é normal que o modelo analítico tenda a ter um comportamento de menor convergência em relação aos resultados experimentais.

### 7.3 COMPARAÇÃO COM MODELOS DE OUTROS AUTORES

Para comparar o desempenho do modelo desenvolvido com o garantido pelos modelos propostos recentemente por Lam e Teng [2003] e Triantafillou [2003], todos estes modelos foram aplicados na simulação dos ensaios efectuados no presente trabalho. A título ilustrativo, na Figura 7.13 representa-se a simulação resultante destes três modelos, para o provete de betão armado, confinado com faixas de 45 mm e com 5 camadas de manta, com a designação de W45S6L5 do grupo de ensaios C16S200 $\phi$ 8, de onde se pode concluir que o modelo desenvolvido no presente trabalho simula com maior rigor o comportamento registado experimentalmente.

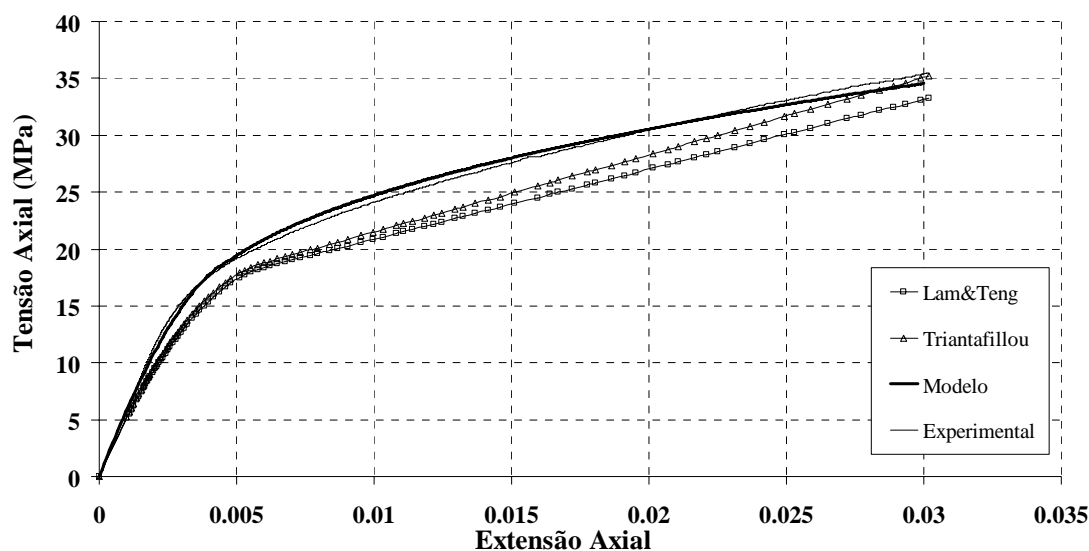


Figura 7.13 – Comparação do modelo proposto com os modelos apresentados por Lam&Teng e Triantafillou.



## CAPÍTULO 8

---

### CONCLUSÕES

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões resultantes deste trabalho bem como alguns assuntos que poderão ser objecto de estudos futuros.

#### 8.1 ENSAIOS DA PRIMEIRA FASE DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

A primeira fase do programa experimental (capítulo 4) consistiu na execução de ensaios de compressão monotónica com cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. O principal objectivo desta fase do programa experimental era seleccionar sistemas de confinamento discretos cujo desempenho em termos de aumento de capacidade de carga última e de absorção de energia, bem como de custo de aplicação, pudessem competir com os sistemas de confinamento contínuo.

Como principais conclusões são de salientar as seguintes:

- para que o confinamento seja efectivo, isto é, permita um aumento da capacidade de carga do provete de referência ( $f_{cc}/f_{co} > 1.0$ ) a percentagem volumétrica de CFRP deve ser superior a 0.4%;
- acima de cinco camadas de CFRP por faixa os benefícios são diminutos, quer em termos de capacidade de carga, quer em termos de absorção de energia;
- o confinamento de provetes com faixas de largura inferior a 30 mm é ineficaz;
- nas séries de igual percentagem de confinamento, verificaram-se maiores aumentos da tensão máxima nas séries que dispunham de menor espaço livre entre as faixas de CFRP;
- o confinamento foi mais efectivo nos provetes de betão de menor resistência (16 MPa);

- a capacidade resistente e a ductilidade aumentaram com a percentagem de CFRP.

## 8.2 ENSAIOS DA SEGUNDA FASE DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

Na segunda fase do programa experimental foram efectuados ensaios monotónicos de compressão uniaxial com provetes de betão armado de 600 mm de altura e com secção circular de 200 mm de diâmetro, cintados com diferentes arranjos efectivos de faixas de manta de fibras de carbono. Estes ensaios tiveram como objectivo fundamental analisar a influência da percentagem de armadura longitudinal, da classe de resistência do betão, da percentagem de CFRP, da largura das faixas de CFRP, do número de faixas ao longo da altura do elemento, do número de camadas por faixa, no comportamento à compressão uniaxial de elementos de pilar de betão armado de secção circular. Para tal efectuaram-se ensaios com provetes de betão de baixa (16 MPa) e moderada resistência à compressão (32 MPa), armados com varões longitudinais  $\phi 8$  e  $\phi 10$  e cintados com mantas de fibras de carbono de 200 e 300 gramas de fibras por  $m^2$  de manta, a que corresponde uma espessura de manta de 0.113 mm e 0.176 mm, respectivamente.

A seguir apresentam-se as principais conclusões resultantes destes ensaios.

### 8.2.1 Modos de rotura

Em todos os provetes verificou-se esmagamento do betão entre faixas e posterior rotura de uma ou mais faixas na zona de concentração de maior dano do betão. De um modo geral, os provetes apresentavam dano elevado no betão, em especial na parte superior do provete, zona onde se localizou a rotura das faixas de fibra de carbono.

### 8.2.2 Incremento da capacidade de carga proporcionada pelo CFRP

Independentemente do nível de deformação do provete, desde que superior à extensão correspondente à resistência à compressão do provete de referência,  $\epsilon_{co}$ , a relativa capacidade de carga do provete confinado ( $\sigma_c/f_{co}$ ) aumentou com o aumento de  $\rho_f$ . Em séries com a mesma percentagem de confinamento de CFRP verificou-se maiores aumentos de capacidade de carga nas que dispunham de menor espaço livre entre faixas. Esta tendência foi mais acentuada nas séries confinadas com a manta de maior rigidez (300  $g/m^2$ ), dado que, quanto mais rígido for o sistema de confinamento discreto, maior

concentração de dano ocorre no betão entre as faixas de confinamento. As séries de provetes do grupo C16S300 $\phi$ 8 foram as que registaram maiores incrementos, quer em termos de capacidade de carga quer em termos de ductilidade. Assim, em pilares de betão de baixa resistência deve-se optar por confinamento contínuo.

### **8.2.3 Índice de ductilidade**

Em termos do parâmetro do índice de ductilidade ( $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$ ) verificou-se que aumenta com a percentagem de confinamento. Em provetes de baixa resistência a compressão (16 MPa), os valores deste índice variaram entre 6.3 para  $\rho_f = 0.25$  e 14.55 para  $\rho_f = 1.76$ . No caso de provetes de moderada resistência a compressão (32 MPa) e para as mesma percentagem de confinamento, o índice de ductilidade variou entre 2.28 e 4.03.

No que se refere à extensão máxima no CFRP, os valores registados dependem significativamente dos modos de rotura ocorridos, dado que as extensões registadas apenas representam o estado de extensão da zona onde os extensómetros ficaram colados. No entanto, verificou-se a tendência para ser tanto menor quanto maior era a percentagem de confinamento de CFRP.

### **8.2.4 Incremento da capacidade de absorção de energia proporcionada pelo CFRP**

A capacidade de absorção de energia ( $\Delta U/U_c$ ) aumentou com  $\rho_f$ . Entre séries com a mesma percentagem de confinamento, as totalmente confinadas apresentaram maior capacidade de absorção de energia que as séries parcialmente confinadas. Assim, caso seja necessário aumentar a capacidade de absorção de energia de elementos de pilar de betão armado, o confinamento contínuo é, em primeira instância, mais eficaz que o confinamento discreto. No entanto, o custo das possíveis soluções de confinamento deve ser considerado na tomada de decisão, pois a solução discreta poderá ser mais vantajosa, além de permitir o escape de água eventualmente existente no interior do betão, o que poderá não suceder nos sistemas de confinamento contínuos, conduzindo a fenómenos de corrosão das armaduras existentes no elemento a confinar.

### **8.2.5 Influência do tipo de betão na eficácia do confinamento**

Os provetes realizados com betão de menor resistência (16 MPa), após terem sido ensaiados ficaram mais danificados que os provetes realizados com betão de 32 MPa de resistência à compressão.

Da análise dos resultados obtidos, organizados de forma a avaliar-se a influência que a capacidade resistente do betão exerce na efectividade garantida pelos sistemas de confinamento adoptados, verificou-se que nas séries formadas pelo betão de menor capacidade resistente os sistemas de confinamento em CFRP proporcionaram maiores incrementos de capacidade de carga. Este comportamento deve-se ao facto de nos provetes de betão de menor resistência ocorrer uma maior expansibilidade transversal do betão conduzindo a uma maior mobilização do material de reforço que, consequentemente conduz a um maior incremento da capacidade de carga do provete.

Em geral, nos provetes de betão de menor resistência à compressão a capacidade de absorção de energia proporcionada pelos sistemas de confinamento adoptados foi mais elevada do que a registada nos provetes formados por betão de maior resistência à compressão. Com o aumento dos níveis de deformação axial instalada nos provetes estas diferenças aumentaram, ou seja, quanto maior for a deformação axial possível de aplicar a um pilar a confinar, a efectividade de um sistema de confinamento em termos de aumento da capacidade de absorção de energia desse elemento será tanto maior quanto menor for a resistência do betão.

### **8.2.6 Influência do tipo de manta na eficácia do confinamento**

Os dois tipos de manta aplicados revelaram um bom desempenho não existindo diferenças significativas. Em termos de incremento de capacidade de carga ( $\sigma_c/f_{co}$ ) houve uma tendência para uma maior eficácia dos sistemas confinados com a manta mais rígida (300 g/m<sup>2</sup>).

### **8.2.7 Influência da percentagem de armadura longitudinal na eficácia do confinamento**

Como era de esperar, a existência de armaduras nos provetes aumentou a capacidade resistente dos mesmos. Comparando os resultados obtidos nos provetes armados longitudinalmente com 4 varões  $\phi 8$  e com estribos  $\phi 6$  espaçados a 96 mm, com os

determinados em provetes armados com 4 varões longitudinais  $\phi 10$  e estribos  $\phi 6$  espaçados a 120 mm, verificou-se que nos primeiros foram alcançados maiores valores de  $\sigma_c/f_{co}$ . Assim, o confinamento foi mais efectivo nos provetes de armadura longitudinal de menor diâmetro, pois a sua maior susceptibilidade a fenómenos de encurvadura conduziu a uma maior activação dos sistemas de confinamento.

### **8.2.8 Influência do número de camadas de CFRP na eficácia do confinamento**

Nos provetes de betão armado foram aplicadas duas soluções de reforço para cada tipo de configuração de confinamento adoptada, uma com 3 camadas de CFRP e outra com 5 camadas de CFRP. Para todos os parâmetros avaliados verificou-se um melhor desempenho dos provetes confinados com 5 camadas, relativamente ao provete de referência (não confinados). Na tabela 8.1 são apresentados os valores do incremento de capacidade de carga proporcionado pelo reforço com 3 e com 5 camadas de CFRP, tendo-se tomado por comparação os valores registados nos provetes de referência.

Para todos os grupos de séries estudados houve um incremento da capacidade de carga proporcionada pelo confinamento com 5 camadas em relação aos provetes confinados com 3 camadas, alcançando valores de 128% para as séries parcialmente confinadas e 156% para as séries totalmente confinadas.

Verifica-se que estes incrementos foram mais significativos nos provetes de betão de menor capacidade resistente.

Estes resultados indiciam que a estratégia de aumentar o número de camadas de CFRP no sentido de aumentar a capacidade de carga de pilares de betão armado é tão menos eficaz quanto maior for a resistência do betão. Nestes casos seria desejável optar por sistemas de confinamento com possibilidade de aplicar pós-tensão, que é uma das áreas que o autor do presente trabalho recomenda para futuros desenvolvimentos.

Tabela 8.1 – Incremento de capacidade de carga entre provetes confinados com 3 e 5 camadas.

Grupo de ensaio	Tipo de confinamento	Incremento de capacidade de carga ( $f_{cc}/f_{co}$ )	Incremento de capacidade de carga entre 3 e 5 camadas [%]
C20S200φ8	W45S6L3	1.88	53%
	W45S6L5	2.41	
	W60S6L3	2.34	62%
	W60S6L5	2.96	
	W600S1L3	3.26	95%
	W600S1L5	4.21	
C20S200φ10	W45S5L3	1.74	38%
	W45S5L5	2.12	
	W60S5L3	2.12	70%
	W60S5L5	2.82	
	W600S1L3	3.02	61%
	W600S1L5	3.63	
C20S300φ8	W45S6L3	2.05	106%
	W45S6L5	3.11	
	W60S6L3	3.14	128%
	W60S6L5	4.42	
	W600S1L3	3.55	156%
	W600S1L5	5.11	
C20S300φ10	W45S5L3	1.99	47%
	W45S5L5	2.46	
	W60S5L3	2.38	60%
	W60S5L5	2.98	
	W600S1L3	4.04	80%
	W600S1L5	4.84	
C32S200φ8	W45S6L3	1.37	32%
	W45S6L5	1.69	
	W60S6L3	1.66	39%
	W60S6L5	2.05	
	W600S1L3	2.17	1%
	W600S1L5*	2.18	
C32S200φ10	W45S5L3	1.36	11%
	W45S5L5	1.47	
	W60S5L3	1.43	10%
	W60S5L5	1.53	
	W600S1L3	2.14	1%
	W600S1L5*	2.15	
C32S300φ8	W45S6L3	1.60	25%
	W45S6L5	1.85	
	W60S6L3	1.94	24%
	W60S6L5*	2.18	
	W600S1L3*	2.18	1%
	W600S1L5*	2.19	
C32S300φ10	W45S5L3	1.38	25%
	W45S5L5	1.63	
	W60S5L3	1.67	26%
	W60S5L5	1.93	
	W600S1L3*	2.16	-2%
	W600S1L5*	2.14	

\* provetes que não alcançaram a rotura até aos 2500 kN.

### **8.3 SISTEMAS DE CONFINAMENTO DISCRETOS EM COMPARAÇÃO COM OS SISTEMAS DE CONFINAMENTO CONTINUOS**

Os sistemas de confinamento discretos apresentam uma maior economia de material e de mão-de-obra em comparação com os sistemas de confinamento contínuos, isto ocorre porque os sistemas de confinamento são efectuados sem equipamentos especializados. Os sistemas de confinamento parciais permitiram aumentos máximos da capacidade de carga de aproximadamente 4 vezes a capacidade de carga dos correspondentes provetes de referência.

Além disso, o facto da superfície exterior do elemento não ficar totalmente envolvido pelo FRP (sistemas de confinamento discretos) permite que água eventualmente retida no interior da micro-estrutura do betão se liberte para o exterior, diminuindo os riscos de corrosão das armaduras de aço.

Os sistemas de confinamento discreto apresentam ainda a vantagem de conduzirem a roturas menos violentas, dado que permitem a dissipação de alguma energia por deformação elasto-plástica do betão entre faixas de CFRP

### **8.4 ENSAIOS DA TERCEIRA FASE DO PROGRAMA EXPERIMENTAL**

Na terceira fase do programa experimental foi avaliado o comportamento de elementos de pilar de betão armado, de secção circular confinados parcial e totalmente com mantas de fibras de carbono, sujeitos a acções cíclicas com uma história de carga de três repetições e com incrementos consecutivos de amplitude de força.

Tal como nas séries de provetes ensaiados na primeira e segunda fase do trabalho, a rotura destes provetes deu-se de forma violenta, por rotura da manta de CFRP a qual era precedida por sons devidos ao rompimento das fibras.

O maior incremento de capacidade de carga registado nos provetes confinados totalmente indicia que o confinamento contínuo é mais eficaz que o discreto quando os elementos de pilar de betão armado são submetidos a carregamentos cíclicos.

Da análise dos ciclos de descarga/recarga e da relação tensão-extensão axial constata-se que a rigidez de descarga é maior do que a rigidez em recarga. A tendência para o

decréscimo de rigidez de descarga diminui com o aumento da extensão axial do provete, podendo essa tendência ser aproximada por uma lei do tipo exponencial.

Quanto à evolução da rigidez dos ramos de recarga verifica-se também haver uma tendência para o seu decréscimo com o aumento da extensão axial do provete, não sendo, no entanto, tão acentuada como o verificado na rigidez dos ramos de descarga.

Entre ciclos de mesma amplitude de carga verifica-se haver uma tendência para um aumento ligeiro da rigidez de recarga, justificável pelo acréscimo de tensão no CFRP entre estes ciclos, que tem como consequência aumentar o confinamento do betão.

## **8.5 MODELO ANALÍTICO**

O modelo analítico proposto neste trabalho para provetes de betão armado, de secção circular, reforçados parcial e totalmente com manta de CFRP e sujeitos a compressão axial monotónica permitiu simular, com boa aproximação, os resultados registados nos ensaios experimentais.

A comparação do desempenho do modelo desenvolvido com o garantido por modelos desenvolvidos por outros autores confirmam a validade da investigação analítica desenvolvida no âmbito do presente trabalho.

## **8.6 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Em termos de desenvolvimentos futuros nesta área, refere-se em termos experimentais, avaliar a eficácia dos sistemas de confinamento discreto e contínuo em pilares de secção rectangular.

Outra área de interesse trata-se do reforço híbrido de pilares: laminados segundo a técnica NSM para o reforço à flexão e aplicação de faixas de manta de CFRP para confinamento do betão, aumento da capacidade de absorção de energia e aumento da resistência ao corte.

Igualmente interessante será o estudo de sistemas de confinamento activo com possibilidade de aplicar pós-tensão.

Em termos numéricos, refere-se a adaptação do modelo ao comportamento de provetes sujeitos a acções cíclicas.

**Anexo A**

---

**Curvas tensão versus extensão nos varões de aço**



**A.1 – Gráficos tensão versus extensão nos varões de aço para o grupo C16**

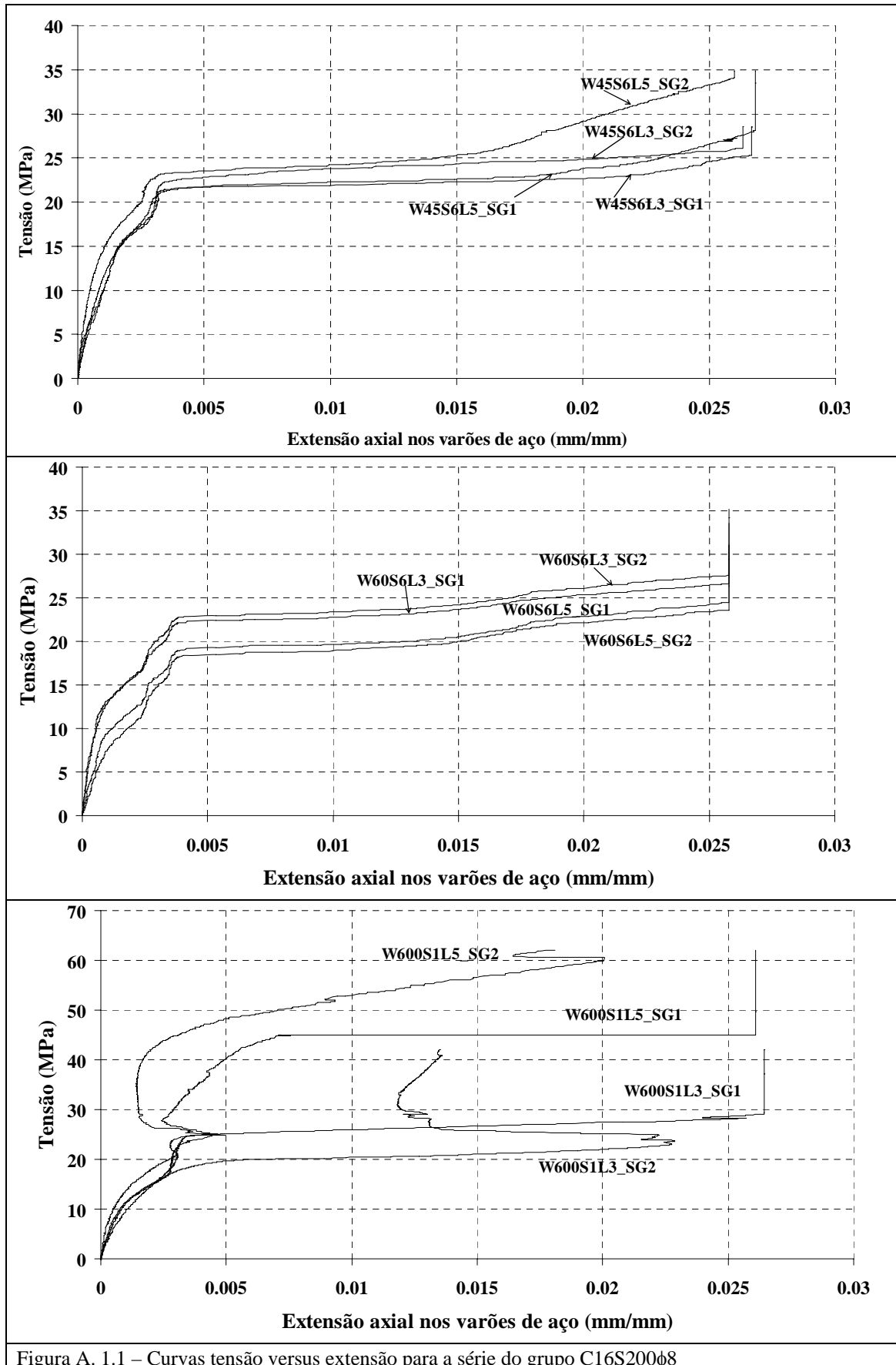
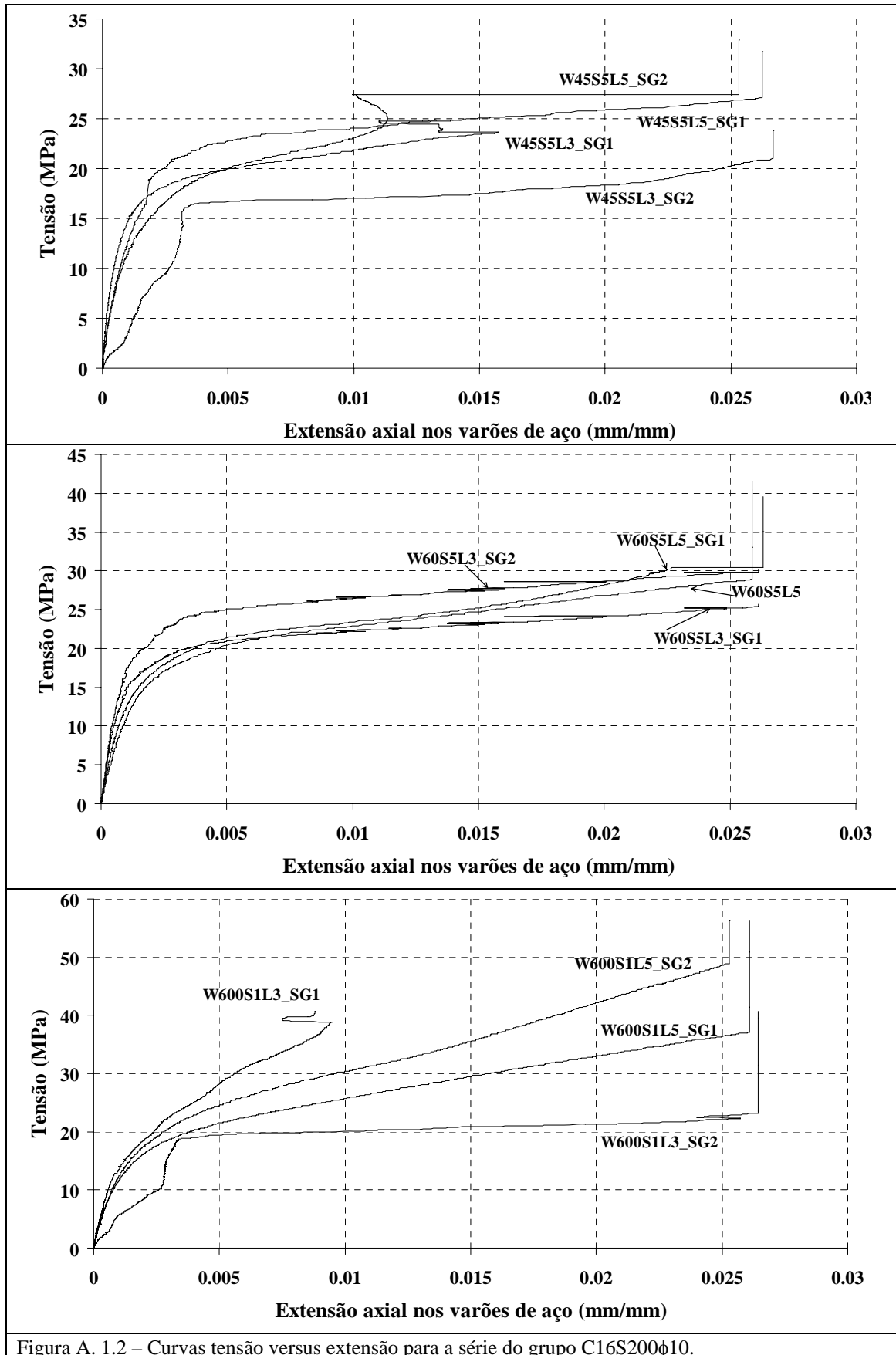


Figura A. 1.1 – Curvas tensão versus extensão para a série do grupo C16S200φ8

Figura A. 1.2 – Curvas tensão versus extensão para a série do grupo C16S200 $\phi$ 10.

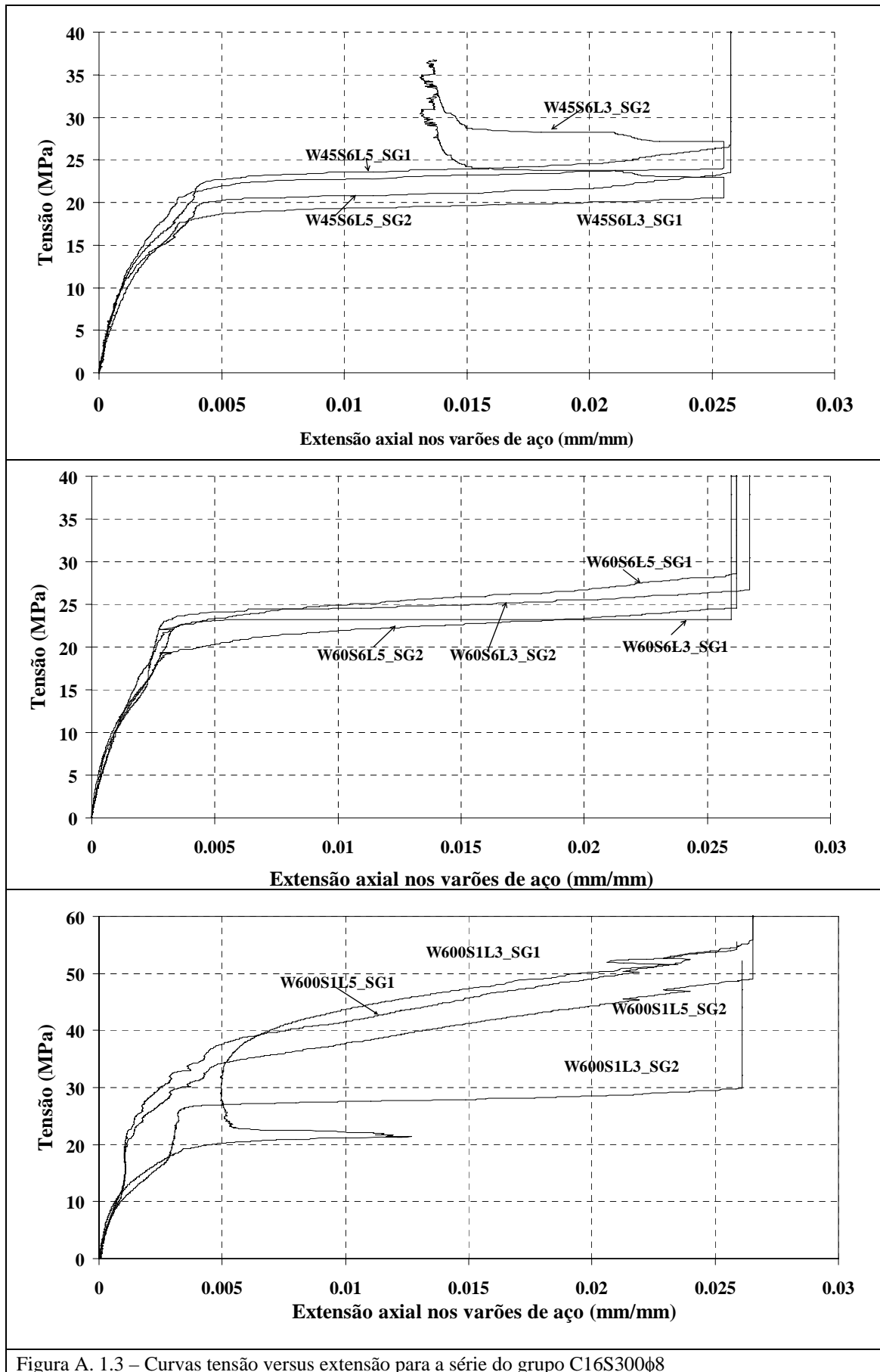
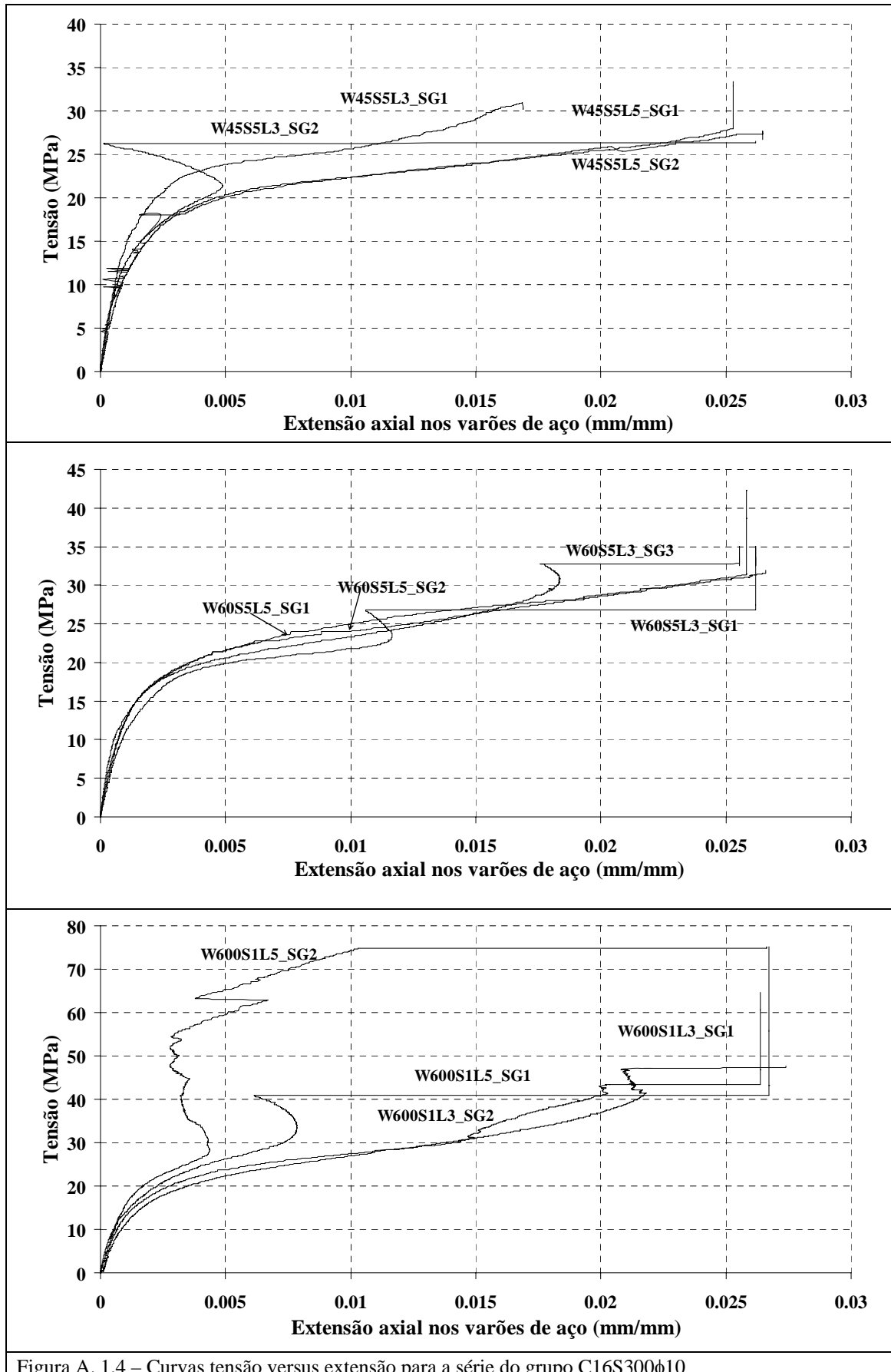


Figura A. 1.3 – Curvas tensão versus extensão para a série do grupo C16S300φ8



## A.2 – Gráficos tensão versus extensão nos varões de aço para o grupo C32

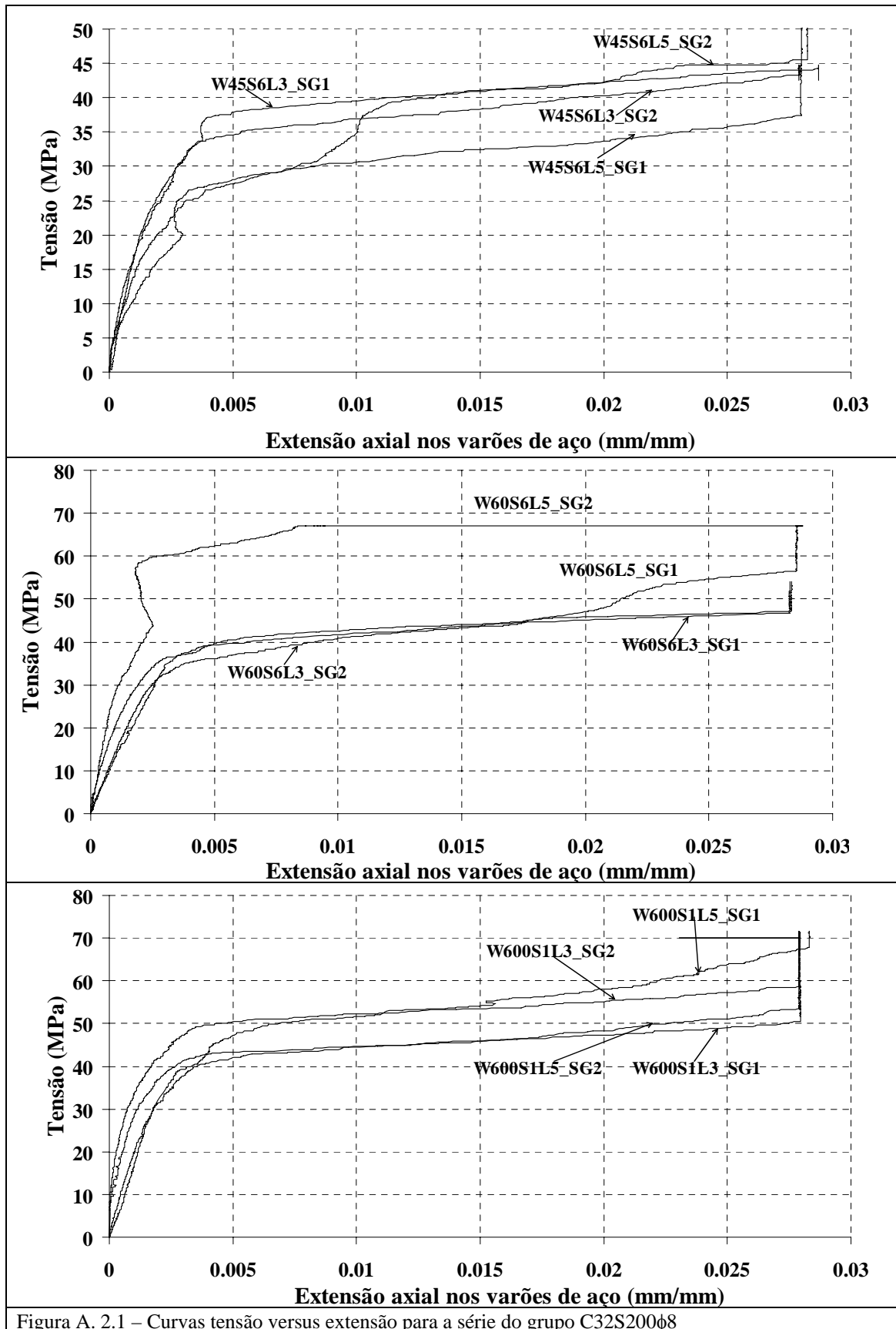
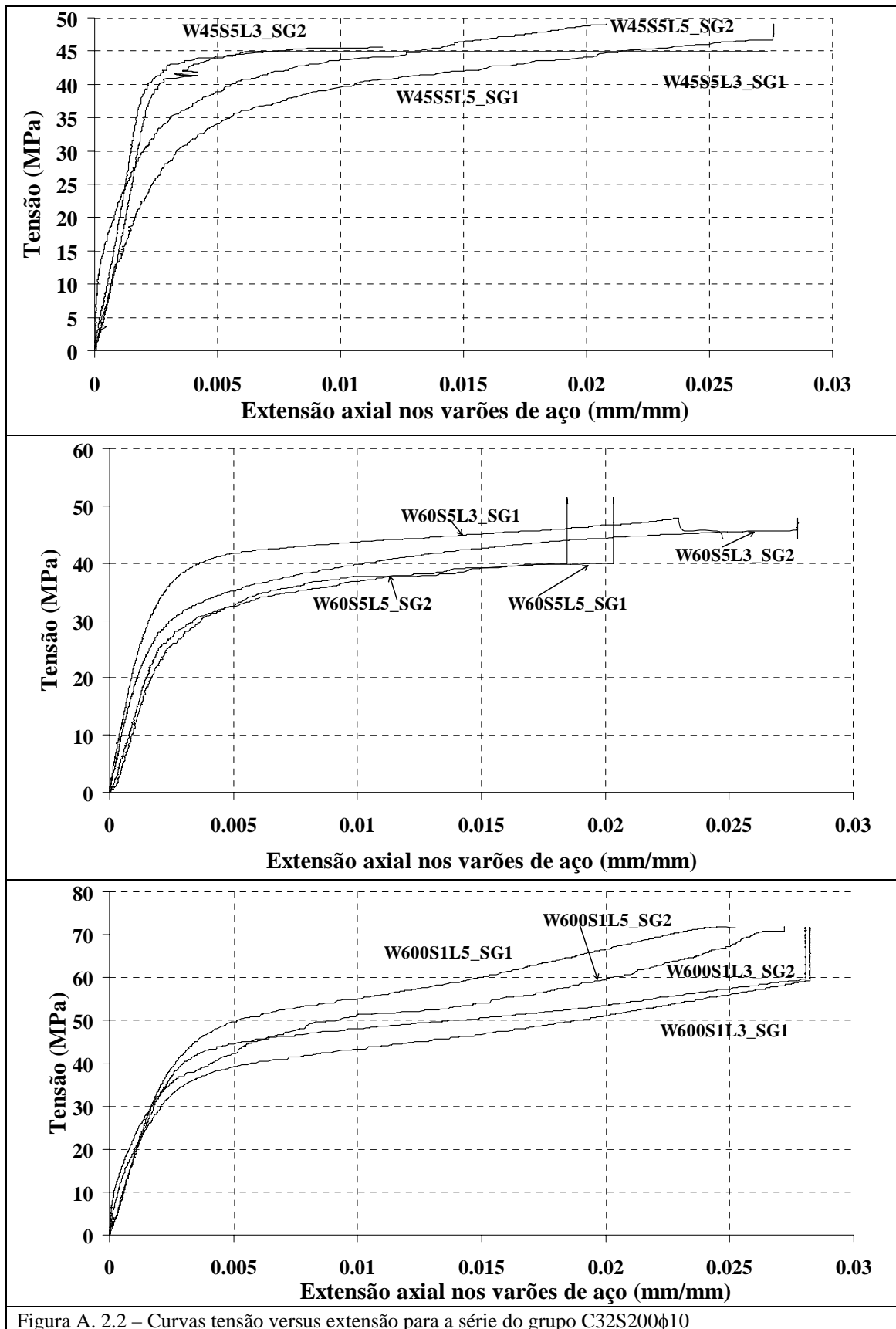


Figura A. 2.1 – Curvas tensão versus extensão para a série do grupo C32S200φ8



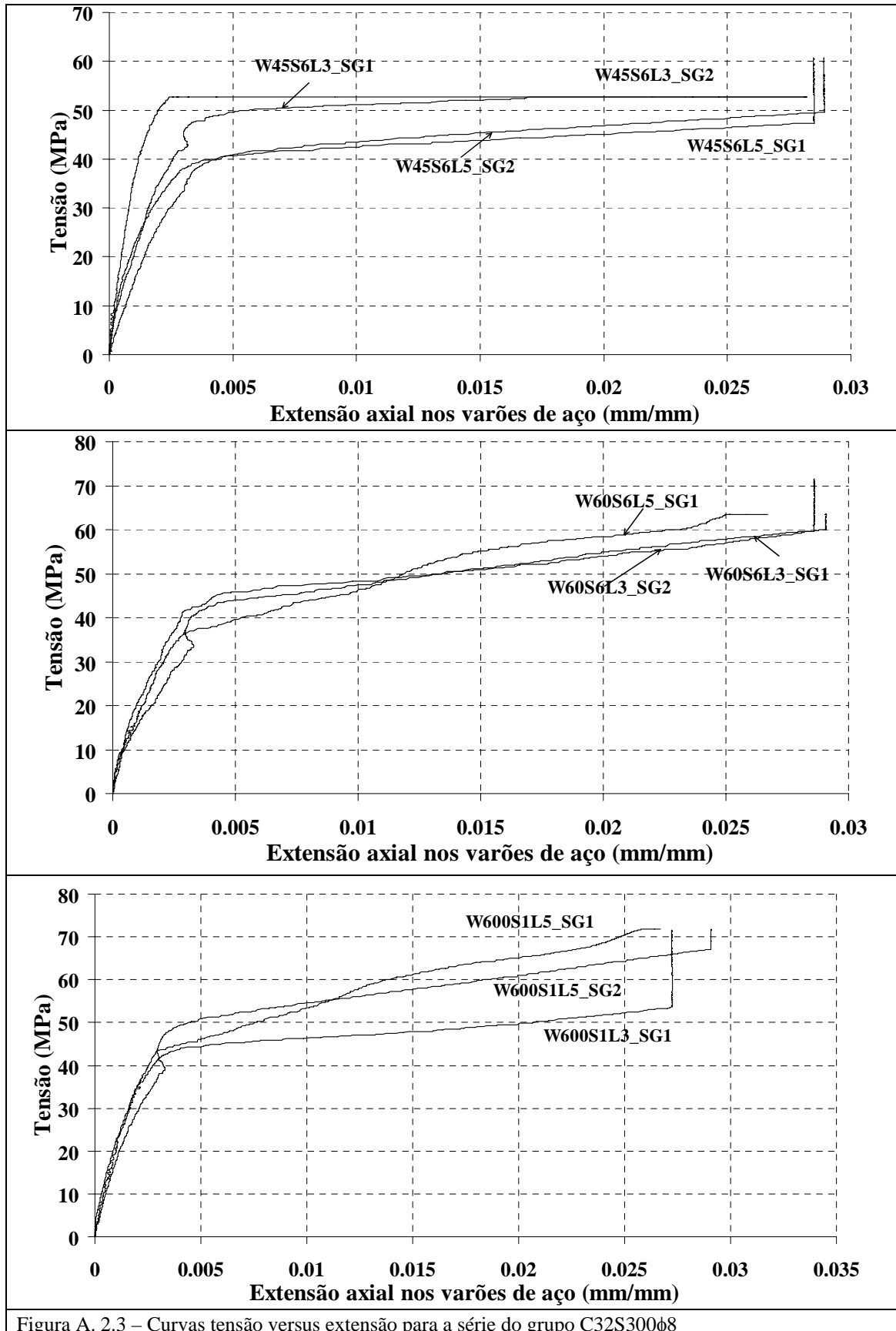
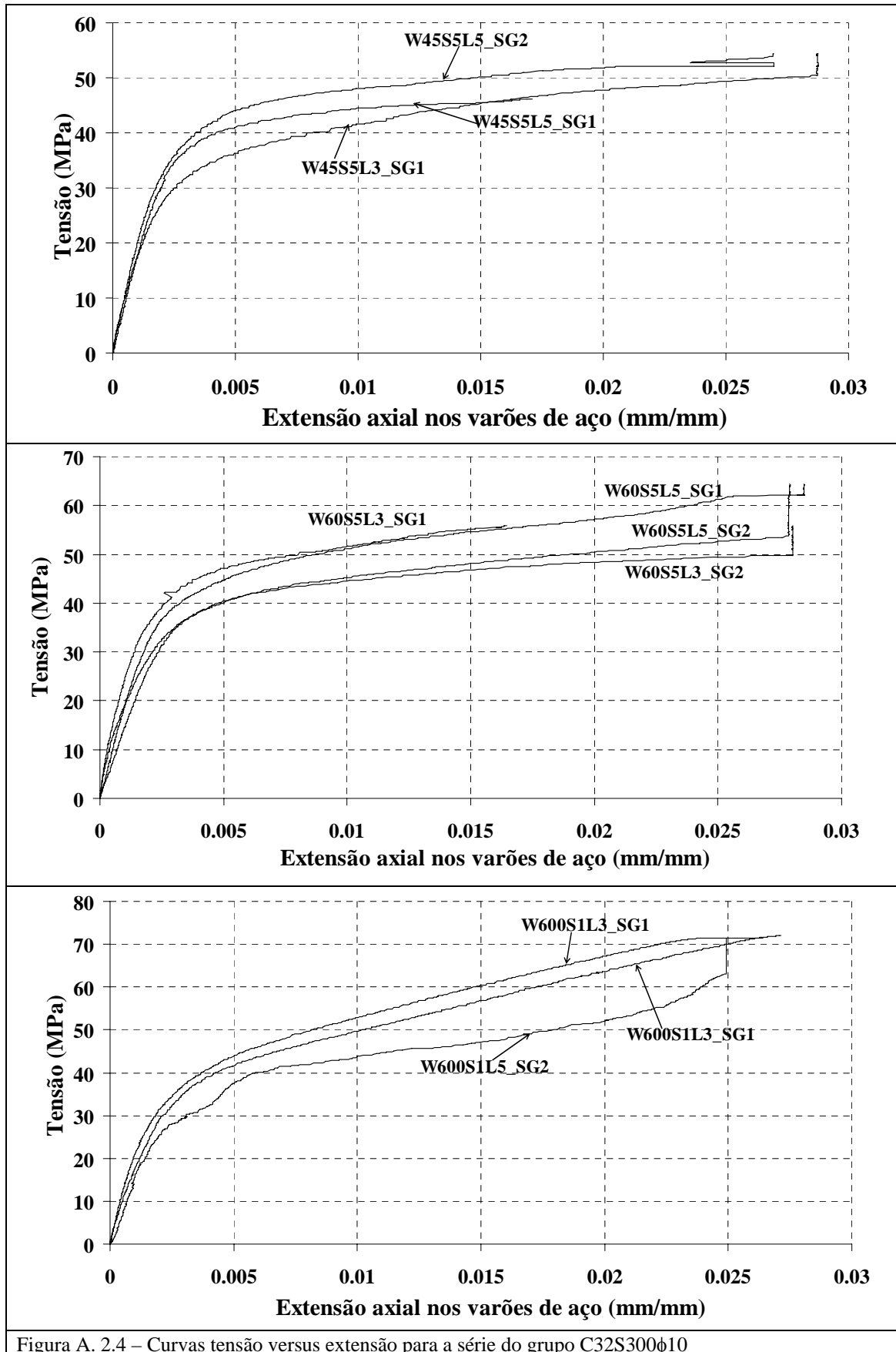


Figura A. 2.3 – Curvas tensão versus extensão para a série do grupo C32S300φ8

Figura A. 2.4 – Curvas tensão versus extensão para a série do grupo C32S300 $\phi$ 10

**Anexo B**

---

**Modo de rotura dos provetes de 600 mm**



### B.1 - Modo de rotura dos provetes de betão simples do grupo C16


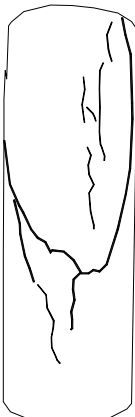

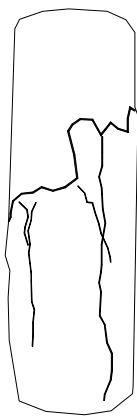
Provete	Esquema	Provete	Esquema
			
simples_a		simples_b	

Figura B. 1.1 - Esquema do modo de rotura dos provetes de betão simples


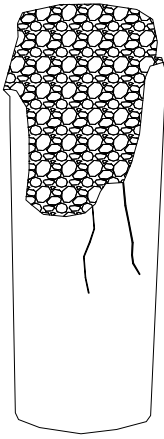



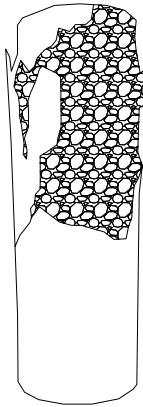

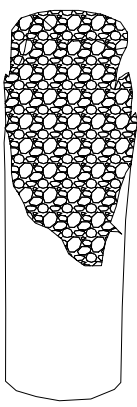
Provete	Esquema	Provete	Esquema
			
φ8_a		φ8_b	

Figura B 1.2 - Esquema do modo de rotura dos provetes reforçados com φ8

Provete	Esquema	Provete	Esquema
			
φ10_a		φ10_b	

B 1.3 - Esquema do modo de rotura dos provetes reforçados com φ10

**B.2 – Modo de rotura das séries de ensaios do grupo C16S200φ8**


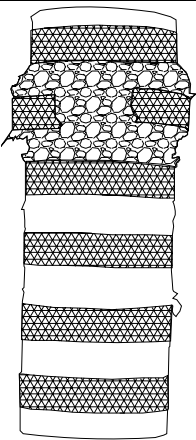

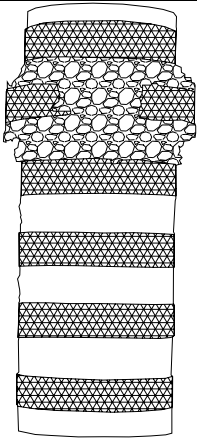

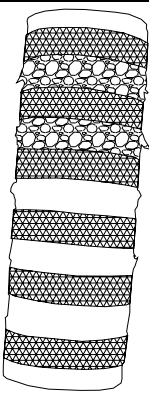

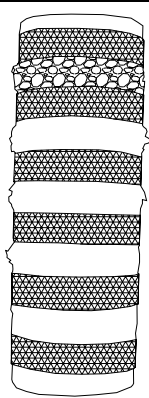

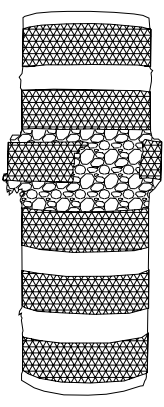

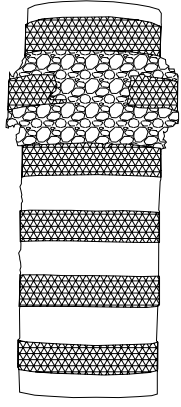

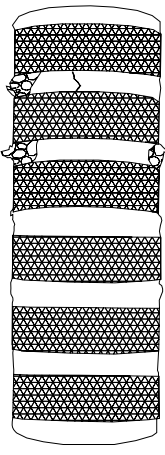

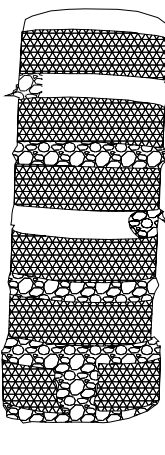

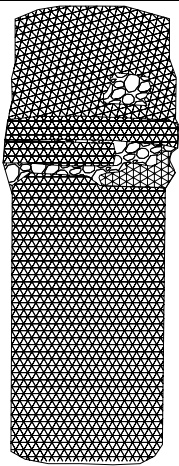

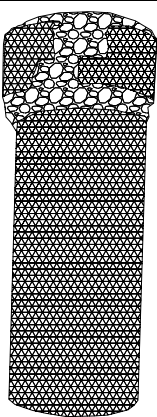

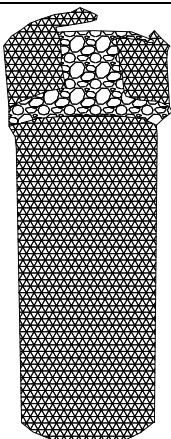

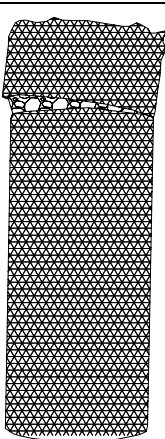
	Provete	Esquema	Provete	Esquema
<b>3 camadas</b>				
	W45S6L3_a		W45S6L3_b	
<b>5 camadas</b>				
	W45S6L5_a		W45S6L5_b	

Figura B.2.1 - Esquema do modo de rotura das séries W45S6Ln

	Provete	Esquema	Provete	Esquema
<b>3 camadas</b>				
	W60S6L3_a		W60S6L3_b	

<b>5 camadas</b>				
	W60S6L5_a		W60S6L5_b	
Figura B.2.2 - Esquema do modo de rotura das séries W60S6Ln				

	Provete	Esquema	Provete	Esquema
<b>3 camadas</b>				
	W600S1L3_a		W600S1L3_b	
<b>5 camadas</b>				
	W600S1L5_a		W600S1L5_b	
Figura B.2.3 - Esquema do modo de rotura das séries W600S1Ln				

**B. 3 – Modo de rotura das séries de ensaios do grupo C16S200φ10**


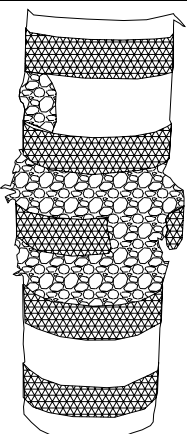

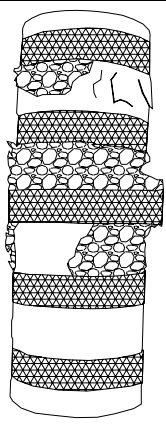

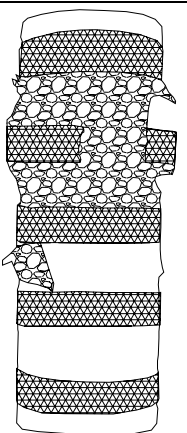

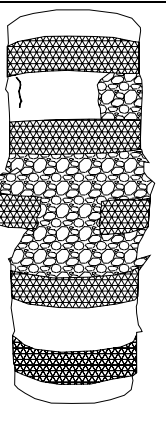

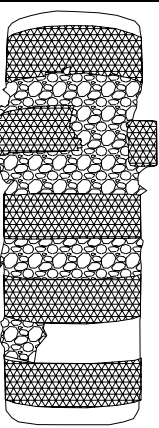

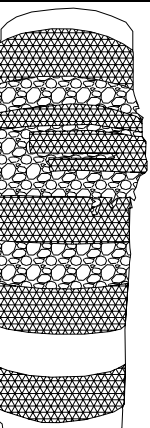

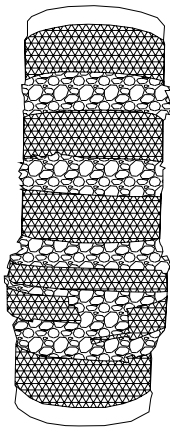

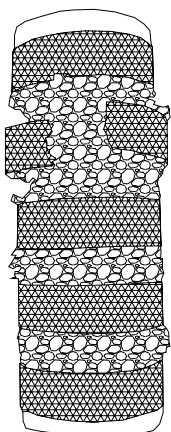

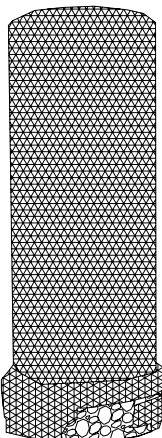

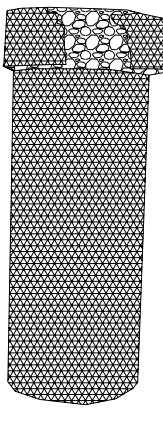

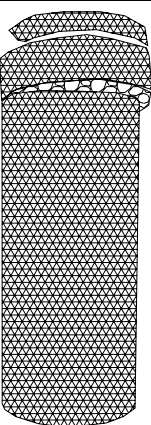

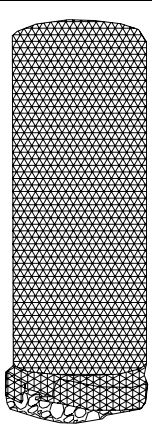
	Provete	Esquema	Provete	Esquema
<b>3 camadas</b>				
	W45S5L3_a		W45S5L3_b	
<b>5 camadas</b>				
	W45S5L5_a		W45S5L5_b	

Figura B 3.1 - Esquema do modo de rotura das séries W45S5Ln

	Provete	Esquema	Provete	Esquema
<b>3 camadas</b>				
	W60S5L3_a		W60S5L3_b	

5 camadas				
	W60S5L5_a		W60S5L5_b	
Figura B 3.2 - Esquema do modo de rotura das séries W60S5Ln				

	Provete	Esquema	Provete	Esquema
3 camadas				
	W600S1L3_a		W600S1L3_b	
5 camadas				
	W600S1L5_a		W600S1L5_b	
Figura B 3.3 - Esquema do modo de rotura das séries W600S1Ln				

**B. 4 – Modo de rotura das séries de ensaios do grupo C16S300φ8**


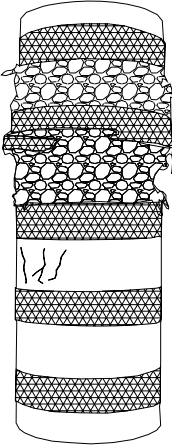

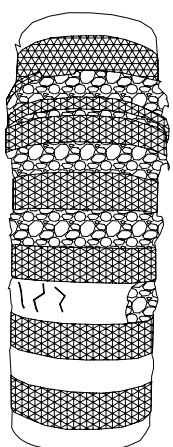

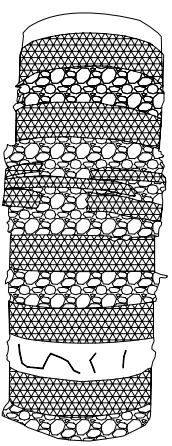

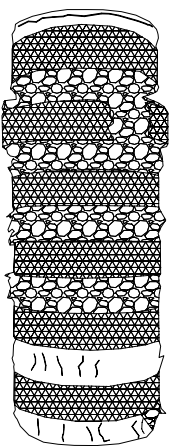

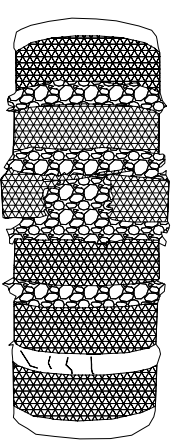

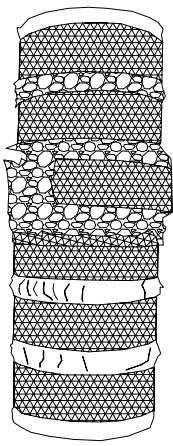
	Provete	Esquema	Provete	Esquema
<b>3 camadas</b>				
	W45S6L3_a		W45S6L3_b	
<b>5 camadas</b>				
	W45S6L5_a		W45S6L5_b	

Figura B 4.1 - Esquema do modo de rotura das séries W45S6Ln

	Provete	Esquema	Provete	Esquema
<b>3 camadas</b>				
	W60S6L3_a		W60S6L3_b	


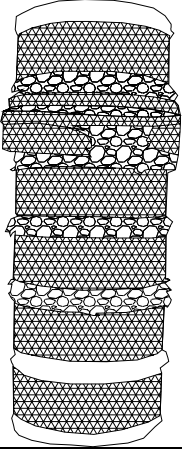

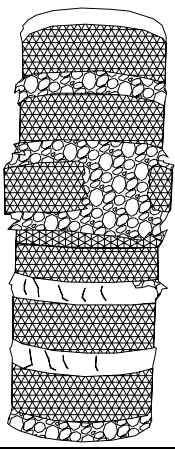
<b>5 camadas</b>				
	W60S6L5_a		W60S6L5_b	

Figura B 4.2 - Esquema do modo de rotura das séries W60S6Ln


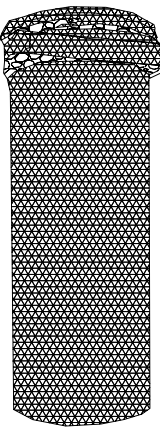

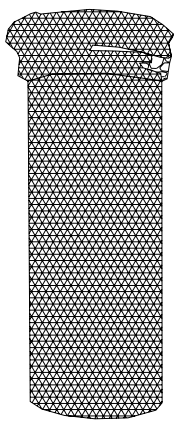

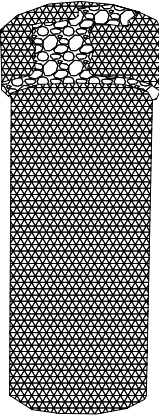

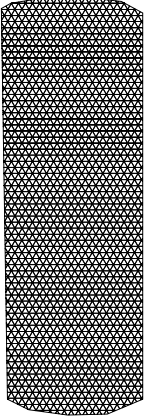
	Provete	Esquema	Provete	Esquema
<b>3 camadas</b>				
	W600S1L3_a		W600S1L3_b	
<b>5 camadas</b>				
	W600S1L5_a		W600S1L5_b	

Figura B 4.3 - Esquema do modo de rotura das séries W600S1Ln

**B.5 – Modo de rotura das séries de ensaios do grupo C16S300φ10**


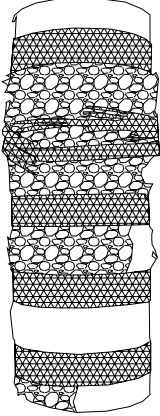

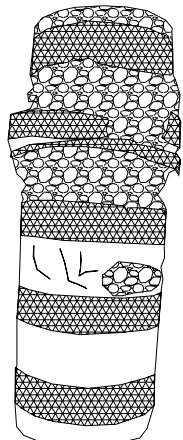

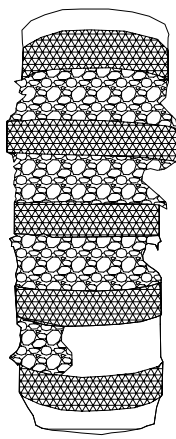

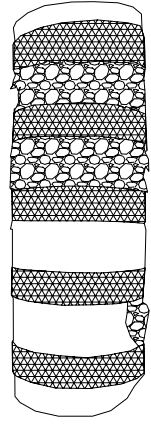

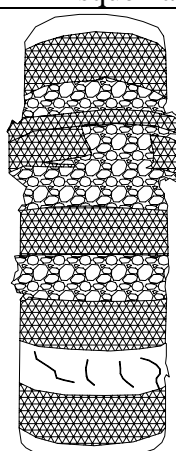

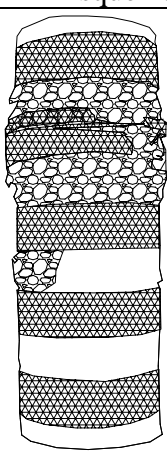
	Provete	Esquema	Provete	Esquema
<b>3 camadas</b>				
	W45S5L3_a		W45S5L3_b	
<b>5 camadas</b>				
	W45S5L5_a		W45S5L5_b	

Figura B 5.1 - Esquema do modo de rotura das séries W45S5Ln

	Provete	Esquema	Provete	Esquema
<b>3 camadas</b>				
	W60S5L3_a		W60S5L3_b	


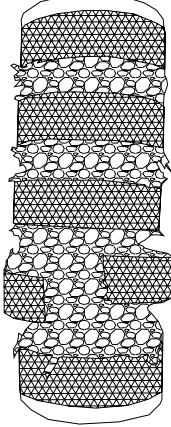

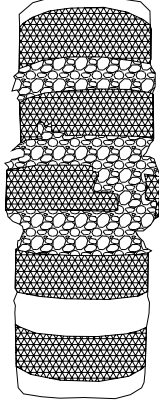
<b>5 camadas</b>				
	W60S5L5_a		W60S5L5_b	

Figura B 5.2 - Esquema do modo de rotura das séries W60S5Ln


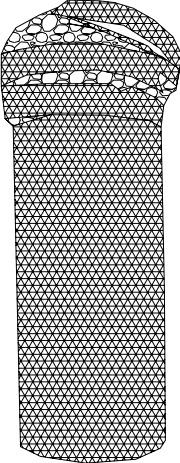

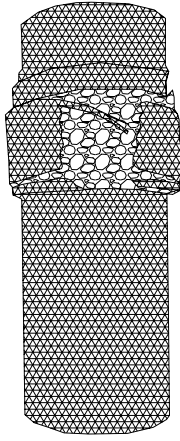

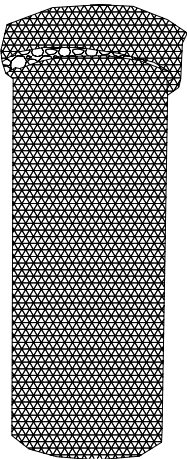
	Provete	Esquema	Provete	Esquema
<b>3 camadas</b>				
	W600S1L3_a		W600S1L3_b	
<b>5 camadas</b>				
	W600S1L5_a		W600S1L5_b	

Figura B 5.3 - Esquema do modo de rotura das séries W600S1Ln

### B.6 - Modo de rotura dos provetes de betão simples do grupo C32


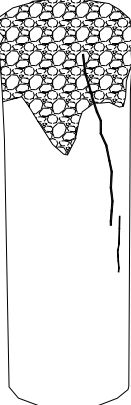

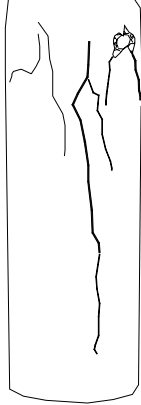
Provete	Esquema	Provete	Esquema
			
simples_a		simples_b	

Figura B. 6.1 - Esquema do modo de rotura dos provetes de betão simples


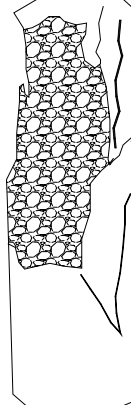

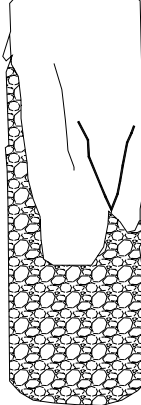
Provete	Esquema	Provete	Esquema
			
φ8_a		φ8_b	

Figura B 6.2 - Esquema do modo de rotura dos provetes reforçados com φ8





Provete	Esquema	Provete	Esquema
			
φ10_a		φ10_b	

Figura B 6.3 - Esquema do modo de rotura dos provetes reforçados com φ10

**B.7 – Modo de rotura das séries de ensaios do grupo C32S200φ8**


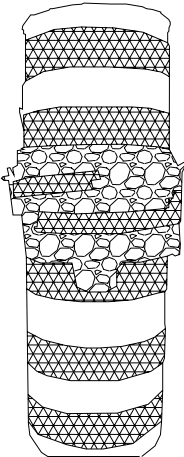

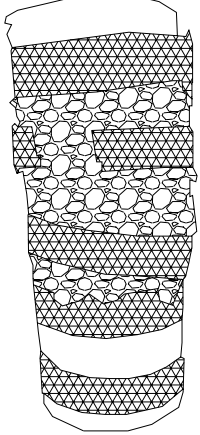

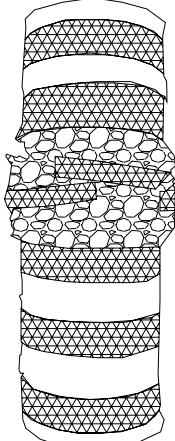

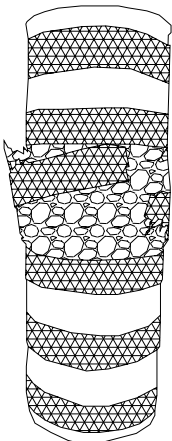

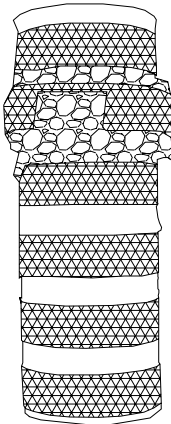

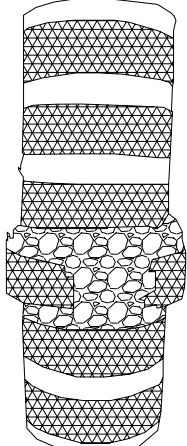
	Provete	Esquema	Provete	Esquema
<b>3 camadas</b>				
	W45S6L3_a		W45S6L3_b	
<b>5 camadas</b>				
	W45S6L5_a		W45S6L5_b	

Figura B 7.1 - Esquema do modo de rotura das séries W45S6Ln

	Provete	Esquema	Provete	Esquema
<b>3 camadas</b>				
	W60S6L3_a		W60S6L3_b	


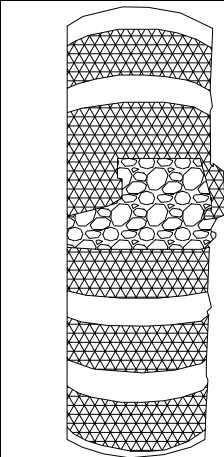

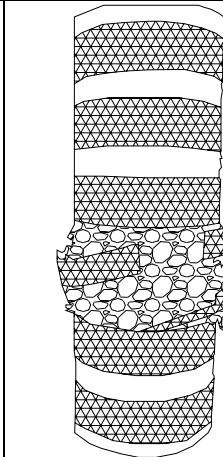
<b>5 camadas</b>				
	W60S6L5_a		W60S6L5_b	

Figura B 7.2 - Esquema do modo de rotura das séries W60S3Ln


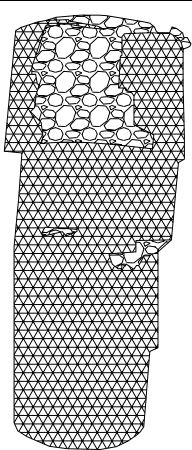

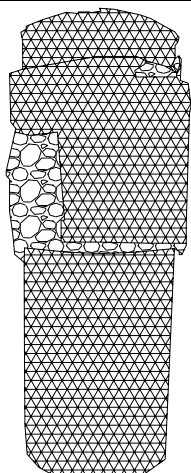

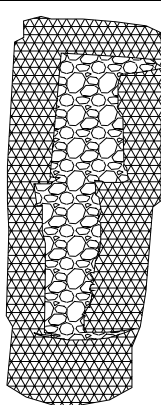

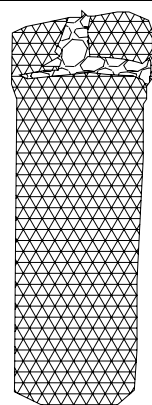
	Provete	Esquema	Provete	Esquema
<b>3 camadas</b>				
	W600S1L3_a		W600S1L3_b	
<b>5 camadas</b>				
	W600S1L5_a		W600S1L5_b	

Figura B 7.3 - Esquema do modo de rotura das séries W600S1Ln

**B.8 – Modo de rotura das séries de ensaios do grupo C32S200φ10**


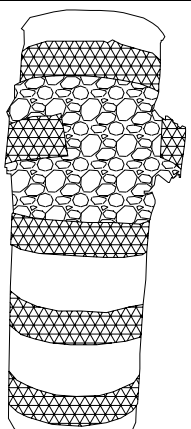

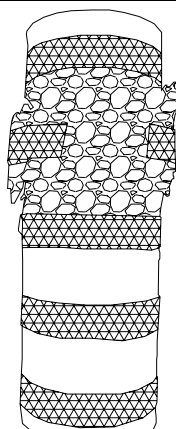

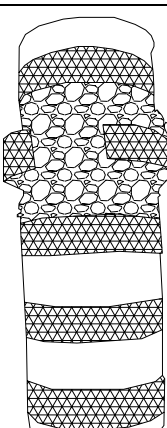

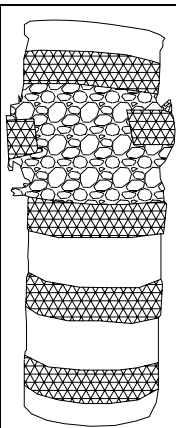

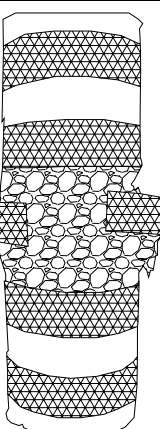

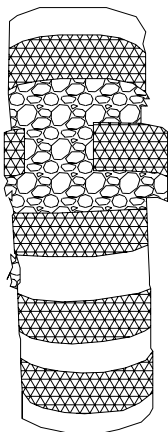

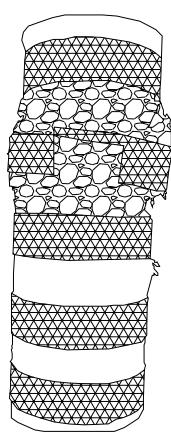

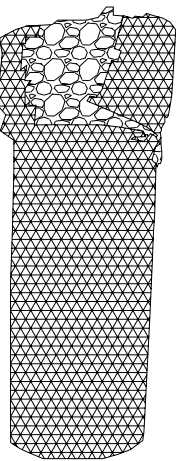

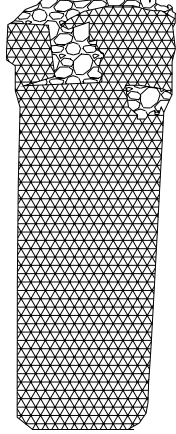

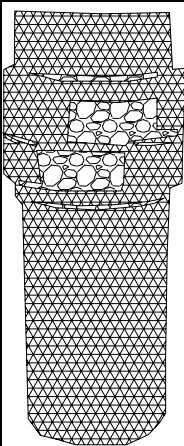

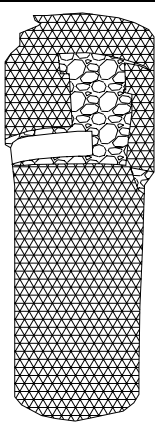
	Provete	Esquema	Provete	Esquema
<b>3 camadas</b>				
	W45S5L3_a		W45S5L3_b	
<b>5 camadas</b>				
	W45S5L5_a		W45S5L5_b	

Figura B 8.1 - Esquema do modo de rotura das séries W45S5Ln

	Provete	Esquema	Provete	Esquema
<b>3 camadas</b>				
	W60S5L3_a		W60S5L3_b	

5 camadas				
	W60S5L5_a		W60S5L5_b	
Figura B 8.2 - Esquema do modo de rotura das séries W60S5Ln				

	Provete	Esquema	Provete	Esquema
3 camadas				
	W600S1L3_a		W600S1L3_b	
5 camadas				
	W600S1L5_a		W600S1L5_b	
Figura B 8.3 - Esquema do modo de rotura das séries W600S1Ln				

**B. 9 – Modo de rotura das séries de ensaios do grupo C32S300φ8**


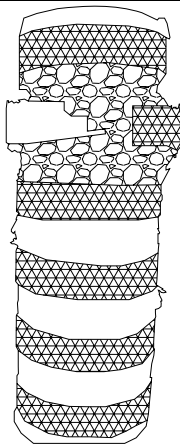

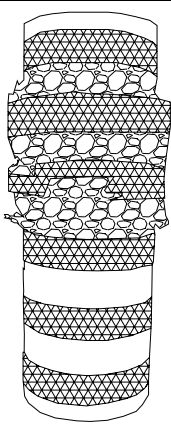

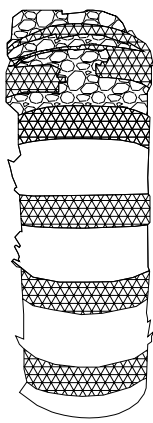

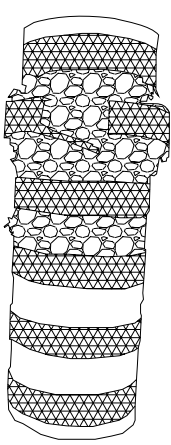

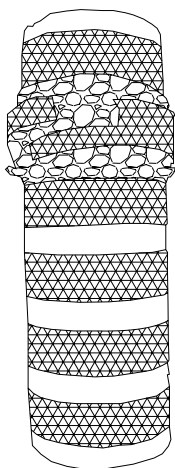

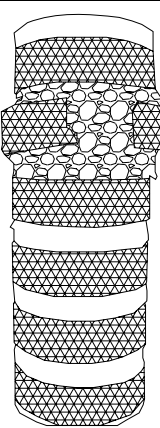

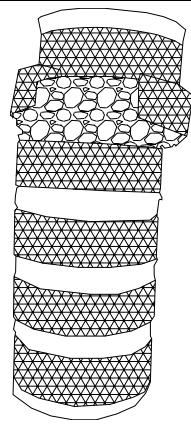

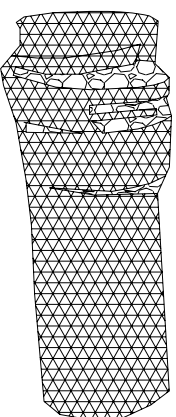

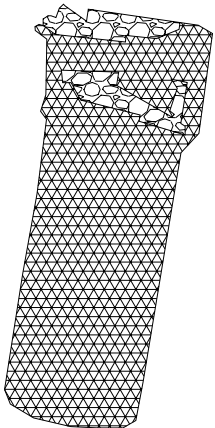

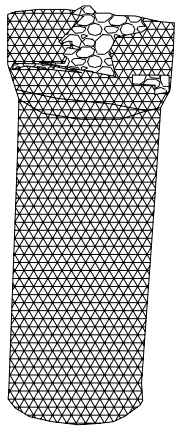

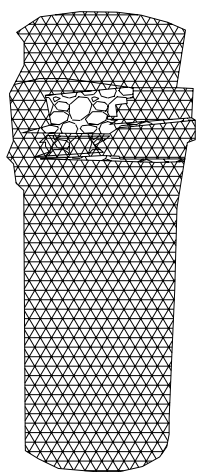
	Provete	Esquema	Provete	Esquema
<b>3 camadas</b>				
	W45S6L3_a		W45S6L3_b	
<b>5 camadas</b>				
	W45S6L5_a		W45S6L5_b	

Figura B. 9.1 - Esquema do modo de rotura das séries W45S6Ln

	Provete	Esquema	Provete	Esquema
<b>3 camadas</b>				
	W60S5L3_a		W60S5L3_b	

<b>5 camadas</b>				
	W60S5L5_a		W60S5L5_b	
Figura B. 9.2 - Esquema do modo de rotura das séries W60S3Ln				

	Provete	Esquema	Provete	Esquema
<b>3 camadas</b>				
	W600S1L3_a		W600S1L3_b	
<b>5 camadas</b>				
	W600S1L5_a		W600S1L5_b	
Figura B. 9.3 - Esquema do modo de rotura das séries W600S1Ln				

**B. 10 – Modo de rotura das séries de ensaios do grupo C32S300φ10**


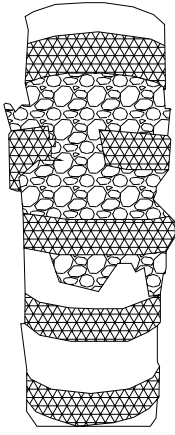

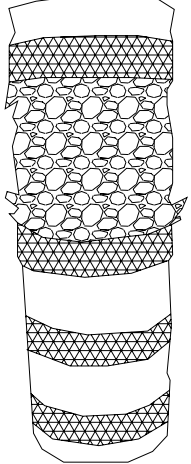

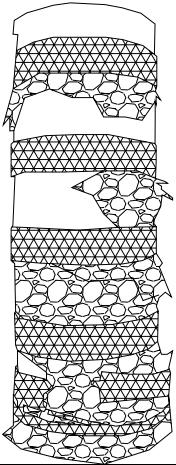

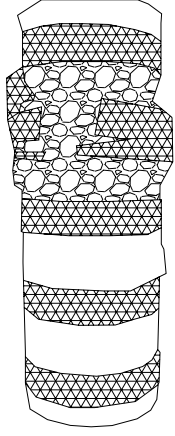

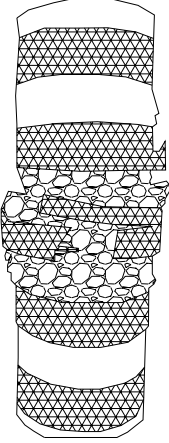

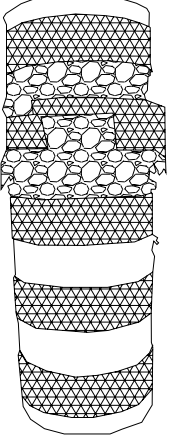

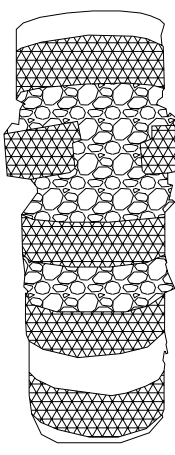

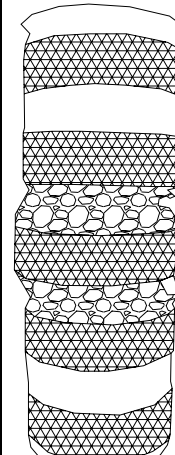

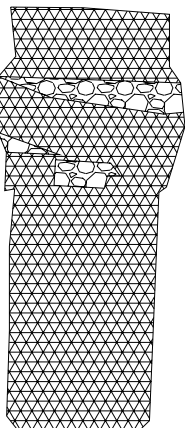

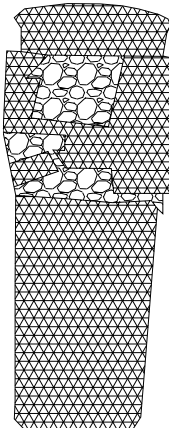

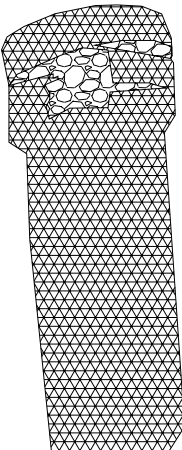

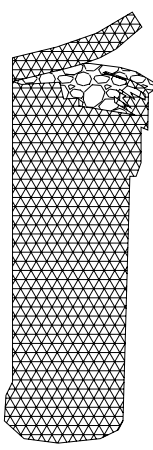
	Provete	Esquema	Provete	Esquema
<b>3 camadas</b>				
	W45S5L3_a		W45S5L3_b	
<b>5 camadas</b>				
	W45S5L5_a		W45S5L5_b	

Figura B. 10.1 - Esquema do modo de rotura das séries W45S5Ln

	Provete	Esquema	Provete	Esquema
<b>3 camadas</b>				
	W60S5L3_a		W60S5L3_b	

<b>5 camadas</b>				
	<b>W60S5L5_a</b>		<b>W60S5L5_b</b>	
Figura B. 10.2 - Esquema do modo de rotura das séries W60S5Ln				

	Provete	Esquema	Provete	Esquema
<b>3 camadas</b>				
	<b>W600S1L3_a</b>		<b>W600S1L3_b</b>	
<b>5 camadas</b>				
	<b>W600S1L5_a</b>		<b>W600S1L5_b</b>	
Figura B 10.3 - Esquema do modo de rotura das séries W600S1Ln				

**Anexo C**

---

**Extensões axiais obtidas nos extensômetros de fibra óptica**



Tabela C.0 – Provetes instrumentados com extensómetros de fibra óptica.

Tipo de série	Designação do provetes
C32S200φ10	W45S5L3 W60S5L5
C32S300φ8	W60S6L3_1 W60S6L3_2 W600S1L3 W600S1L5
C32S300φ10	W45S5L5 W60S5L3 W60S5L5 W600S1L3 W600S1L5

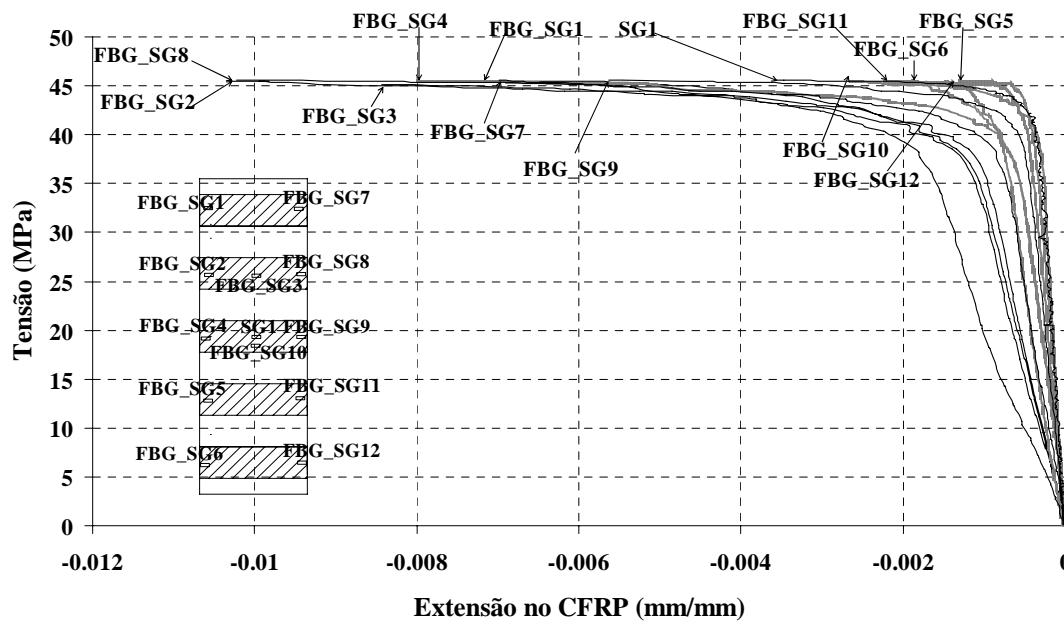


Figura C.1 - Provete W45S5L3 do grupo C32S200φ10

Tabela C.1 - Provete W45S5L3 do grupo C32S200φ10

Designação dos Strain Gauges	Extensão no CFRP (mm/mm)	Esquema do provete W45S5L3
SG1	0.0036	
FGB_SG1	0.0072	
FGB_SG2	0.0103	
FGB_SG3	0.0084	
FGB_SG4	0.0080	
FGB_SG5	0.0013	
FGB_SG6	0.0019	
FGB_SG7	0.0070	
FGB_SG8	0.0102	
FGB_SG9	0.0056	
FGB_SG10	0.0027	
FGB_SG11	0.0022	
FGB_SG12	0.0015	

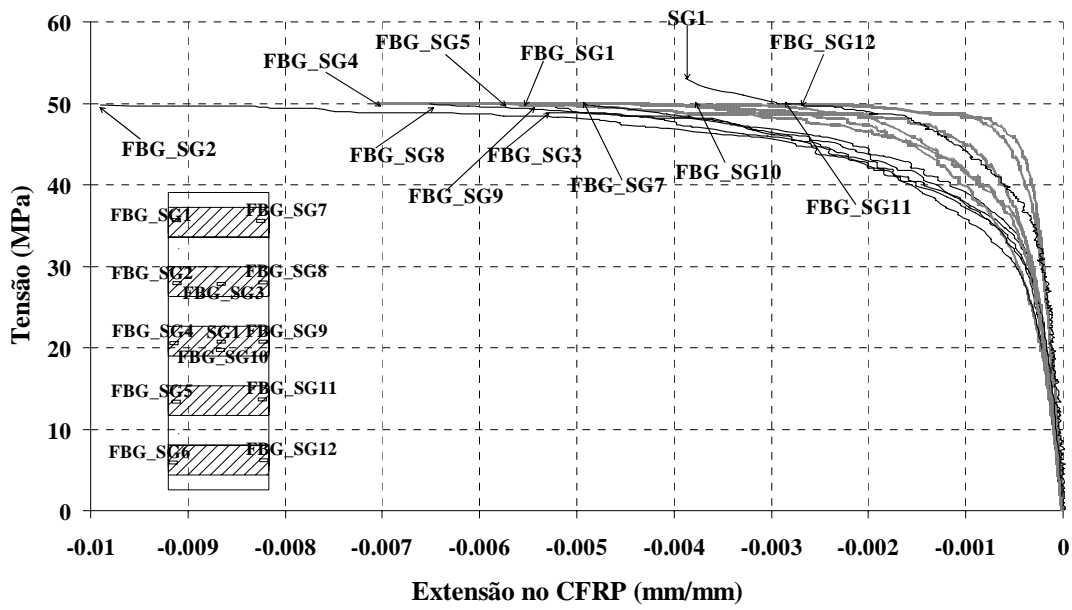


Figura C.2 - Provete W60S5L5 do grupo C32S200φ10.

Tabela C.2 - Provete W60S5L5 do grupo C32S200φ10

Designação dos Strain Gauges	Extensão no CFRP (mm/mm)	Esquema do provete W60S5L5
SG1	0.0039	
FGB_SG1	0.0056	
FGB_SG2	0.0099	
FGB_SG3	0.0053	
FGB_SG4	0.0071	
FGB_SG5	0.0056	
FGB_SG6	0.0051	
FGB_SG7	0.0050	
FGB_SG8	0.0065	
FGB_SG9	0.0055	
FGB_SG10	0.0038	
FGB_SG11	0.0028	
FGB_SG12	0.0027	

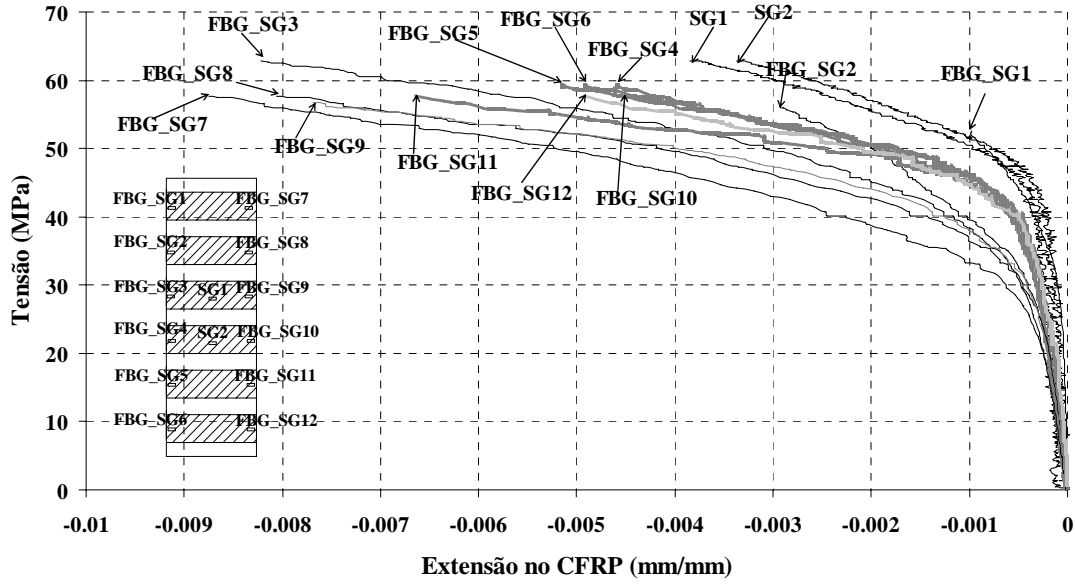
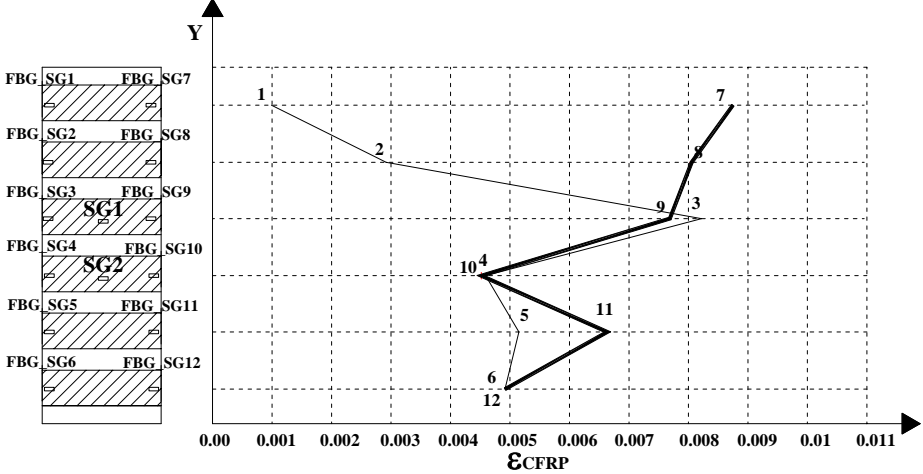


Figura C.3 - Provete W60S6L3\_1 do grupo C32S300φ8

Tabela C.3 - Provete W60S6L3\_1 do grupo C32S300φ8

Designação dos Strain Gauges	Extensão no CFRP (mm/mm)	Esquema do provete W60S6L3_1
SG1	0.00385	
SG2	0.00337	
FGB_SG1	0.00099	
FGB_SG2	0.00292	
FGB_SG3	0.00822	
FGB_SG4	0.00459	
FGB_SG5	0.00515	
FGB_SG6	0.00492	
FGB_SG7	0.00875	
FGB_SG8	0.00806	
FGB_SG9	0.00769	
FGB_SG10	0.00452	
FGB_SG11	0.00663	
FGB_SG12	0.00491	



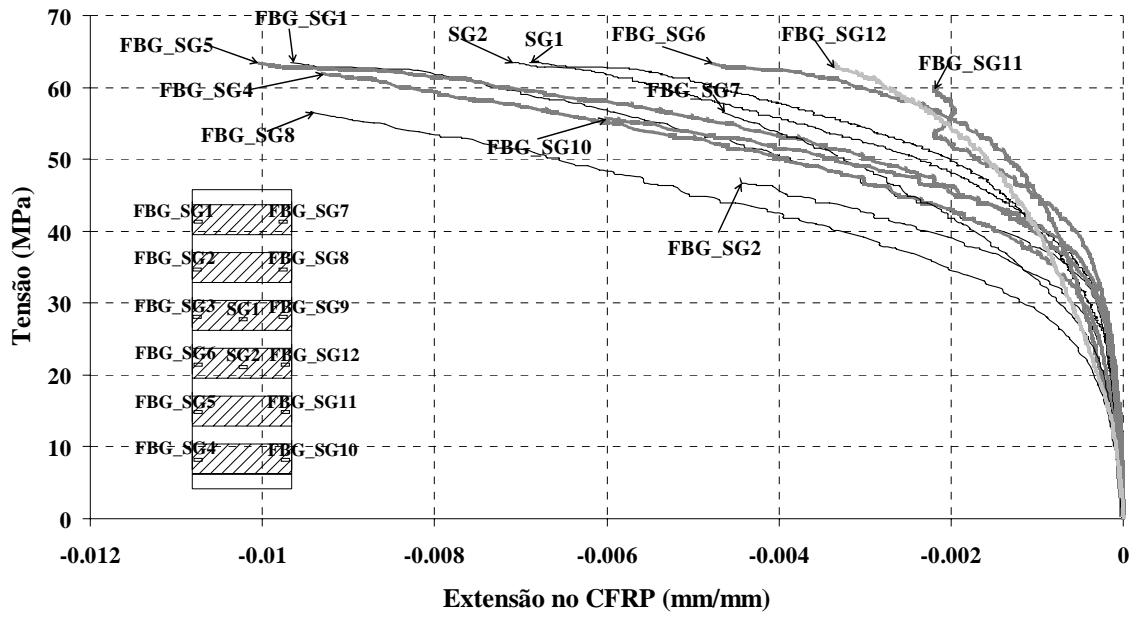
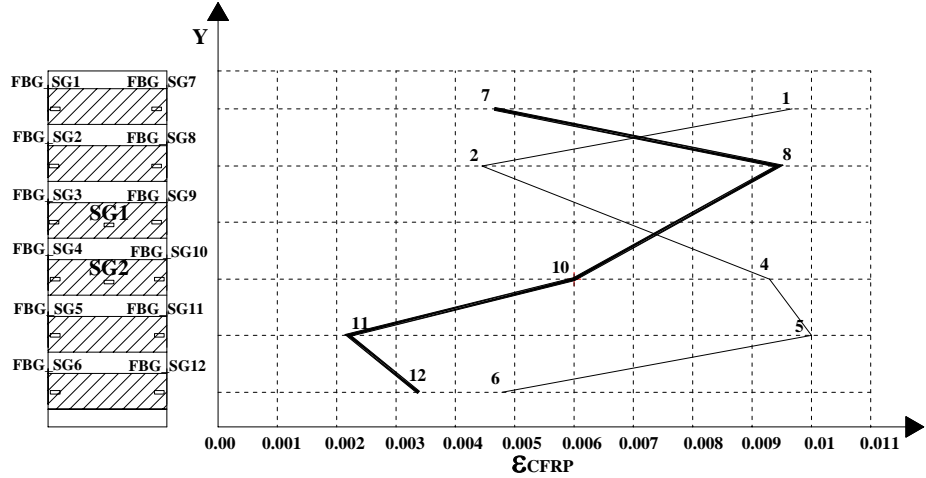


Figura C.4 - Provete W60S6L3\_2 do grupo C32S300φ8.

Tabela C.4 - Provete W60S6L3\_2 do grupo C32S300φ8.

Designação dos Strain Gauges	Extensão no CFRP (mm/mm)	Esquema do provete W60S6L3_2
SG1	0.00689	
SG2	0.00711	
FGB_SG1	0.00968	
FGB_SG2	0.00445	
FGB_SG3	-	
FGB_SG4	0.00929	
FGB_SG5	0.01004	
FGB_SG6	0.00478	
FGB_SG7	0.00466	
FGB_SG8	0.00945	
FGB_SG9	-	
FGB_SG10	0.00601	
FGB_SG11	0.00219	
FGB_SG12	0.00338	



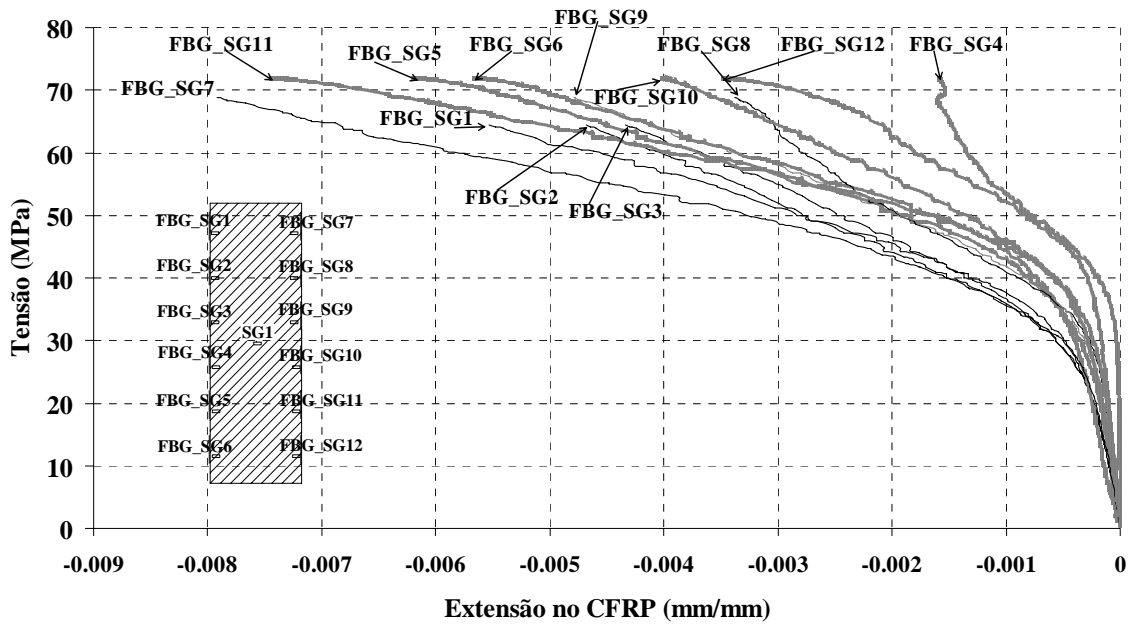
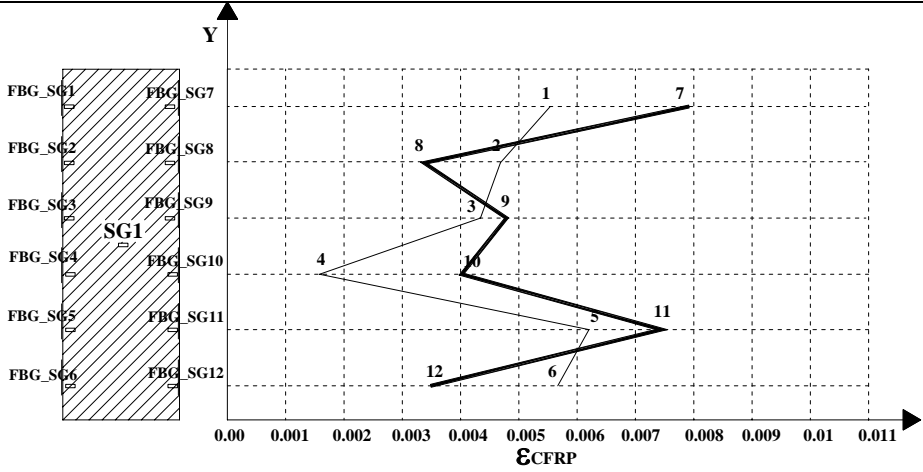


Figura C.5 - Provete W600S1L3 do grupo C32S300φ8.

Tabela C.5 - Provete W600S1L3 do grupo C32S300φ8.

Designação dos Strain Gauges	Extensão no CFRP (mm/mm)	Esquema do provete W600S1L3
FGB_SG1	0.00555	
FGB_SG2	0.00468	
FGB_SG3	0.00434	
FGB_SG4	0.00159	
FGB_SG5	0.00620	
FGB_SG6	0.00567	
FGB_SG7	0.00792	
FGB_SG8	0.00338	
FGB_SG9	0.00479	
FGB_SG10	0.00402	
FGB_SG11	0.00745	
FGB_SG12	0.00349	



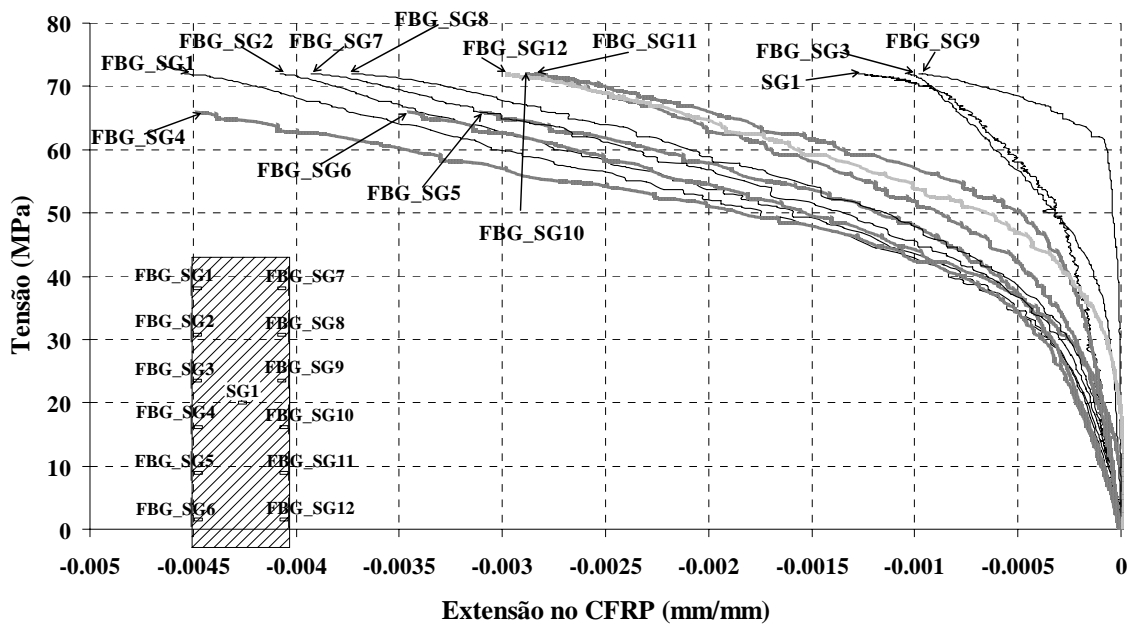


Figura C.6 - Provete W600S1L5 do grupo C32S300φ8.

Tabela C.6 - Provete W600S1L5 do grupo C32S300φ8.

Designação dos Strain Gauges	Extensão no CFRP (mm/mm)	Esquema do provete W600S1L5
SG1	0.00128	
FGB_SG1	0.00454	
FGB_SG2	0.00408	
FGB_SG3	0.00103	
FGB_SG4	0.00448	
FGB_SG5	0.00311	
FGB_SG6	0.00356	
FGB_SG7	0.00393	
FGB_SG8	0.00373	
FGB_SG9	0.00098	
FGB_SG10	0.00288	
FGB_SG11	0.00284	
FGB_SG12	0.00298	

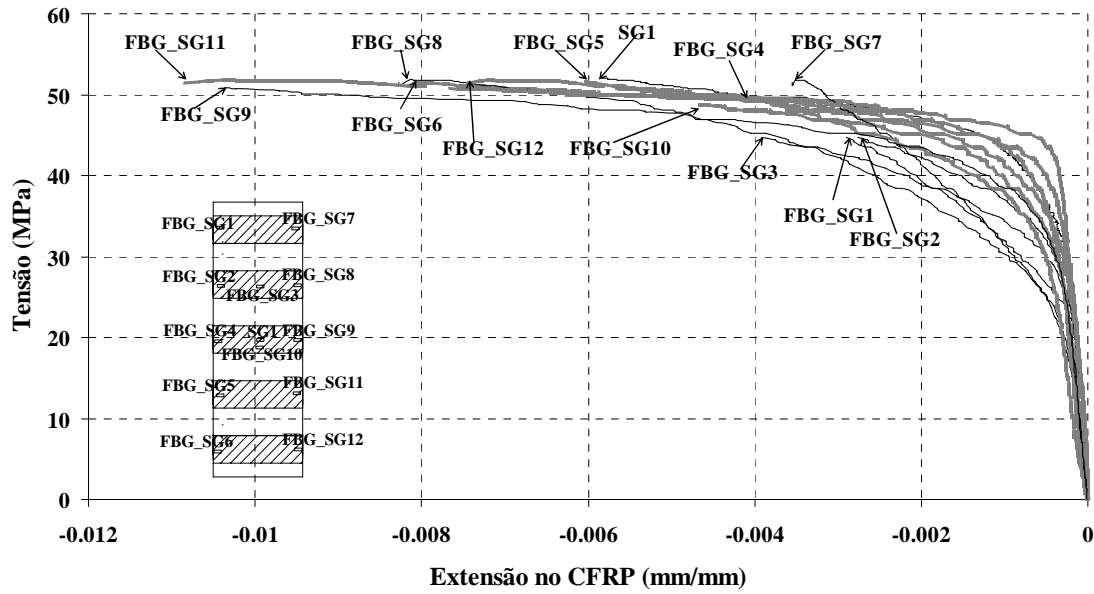


Figura C.7 - Provete W45S5L5 do grupo C32S300φ10

Tabela C.7 - Provete W45S5L5 do grupo C32S300φ10

Designação dos Strain Gauges	Extensão no CFRP (mm/mm)	Esquema do provete W45S5L5
SG1	0.00586	
FGB_SG1	0.00299	
FGB_SG2	0.00277	
FGB_SG3	0.00392	
FGB_SG4	0.00413	
FGB_SG5	0.00604	
FGB_SG6	0.00806	
FGB_SG7	0.00355	
FGB_SG8	0.00827	
FGB_SG9	0.01038	
FGB_SG10	0.00466	
FGB_SG11	0.01084	
FGB_SG12	0.00745	

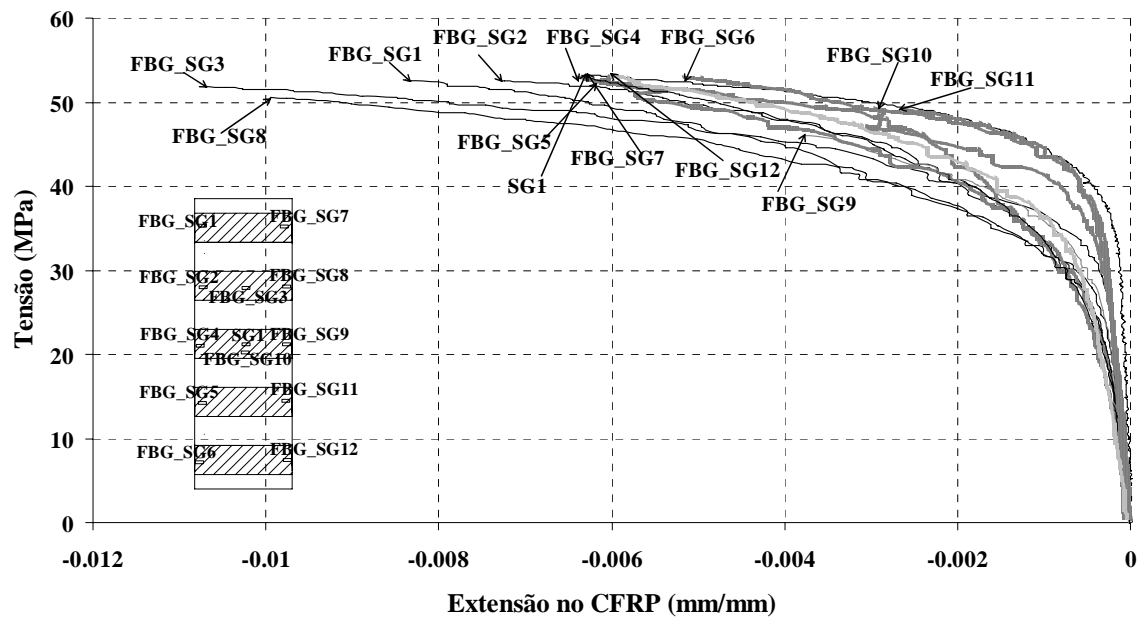


Figura C.8 - Provete W60S5L3 do grupo C32S300φ10

Tabela C.8 - Provete W60S5L3 do grupo C32S300φ10

Designação dos Strain Gauges	Extensão no CFRP (mm/mm)	Esquema do provete W60S5L3
SG1	0.00633	
FGB_SG1	0.00838	
FGB_SG2	0.00728	
FGB_SG3	0.01071	
FGB_SG4	0.00641	
FGB_SG5	0.00619	
FGB_SG6	0.00516	
FGB_SG7	0.00635	
FGB_SG8	0.00995	
FGB_SG9	0.00378	
FGB_SG10	0.00295	
FGB_SG11	0.00262	
FGB_SG12	0.00601	

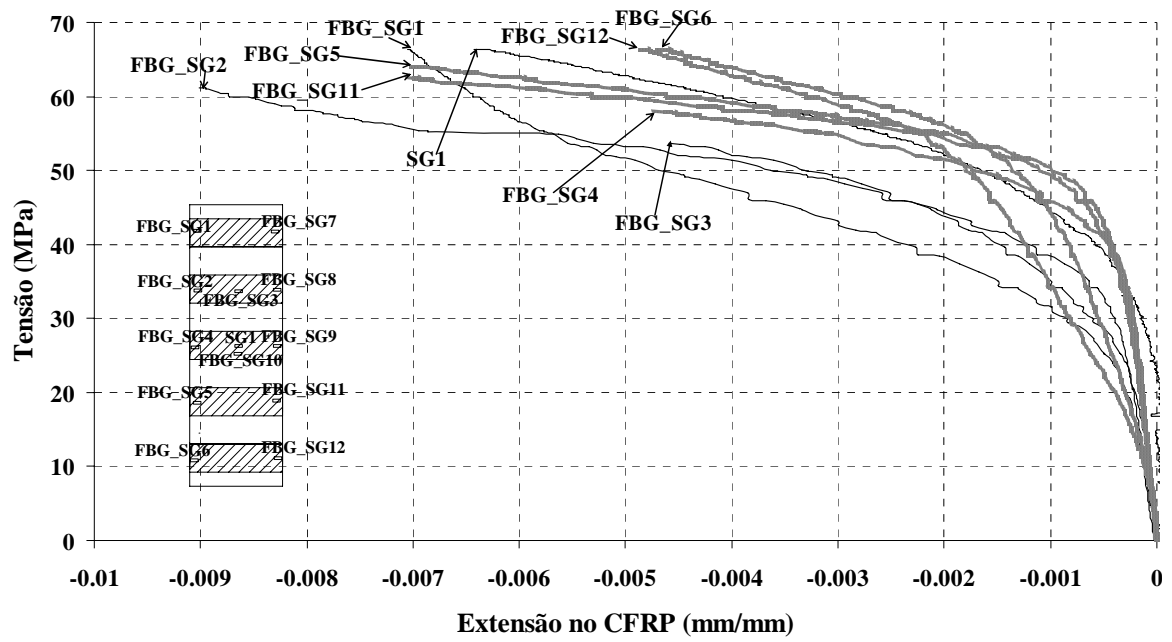


Figura C.9 - Provete W60S5L5 do grupo C32S300φ10

Tabela C.9 - Provete W60S5L5 do grupo C32S300φ10

Designação dos Strain Gauges	Extensão no CFRP (mm/mm)	Esquema do provete W60S5L5	
SG1	0.00642		
FGB_SG1	0.00705		
FGB_SG2	0.00901		
FGB_SG3	0.00459		
FGB_SG4	0.00474		
FGB_SG5	0.00703		
FGB_SG6	0.00471		
FGB_SG7	-		
FGB_SG8	-		
FGB_SG9	-		
FGB_SG10	-		
FGB_SG11	0.00707		
FGB_SG12	0.00486		

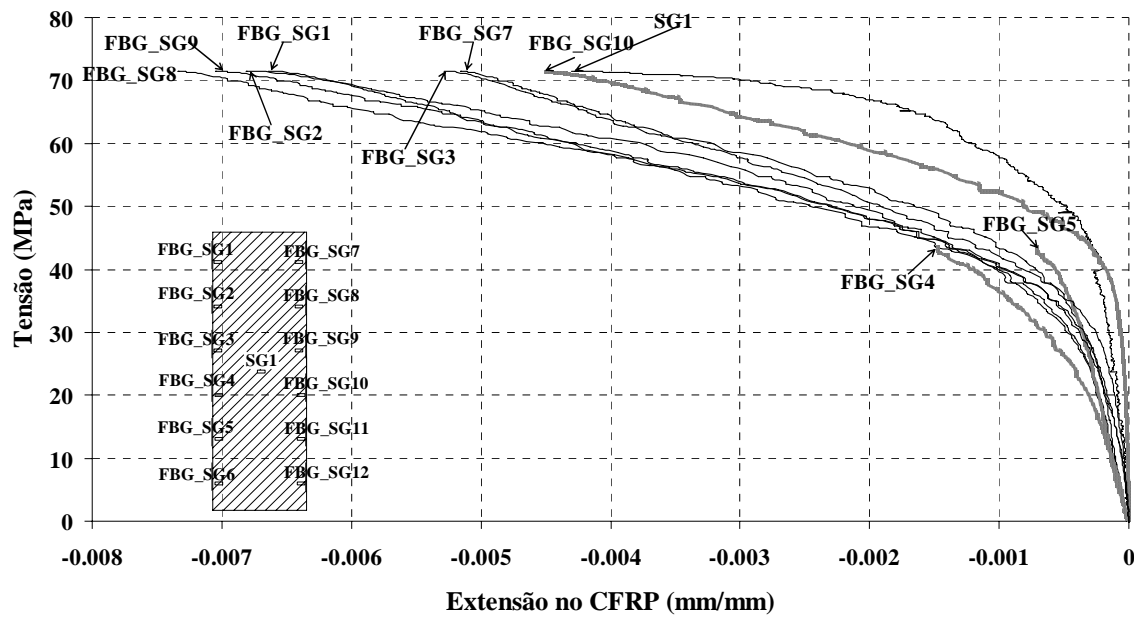


Figura C.10 - Provete W600S1L3 do grupo C32S300φ10

Tabela C.10 - Provete W600S1L3 do grupo C32S300φ10

Designação dos Strain Gauges	Extensão no CFRP (mm/mm)	Esquema do provete W600S1L3
SG1	0.00430	
FGB_SG1	0.00665	
FGB_SG2	0.00682	
FGB_SG3	0.00528	
FGB_SG4	0.00148	
FGB_SG5	0.000716	
FGB_SG6	-	
FGB_SG7	0.00516	
FGB_SG8	0.00734	
FGB_SG9	0.00705	
FGB_SG10	0.00451	
FGB_SG11		
FGB_SG12		

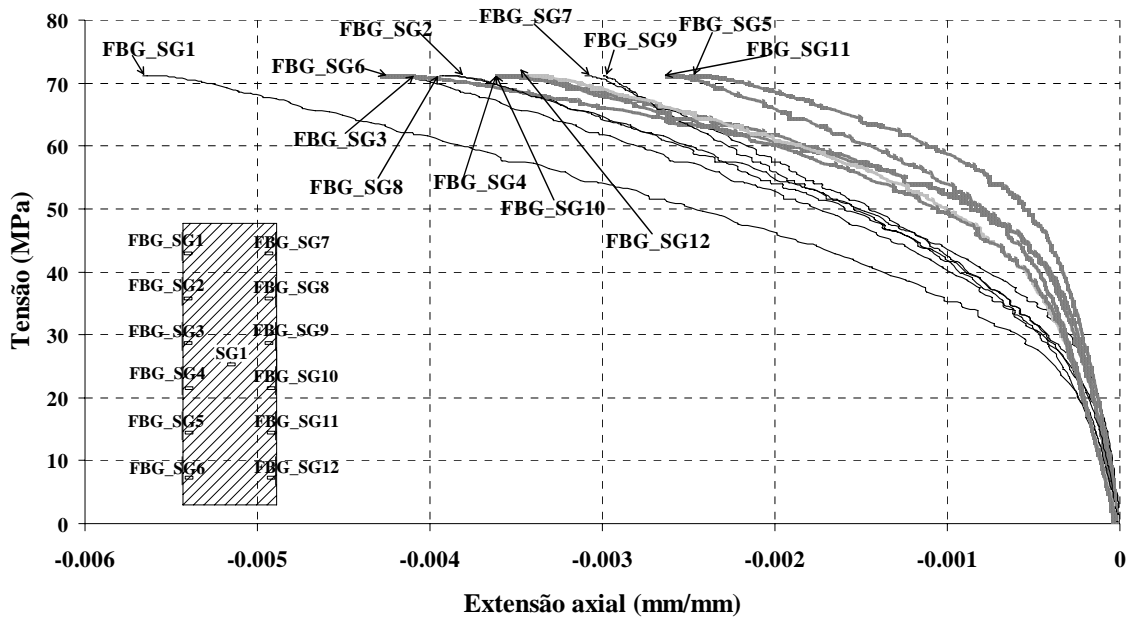
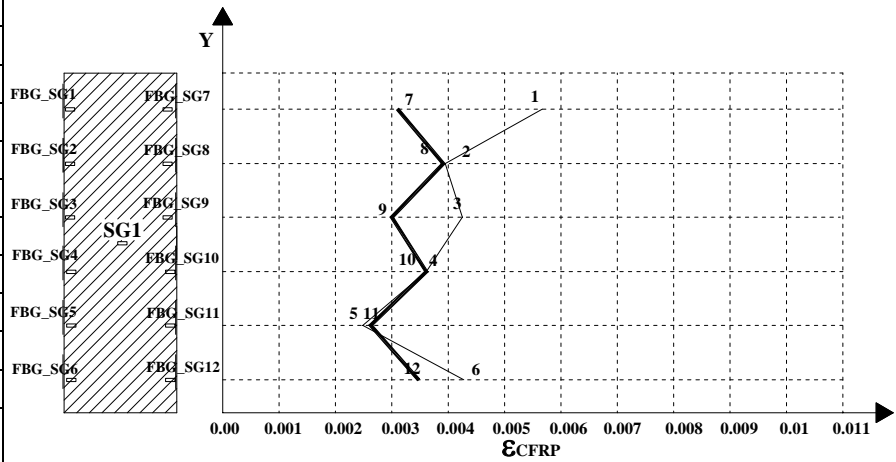


Figura C.11 - Provete W600S1L5 do grupo C32S300φ10

Tabela C.11 - Provete W600S1L5 do grupo C32S300φ10

Designação dos Strain Gauges	Extensão no CFRP (mm/mm)	Esquema do provete W600S1L5
FGB_SG1	0.00567	
FGB_SG2	0.00395	
FGB_SG3	0.00425	
FGB_SG4	0.00361	
FGB_SG5	0.00249	
FGB_SG6	0.00428	
FGB_SG7	0.00311	
FGB_SG8	0.00392	
FGB_SG9	0.00299	
FGB_SG10	0.00360	
FGB_SG11	0.00263	
FGB_SG12	0.00347	





## REFERÊNCIAS

---

Abautaha, R.S., Machado, R.I, (1999). “Seismic resistance of steel-tubed high strength reinforced-concrete columns”. *Journal of Structural Engineering*, Maio, vol. 125, pp. 485-494.

Campione, G., Miraglia, N., (2003). “Strength and strain capacities of concrete compression members reinforced with FRP”, *Journal Cement & Concrete Composites*, Elsevier, Vol.25, pp. 31-41.

Carrazedo, R. (2002). “Mecanismos de confinamento e suas implicações no reforço de pilares de concreto por encamisamento com compósito de fibras de carbono”, *tese de mestrado*, Universidade de São Paulo, Brasil, pp. 208.

CEB-FIB, model code. Structural Concrete (1999). Textbook on behaviour, design and performance, July vol.1.

Coffman, H. L., Marsh, M. L., Brown, C. B. (1993). “Seismic reinforced-concrete columns”. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Maio, vol. 119(5), pp.1643-1661.

Ferreira, L. A., Araújo, F. M., Maia, A. A., Alves, P.A. e Santos, J.L (2004). “Redes de bragg em fibra óptica – contribuições para o desenvolvimento de uma tecnologia revolucionária em monitorização estrutural”, *Encontro Nacional de Betão Estrutural*, FEUP, Porto.

Ferreira, Débora (2001). “Pilares de betão armado reforçados com laminados de fibras de carbono” *Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil*, Universidade do Minho, Janeiro, pp.226.

Ferreira, Débora e Barros, Joaquim (2004). “Confinamento por cintagem total e parcial de elementos de betão com mantas de fibras de carbono”, *relatório técnico*, Novembro, pp.165. (<http://www.civil.uminho.pt/composites>) .

Ferreira, Débora e Barros, Joaquim (2007). “Comportamento de elementos de pilar confinados com CFRP e submetidos a compressão monotónica”, *relatório técnico*, Março, pp. 294. (<http://www.civil.uminho.pt/composites>).

Gomes, A. M. (1992). “Comportamento e reforço de elementos de betão armado sujeitos a acções cíclicas.” *Dissertação submetida para a obtenção do grau de doutor em Engenharia Civil*, Universidade Técnica de Lisboa, Julho, pp. 331.

Green, M. F., Bisby, L.A., Fam, A. Z., Kodur, V. K.R., (2006). “FRP confined concrete columns: Behaviour under extreme conditions”, *Journal Cement & Concrete Composites*, Elsevier, vol.28, pp. 928-937.

Harajli, M. H., Hantouche, E., Soudki, K. (2006). “Stress-strain model for fiber-reinforced polymer jacketed concrete columns.” *ACI Structural Journal*, 105(5), pp. 672-682.

Harajli, M., (2006). “Axial stress-strain relationship for FRP confined circular and rectangular concrete columns”, *Journal Cement & Concrete Composites*, Elsevier, vol.28, pp. 938-948.

ISO TC 71/SC 6 N (2003). “ Non-convencional reinforcement of concrete-test methods-part 2: Fiber reinforced polymer (FRP) sheets”.

Juvandes, L. F. P, (1999).“Reforço e Reabilitação de Estruturas de Betão Usando Materiais Compósitos de CFRP”.*Dissertação para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil*, FEUP, Setembro.

Karbhari, V. M, Gao, Y., (1997). “Composites Jacketed concrete under uniaxial compression – verification of simple design equation”, *J. mater. Civ. Eng.*, vol. 9(4), pp.185-193.

Lam, L., Teng, J. G. (2003). “Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete.” *J. Construction and Building Materials*, Elsevier, vol. 17, pp. 471-489.

Lam, L. Teng, J. G., Cheung, C.H., Xiao, Y. (2006). “FRP-confined concrete under axial cyclic compression”, *J. Cement & concrete composites*, Elsevier, vol. 28, pp. 946 - 958.

Li, Y.F., Lin, C.T., Sung, Y. Y., (2003). “A constitutive model for concrete confined with carbon fiber reinforced plastic”, *J. Mechanics of materials*, Elsevier, vol. 35, pp. 603-619.

Lin, H.J, Liao, C.I. (2004). “Compressive strength of reinforced concrete column confined by composite material.” *J. Composite Structures*, Elsevier, Vol. 65, 239-250.

Lorenzis, L. (2001). “A comparative study of models on confinement of concrete cylinders with FRP composites”, *Chalmers University of Technology, division of building technology*, publication 01:04, Work n° 46, pp.81.

Mander, J. B., Priestley, M. J. N. e Park, R. (1988). “Theoretical stress-strain model for confined concrete.” *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 114(8), pp. 1804-1826

Mirmiran A., Shahawy, M. (1997). “Behavior of concrete columns confined by fiber composites” *J. Structural Engineering*, ASCE, 123(5), pp. 583-590.

Mirmiran A., Zagers, K., Yuan, W. (2000). “Nonlinear finite elements modelling of concrete confined by fiber composites”. *Finite elements in analysis and design*, vol. 35. pp. 79-96.

Meier, U., (1987). “*Development of the Composites Strip Bonding Techniques for the Post-Strengthening of Structures*”, EMPA, pp. 8.

Monti, G., (2003). “Seismic upgrade of reinforced concrete columns with FRP”, “*Seismic upgrade of reinforced concrete columns with FRP*”, Teheran, July, pp. 29.

Nanni, A et al., (1993). “*Fiber Reinforced Plastic (FRP) – Reinforcement for Concrete Structures: Properties and applications*”, Elsevier Science Publishers B.V., Vol.42, Amsterdam, pp. 450.

Nanni, A. Alkhrdaji, T., Chen, G., Barker, M., Yang, X. e Mayo, R. (1999). “Testing failure program for highway bridge strengthened with fiber reinforced polymer composites”, *Proc. 4<sup>th</sup> Int. Symposium in fiber reinforced polymer reinforcement for*

*reinforced concrete structures*, American Concrete institute, Farmington Hills, Mich., pp. 69-80.

NP – EN 10002-1 (1990). Materiais Metálicos – Ensaios de tracção. Versão Portuguesa da EN 10002-1. Instituto Português da Qualidade.

Pantazopoulou, S. J., (1998). “Detailing for reinforcement stability in RC members.” *Journal of Structural Engineering*, Junho, ASCE, 124(6), 623-632.

Parvin, A., Wang, W. (2002). “Concrete columns confined by fiber composites wraps under combined axial and cyclic lateral loads” *Journal of Composites Structures*, vol.58, pp. 539-549.

Pessiki, S., Harries, K.A., Kestner, J.T., Sause, R., and Ricles, J. M. (2001). “Axial behaviour of reinforced concrete columns confined with FRP jackets”, *J. of composites for construction*, ASCE, 5(4), 237- 245.

Priestley, M., J. N. Seible, F., Calvi, G. M. (1996). “Seismic design and retrofit of bridges”, *Wiley*, New York.

Prontuário (2004) - Catálogo de fichas técnicas da Sika, 6ª edição.

Publicação técnico/comercial da Degussa, Construction Chemicalsm, (2003).

Ramesh, K., Seshu, D. R., Prabhakar, M., (2003). “Constitutive behaviour of confined fiber reinforced concrete under axial compression” *J. Cement & concrete composites*, Elsevier, vol. 25, pp. 343-350.

REBAP. “Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado”, *Imprensa Nacional-Casa da Moeda*, 1983.

Rodrigues, C. C., Silva, M. G., (2001). “The behaviour of GFRP reinforced concrete columns under monotonic and cyclic axial compression”, *CCC2001, composites in construction*, FEUP, A.A.Balkema, pp. 245-250.

Rodrigues, C.M.C., (2005) – “Comportamento às acções cíclicas de pilares de betão armado reforçados com materiais compósitos”, *tese de doutoramento*, Universidade Nova de Lisboa, pp. 427.

Rodrigues, M. E., Botero, J.C., Villa, J., (1999). “Cyclic stress-strain behavior of reinforcing steel including effect of buckling”, *Journal of Structural Engineering*, Junho, vol. 125, pp. 605-612.

Saadatmanesh, H., Ehsani, M.,(1990). “*Fibre Composite Plates can Strengthen Beams*”, Março, pp. 65-71.

Saadatmanesh, H., Ehsani, M. R., Li, M.W., (1994). “Strength and ductility of concrete columns externally reinforced with fibre composites straps”, *ACI, Structural Journal*, vol.91 (4), pp. 434-447.

Saadatmanesh, H., Ehsani, M. R., Li, M.W., (1997). “Repair of earthquake-damaged RC columns with FRP wraps”, *ACI, Structural Journal*, vol.94 (2), pp. 206-215.

Saafi, M., Toutanji H.A. (1999). “Behavior of concrete columns confined with fiber reinforced polymer tubes”, *ACI Material Journal*, V. 96, nº 4, July-August, pp.500-509.

Samaan, M., Mirmiran, A., Shahawy, M. (1998). “Model of concrete confined by fiber composites.” *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 124(9), 1025-1031.

Seible, F., Priestley, N., Hegemier, G., Innamorato, D., (1997). “Seismic retrofit of RC Columns with continuous carbon fibre jackets”, *Journal of Composites for Construction*, Maio, Vol.1, nº2, pp. 52-62.

Spoelstra R. M., Monti, G., (1999). “FRP-confined concrete model”, *Journal of Composites for Construction*, August, Vol.3, nº3, pp. 143-153.

Susantha, K.A.S., Ge, H., Usami, T., (2001). “Uniaxial stress-strain relationship of concrete confined by various shaped steel tubes”, *Journal of Engineering Structures*, Elsevier, vol. 23, pp.1331-1347.

Toutanji, H. A. (1999). “Stress-strain characteristics of concrete columns externally confined with advanced fiber composites sheets.” *ACI Material Journal*, 96(3), 397-404.

Toutanji, H. A., Deng, Y. (2001). “Strength and durability performance of concrete axially loaded members confined with AFRP composites sheets.” *J. of Composites*, Elsevier, 255-261.

Triantafillou, T. C., Plevris, N., (1992). "Strengthening of RC Beams with Epoxy-bonded fiber-composites Materials", *Mat. And Struct.*, Vol. 25, pp. 201-211.

Triantafillou, T. C., Antonopoulos, C. P., (2000). "Design of concrete flexural members strengthened in shear with FRP", *Journal of Composites for Construction*, November, Vol.4, n°4, pp. 198-205.

Triantafillou, T. C.,(2003). *Strengthening of Reinforced Concrete Structures with Composite Materials*", Papatotiriou Bookstores.

Tsuno, K, Park, R. (2004). "Prediction method for seismic damage of reinforced concrete bridge columns", *J. Struct. Mech. Earthquake Eng. JSCE*, vol. 766. pp.97-111.

Ulusay, R. ,Aydan, O., Hamada, M., (2002). "The Behaviour of structures built on active fault zones: examples from the recent earthquakes of turkey", *J. Struct. Mech. Earthquake Eng. JSCE*, vol. 19. pp.149-167.

Untiveros, C.M.A., (2002). "Estudio experimental del comportamiento del hormigón confinado sometido a compresión", *Tesis doctoral*, Barcelona, septiembre de.

Watson, S., Zahn, F. Park, (1994). "Confining reinforcement for concrete columns", *Journal of Structural Engineering*, vol.120, pp. 1798-1824.

Xiao, Y., Wu, H. (2000). "Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets." *Journal of Material in Civil Engineering*, ASCE, 125(3), 255-264.

Ye, L.P., Zang, S. H., Feng, P., (2003). "Experimental study on seismic strengthening of RC columns with wrapped CFRP sheets", *J. Construction and Building Materials*, Elsevier, vol. 17, pp. 499-506.

Zangelmi, E. J., (1999). "Caracterización del comportamiento de hormigones de altas prestaciones con y sin fibras metálicas a compresión uniaxial", *Tesis doctoral*, Barcelona.