

# **Confinamento por cintagem total e parcial de elementos de betão com mantas de fibras de carbono**

Débora Ferreira e Joaquim Barros

Report 04-DEC/E-29

Date: Novembro of 2004

N. of pages: 165

Keywords: Confinamento total, Confinamento parcial, CFRP



Universidade do Minho

*Escola de Engenharia*

*Departamento de Engenharia Civil*



Instituto Politécnico de Bragança

*Escola Superior de Tecnologia e Gestão*

<b>Índice</b>	<b>pág.</b>
1 INTRODUÇÃO.....	5
2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E TÉCNICAS DE CONFINAMENTO.....	7
2.1 Betão.....	7
2.2 Manta de CFRP.....	7
2.2.1 Ensaios experimentais das mantas de CFRP.....	8
2.3 Técnicas de confinamento.....	11
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL E INSTRUMENTAÇÃO.....	13
3.1 Sistema de confinamento e séries de ensaios.....	13
3.2 Equipamento e procedimento de ensaio.....	17
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	20
4.1 Introdução.....	20
4.2 Séries de ensaios do grupo C23S300.....	23
4.2.1 Modos de rotura.....	23
4.2.2 Síntese dos resultados mais relevantes e curvas tensão-extensão.....	28
4.2.3 Curvas $\sigma_c/f_{co}$ versus $\epsilon_c/\epsilon_{co}$ .....	35
4.2.4 Relação entre $\sigma_c/f_{co}$ versus percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ).....	39
4.2.5 Relação entre a variação de energia ( $\Delta U/U_c$ ) versus percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ).....	41
4.2.6 Gráficos $\sigma/\sigma_{conf,L3,5}$ versus $\rho/\rho_{conf,L3,5}$ .....	46
4.2.7 Índice de rentabilidade.....	49
4.3 Séries de ensaios do grupo C23S200.....	54
4.3.1 Modos de rotura.....	54
4.3.2 Síntese dos resultados mais relevantes e curvas tensão-extensão.....	56
4.3.3 Curvas $\sigma_c/f_{co}$ versus $\epsilon_c/\epsilon_{co}$ .....	58
4.3.4 Relação entre $\sigma_c/f_{co}$ versus percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ).....	59
4.3.5 Relação entre a variação de energia ( $\Delta U/U_c$ ) versus percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ).....	61
4.3.6 Gráficos $\sigma_c/\sigma_{c,L3,5}$ versus $\rho_f/\rho_{f,L3,5}$ .....	62
4.3.7 Índice de rentabilidade.....	65

4.4	Séries de ensaios do grupo C16S200.....	68
4.4.1	Modos de rotura.....	68
4.4.2	Síntese dos resultados mais relevantes e curvas tensão-extensão.....	69
4.4.3	Curvas $\sigma_c/f_{co}$ versus $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$ .....	72
4.4.4	Relação entre $\sigma_c/f_{co}$ versus percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ).....	73
4.4.5	Relação entre a variação de energia ( $\Delta U/U_c$ ) versus percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ).....	76
4.4.6	Gráficos $\sigma_c/\sigma_{c,L3,5}$ versus $\rho_f/\rho_{f,L3,5}$ .....	78
4.4.7	Índice de rentabilidade, IR.....	81
4.5	Séries de ensaios do grupo C16S300.....	85
4.5.1	Modos de rotura.....	85
4.5.2	Síntese dos resultados mais relevantes e curvas tensão-extensão.....	86
4.5.3	Curvas $\sigma_c/f_{co}$ versus $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$ .....	89
4.5.4	Relação entre $\sigma_c/f_c$ versus percentagem de reforço ( $\rho_f$ ).....	90
4.5.5	Relação entre a variação de energia ( $\Delta U/U_c$ ) versus percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ).....	94
4.5.6	Gráficos $\sigma/\sigma_{conf,L3,L5}$ versus $\rho/\rho_{conf,L3,L5}$ .....	97
4.5.7	Índice de rentabilidade.....	107
4.6	Influência do tipo de betão na eficácia do confinamento.....	110
4.6.1	Séries confinadas com manta CF130 S&P 240 de 300 g/m <sup>2</sup> .....	110
4.6.2	Séries confinadas com manta CF120 S&P 240 de 200 g/m <sup>2</sup> .....	119
4.7	Influência do tipo de manta na eficácia do confinamento.....	124
4.7.1	Séries com betão de 23 MPa.....	125
4.7.2	Séries com betão de 16 MPa.....	119
5	CONCLUSÕES.....	137
	REFERÊNCIAS.....	142
	ANEXO A – GRÁFICOS ROTAÇÃO VERSUS EXTENSÃO AXIAL.....	144
	ANEXO B – PADRÃO DE FISSURAÇÃO.....	150

### Lista de anotações

BS	betão simples
CFRP	materiais de matriz polimérica reforçados com fibras de carbono.
E	espessura efectiva da manta
$E_{FRP}$	Módulo de elasticidade do FRP
Ext	extensómetro
$f_{cc}$	resistência à compressão dos provetes confinados
$f_{co}$	resistência à compressão dos provetes não confinados
$f_{cm}$	resistência média à compressão dos provetes não confinados
FRP	Fiber reinforcement plastic
IR	Índice de rentabilidade
L	número de camadas por faixa
LVDT	transdutor de deslocamento “Linear variable differential transformer”
S	número de faixas ao longo do provete
t	espaço livre entre faixas de fibra de carbono
W	largura das faixas de fibra de carbono
$U_c$	energia dissipada na deformação dos provetes não confinados
$\Delta U$	incremento de energia proporcionada pelo confinamento
$\rho_f$	percentagem de confinamento
$\sigma$	resistência à compressão dos provetes confinados
$\sigma_{FRP}$	Tensão efectiva do reforço transversal (FRP)
$\sigma_{max}$	resistência média à compressão dos provetes confinados
$\epsilon_c$	extensão axial no betão
$\epsilon_{cc}$	extensão axial do provete confinado correspondente a $f_{cc}$
$\epsilon_{co}$	extensão axial do provete não confinado
$\epsilon_{cm}$	extensão axial média do provete correspondente a $f_{cm}$
$\epsilon_{cmax}$	extensão axial do provete correspondente a $\sigma_{max}$
$\epsilon_{fmax}$	extensão máxima no CFRP
$\epsilon_{fu}$	extensão última de rotura no CFRP
$\epsilon_{fl}$	extensão no CFRP correspondente à menor extensão axial final
$\epsilon_{fl,r}$	extensão de referência no CFRP correspondente à menor extensão axial final.

## 1 INTRODUÇÃO

As construções em betão armado têm um período longo de vida e devem oferecer boa funcionalidade e segurança aos seus utentes durante a vida útil requerida pelo projecto. Contudo, na construção civil surgem situações que exigem intervenção de reforço estrutural, tais como: acções superiores às adoptadas em fase de projecto; a alteração da funcionalidade e da configuração geométrica da estrutura; deterioração das propriedades do betão armado; acções sísmicas não consideradas na fase do projecto.

De entre os elementos estruturais, os pilares são os que requerem maior cuidado. Os danos provocados por acções sísmicas têm revelado que a deficiente ductilidade dos elementos de pilar é uma das causas subjacentes ao colapso das estruturas que integram Xiao et al. [1999]. A ductilidade de elementos de betão pode ser aumentada por intermédio da aplicação de sistemas de reforço que elevem o grau de confinamento do betão Seible et al. [1997], Mirmiran e Shahawy [1997], Saatcioglu et al. [1999], Xiao e Wu [2000]. As chapas de aço, como material de reforço, têm vindo a ser substituídas por materiais poliméricos reforçados com fibras [FRP- fiber reinforced polymer].

O confinamento é geralmente aplicado a estruturas sujeitas a esforços predominantes de compressão, com o objectivo de melhorar a sua capacidade de carga e aumentar a sua ductilidade. A utilização de materiais compósitos no confinamento de elementos de betão é recente. Para tal têm contribuído vários trabalhos de investigação Saadamanesh et al. [1994], Nanni e Bradford, [1995], Seible et al. [1997], Saafi et al. [1999], Cole et al. [2001].

A Figura 1.1 mostra um gráfico tensão-deformação de provetes não confinados e provetes com distintos níveis de confinamento. Da análise deste gráfico verifica-se que o troço inicial, fase elástica, é semelhante para provetes confinados e provetes não confinados, dado que para níveis de tensão inferiores à de resistência à compressão do betão não confinado, o betão sofre pequenas deformações, não activando eficazmente o material de reforço. Segue-se uma fase em que o betão entra num processo de microfendilhação, tendo sido classificada por fase de transição. A terceira fase, denominada de plástica, ocorre pouco depois da tensão máxima ter sido atingida. Se o confinamento for efectivo, isto é, se houver acréscimo de carga por incremento de extensão, ocorrem grandes deformações e expansão radial significativa durante a fase

plástica, sendo o confinamento tanto mais efectivo quanto maior for a tendência para essa expansibilidade. A expansibilidade do betão e a rigidez do confinamento são responsáveis pela inclinação assumida durante a fase plástica. O betão bem confinado apresenta uma fase plástica com inclinação positiva e desenvolvimento aproximadamente linear, indicando que o confinamento é suficiente para conter o efeito da deterioração do betão. Neste caso a capacidade de carga do elemento aumenta. No betão mal confinado, a tensão máxima atingida é similar à do betão não confinado, indicando que, para grandes deformações, o confinamento não é suficiente para poder impedir a degradação do betão.

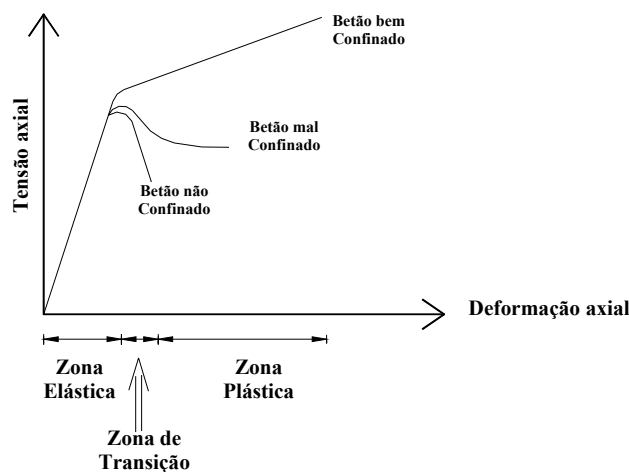


Figura 1.1 – Diagrama tensão-deformação para betão confinado com FRP.

Apesar do êxito alcançado pela aplicação de sistemas de confinamento com mantas de FRP em modelos laboratoriais, protótipos e aplicações in situ, a investigação sobre os mecanismos de interacção entre estes sistemas e o betão é ainda limitada. Resultados disponíveis para a elaboração de modelos de análise e de dimensionamento são também escassos Picher et al. [1996], Mirmiran e Shahawy [1997].

O presente trabalho pretende dar um contributo para o aumento do conhecimento nesta área. Para tal, foram efectuadas séries de ensaios de compressão uniaxial com provetes cilíndricos cintados com diferentes arranjos de faixas de manta de fibras de carbono (CFRP). Foi analisada a influência da largura destas faixas, do seu número ao longo da altura do provete e do número de camadas por faixa, no comportamento à compressão uniaxial de provetes de betão. Estes parâmetros foram estudados em provetes de baixa e moderada resistência à compressão, cintados com mantas do tipo CF120 S&P 240 (200 gm/m<sup>2</sup>) e CF130 S&P 240 (300 gm/m<sup>2</sup>) e com espessuras iguais a 0.117 mm e 0.176 mm, respectivamente.

## 2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E TÉCNICAS DE CONFINAMENTO

### 2.1 Betão

A Tabela 2.1 inclui a composição dos betões utilizados na fabricação dos provetes ensaiados, bem como a correspondente resistência média à compressão aos 28 dias em provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura,  $f_{cm}$ .

Tabela 2.1 – Composição do betão dos provetes cilíndricos ( $\text{kg/m}^3$ )

Referência	Cimento Secil 32.5 II	Brita Grossa	Brita média	Areia	Água	$f_{cm}$ (Mpa)
C16	280	727.7	420.6	769.3	126	16
C23	350	725.9	438.2	694.6	156	23

### 2.2 Manta de CFRP

Neste trabalho foram utilizados dois tipos de manta flexíveis de fibras de carbono curadas “in situ”, uma designada comercialmente por CF130 S&P 240 com 300 gramas de fibra por  $\text{m}^2$  de manta, com 0.176 mm de espessura efectiva, e outra com referência CF120 S&P 240 de 200 gramas de fibra por  $\text{m}^2$  de manta, com 0.117 mm de espessura efectiva. Segundo o distribuidor *degussa*, ambas as mantas têm 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 0.3 m de largura (Figura 2.1).

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

O saturante aplicado era constituído por uma resina epóxi de alto conteúdo de sólidos e de fácil aplicação para aderência e colocação de mantas à base de fibras de carbono (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 epoxy

### 2.2.1 Ensaio experimentais das mantas de CFRP

Os dois tipos de mantas de fibra de carbono aplicadas no confinamento dos provetes foram cedidos pela empresa S&P. Estas mantas foram fornecidas em rolos e têm uma secção de 300 mm altura por 0.176 mm de espessura efectiva, no caso da manta CF130 S&P 240 com 300 gramas de fibra por m<sup>2</sup> de manta, e 0.117 mm de espessura efectiva no caso da manta CF120 S&P 240 de 200 gramas de fibra por m<sup>2</sup> de manta.

Os valores das propriedades da manta de CFRP foram determinadas segundo as recomendações da norma ISSO TC 71/SC 6 N. O esquema do provete está representado na Figura 2.4. Os ensaios de tracção uniaxial foram realizados numa prensa servocontrolada da marca INSTRON, modelo 4485, no Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Bragança (ver Figura 2.5). A prensa é formada por uma célula de carga com capacidade de 200 kN e uma 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 e com 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 extensómetro eléctrico aplicado.

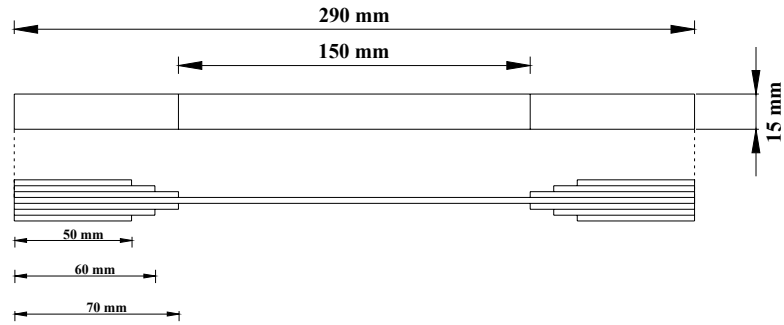


Figura 2.4 – Esquema dos provetes de CFRP ensaiados a tracção uniaxial.



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

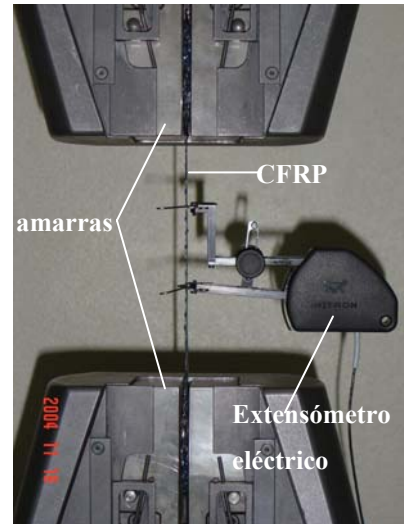


Figura 2.6 – Ensaio de tracção em provetes de manta de CFRP.

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

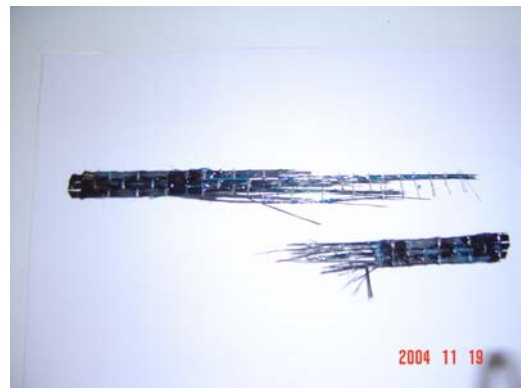


Figura 2.7 – Aspecto do provete de CFRP após ter sido ensaiado.

Na Tabela 2.2 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de tracção uniaxial. Os valores representam a média de 5 provetes por cada tipo de manta. Na

Tabela 2.3 apresentam-se os valores fornecidos pelo distribuidor *degussa*.

O módulo de elasticidade indicado na Tabela 2.2 foi calculado por intermédio da equação 2.1, tendo-se seguido as recomendações da ISSO TC 71/SC 6N. 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 g/cm<sup>3</sup>). A espessura determinada apenas foi aplicada no cálculo do módulo de elasticidade, em todos os outros cálculos em que foi necessário entrar com o seu valor foi considerada a espessura fornecida pelos catálogos do distribuidor, *degussa*.

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

onde

$E_f$  : módulo de elasticidade;

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

$\Delta \varepsilon$  : incremento de extensão correspondente a tensão medida a 20% e 60% da capacidade de carga

$A$  : secção transversal do provete ensaiado

Tabela 2.2 – 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 à tensão máxima (%)	Módulo de elasticidade (Gpa)
CF 120 (S&P) 240	0.119	2182	1.09	199
CF 130 (S&P) 240	0.122	3248	1.57	206

Tabela 2.3 – Propriedades da manta de CFRP segundo as fichas técnicas do distribuidor, *degussa*

Tipo de manta	Espessura da manta (mm)	Tensão máxima (Mpa)	Extensão à tensão 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 apresentaram dois tramos com inclinação distinta. No primeiro tramo o deslocamento foi medido através de um Clip gauge (extensómetro externo) e no segundo tramo 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.

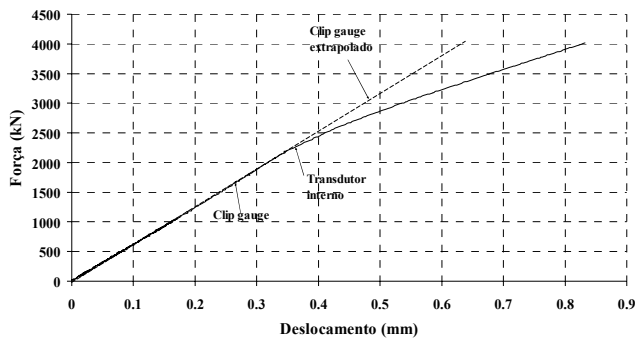


Figura 2.8 – Gráfico força versus deslocamento para a manta CF 120 (S&P) 240.

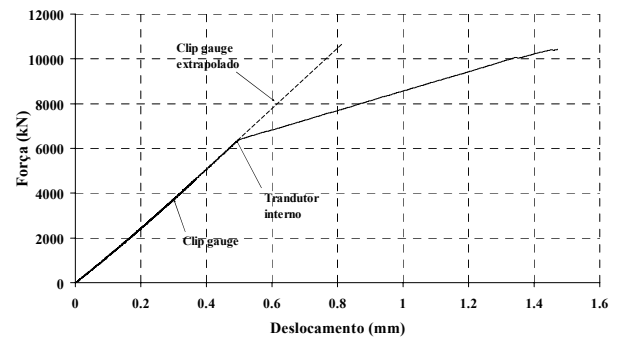


Figura 2.9 – Gráfico força versus deslocamento para a manta CF 130 (S&P) 240.

### 2.3 Técnicas de confinamento

A técnica de confinamento é dividida em várias fases. A primeira fase é de preparação da superfície do provete, que consiste em esmerilar o provete (Figura 2.10) nas zonas onde as faixas de manta vão ser aplicadas, por forma a retirar uma fina camada de goma de cimento. De seguida, os provetes são limpos com jactos de ar comprimido de forma a retirar as poeiras que se possam ter depositado. A segunda fase consiste na aplicação do primário (Figura 2.11). O primário é 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 epóxi, 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 (Figura 2.12). A faixa de manta (Figura 2.13) previamente colocada sobre uma superfície lisa e plana, foi saturada com epóxi e aplicada de seguida na zona pré-preparada do provete. Na aplicação da faixa, esta foi pressionada com um rolo por forma a tentar evitar-se a formação de bolhas na ligação e garantir-se uma camada de epóxi o mais uniforme possível (Figura 2.14). 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 epóxi na camada de CFRP já colocada. Sobre a última camada de manta de carbono é aplicada resina epóxi.

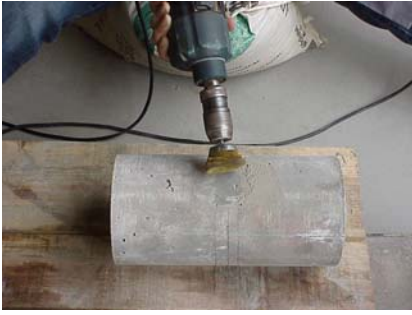


Figura 2.10 – Esmerilar o provete.



Figura 2.11 – Aplicação do primário.



Figura 2.12 – Aplicação da resina.



Figura 2.13 – Aplicação da resina nas faixas de manta.



Figura 2.14 – aplicação da faixa de manta.

As faixas de manta de carbono tinham um comprimento total igual ao perímetro do cilindro mais o comprimento de entrega. As faixas foram colocadas por forma a que os comprimentos de entrega fossem desencontrados (Figura 2.15) e assim garantir, o mais possível, condições similares de entrega nos distintos arranjos analisados.

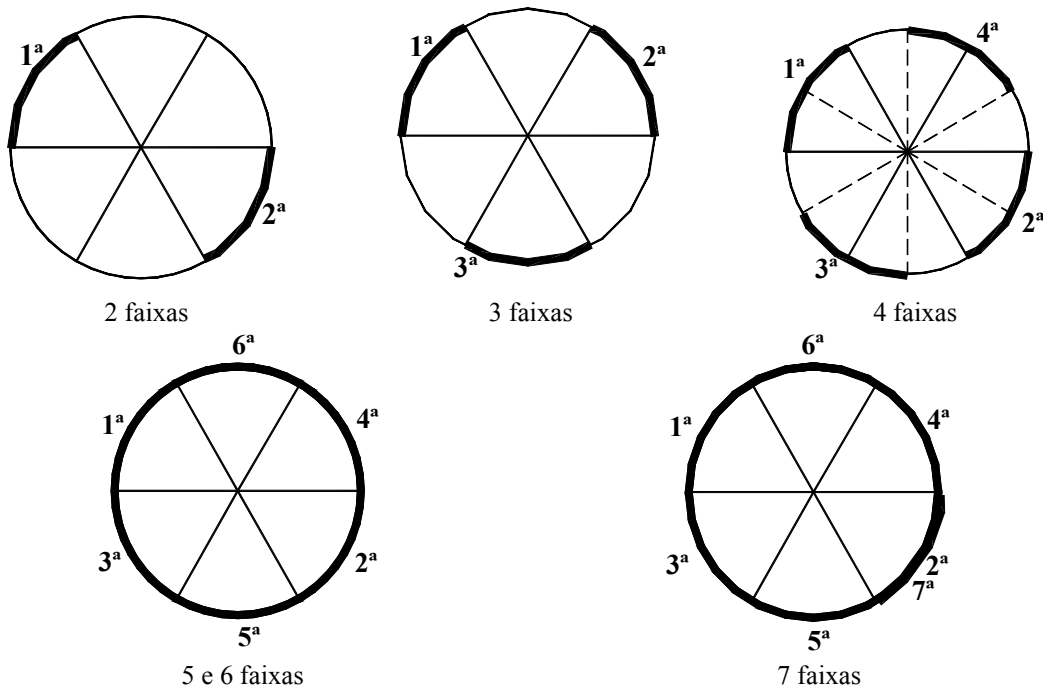


Figura 2.15 – Comprimento de entrega das faixas de manta de fibras de carbono.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL E INSTRUMENTAÇÃO

#### 3.1 Sistema de confinamento e séries de ensaios

Os sistemas de confinamento adoptados e as correspondentes designações estão incluídos na Tabela 3.1 à Tabela 3.4. O sistema genérico está representado na Figura 3.1 incluindo-se na Figura 3.2 fotos de provetes representativos de alguns dos sistemas de confinamento adoptados. Estes sistemas são compostos por faixas de manta de fibras de carbono (CFRP), fixas ao betão e às camadas subjacentes por intermédio de resina epóxi. 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 presente programa experimental pretendeu-se avaliar 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, como foi referido nos pontos 2.1 e 2.2. No total foram efectuados quatro grupos de séries de ensaios descritos na Tabela 3.2 à Tabela 3.4. A variação de  $W$ ,  $S$  e  $L$  conduziu a provetes com diferente percentagem confinamento ( $\rho_f = A_f/A_{c,t}$ ), em que  $A_f = 2 \times S \times W \times L \times e$  mm<sup>2</sup> é a secção transversal da manta de CFRP utilizada no sistema de confinamento e  $e$  é a espessura efectiva da manta. A manta de 300gm/m<sup>2</sup> tem uma espessura efectiva de 0.176 mm, enquanto a manta de 200gm/m<sup>2</sup> tem uma espessura efectiva de 0.117 mm. A secção longitudinal do provete,  $A_{c,t}$ , é igual a 150x300 mm<sup>2</sup> (150 mm de largura por 300 mm de altura). Assim, tendo em conta os valores de  $\rho_f$  e a melhoria de propriedades proporcionada por cada sistema de confinamento, pretende-se verificar a importância relativa de  $W$ ,  $S$  e  $L$  no aumento da resistência e da ductilidade do betão, sendo esta última representada pela área sob a curva tensão-extensão até determinada extensão. Nas Tabela 3.2 à Tabela 3.4  $s'$  é o espaço de betão livre entre faixas de CFRP.

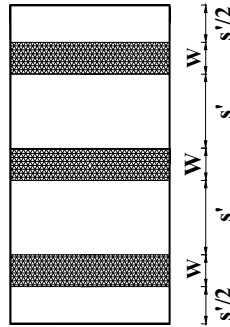


Figura 3.1 – Sistema genérico de confinamento.

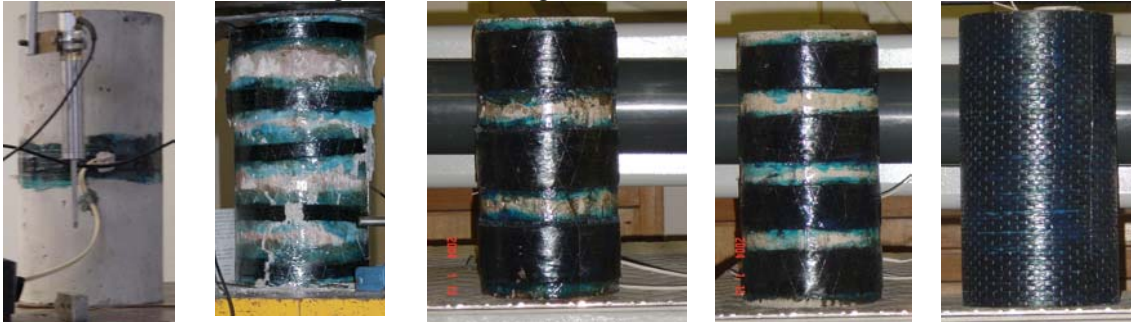


Figura 3.2 – Fotos de alguns dos sistemas de confinamento adoptados.

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 g/m<sup>2</sup>, 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.

Tabela 3.1 – Designação adoptada para os grupos de ensaios

Tipo de betão	Tipo de manta	Designação do grupo de ensaios
23 Mpa	CF130 S&P 240 (300 gm/m <sup>2</sup> )	C23S300
23 Mpa	CF120 S&P 240 (200 gm/m <sup>2</sup> )	C23S200
16 Mpa	CF120 S&P 240 (200 gm/m <sup>2</sup> )	C16S200
16 Mpa	CF130 S&P 240 (300 gm/m <sup>2</sup> )	C16S300

Os grupos de ensaios indicados nas Tabela 3.3 e Tabela 3.4 têm menor número de arranjos de sistemas de confinamento que o do grupo C23S300 (Tabela 3.2). 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 seleccionados os arranjos indicados na Tabela 3.3 e Tabela 3.4.

Tabela 3.2 – Séries de ensaios do grupo C23S300

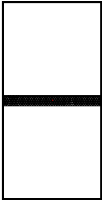
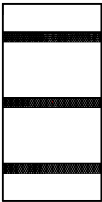

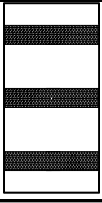
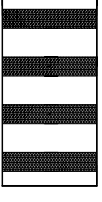
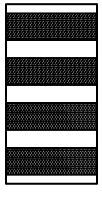
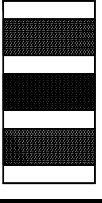

Designação do provete	W [mm]	S [-]	s' [mm]	L [mm]	A <sub>f</sub> [mm <sup>3</sup> ]	ρ <sub>f</sub> [%]	Sistema de confinamento
W15S1L1	15	1	-	1	5.01	0.01	
W15S1L2				2	10.02	0.02	
W15S1L3				3	15.03	0.03	
W15S1L4				4	20.04	0.05	
W15S1L6				6	30.06	0.07	
W15S3L1		3	85	1	15.03	0.03	
W15S3L2				2	30.06	0.07	
W15S3L3				3	45.09	0.10	
W15S3L4				4	60.12	0.13	
W15S3L6				6	90.18	0.20	
W15S5L1		5	45	1	25.05	0.06	
W15S5L2				2	50.1	0.11	
W15S5L3				3	75.15	0.17	
W15S5L4				4	100.2	0.22	
W15S5L6				6	150.3	0.33	
W30S3L3	30	3	70	3	90.18	0.20	
W30S3L5				5	150.3	0.33	
W30S3L6				7	210.4	0.47	
W30S4L3	30	4	45	3	120.2	0.27	
W30S4L5				5	200.4	0.45	
W30S4L6				7	280.6	0.62	
W45S4L3	45	4	30	3	180.4	0.40	
W45S4L5				5	300.6	0.67	
W45S4L6				7	420.8	0.94	
W60S3L3	60	3	40	3	180.4	0.40	
W60S3L5				5	300.6	0.67	
W60S3L6				7	420.5	0.94	
W300S1L3	300	1	-	3	300.6	0.67	
W300S1L5				5	501	1.11	
W300S1L7				7	701.4	1.56	

Tabela 3.3 – Séries de ensaios do grupo C23S200 e C16S200

Designação do provete	W [mm]	S [-]	s' [mm]	L [mm]	A <sub>f</sub> [mm <sup>3</sup> ]	ρ <sub>f</sub> [%]	Sistema de confinamento
W45S4L3	45	4	30	3	119	0.26	
W45S4L5				5	198	0.44	
W60S3L3	60	3	40	3	119	0.26	
W60S3L5				5	198	0.44	
W300S1L3	300	1	-	3	198	0.44	
W300S1L5				5	330	0.73	

Tabela 3.4– Séries de ensaios do grupo C16S300

Designação do provete	W [mm]	S [-]	s' [mm]	L [mm]	A <sub>f</sub> [mm <sup>3</sup> ]	ρ <sub>f</sub> [%]	Sistema de confinamento
W45S4L3	45	4	30	3	119	0.40	
W45S4L5				5	198	0.67	
W60S3L3	60	3	40	3	119	0.40	
W60S3L5				5	198	0.67	
W300S1L3	300	1	-	3	198	0.67	
W300S1L5				5	330	1.11	

### 3.2 Equipamento e procedimentos de ensaio

Os ensaios da Tabela 3.2 foram realizados numa prensa servo controlada de 3000 kN de capacidade máxima de carga (Figura 3.3), limitada a 2000 kN. Os provetes dos grupos de ensaios da Tabela 3.3 e Tabela 3.4 foram ensaiados num bastidor com capacidade de carga de 5000 kN, limitado a 2500kN (Figura 3.4).



Figura 3.3 – Prensa de compressão uniaxial utilizada no grupo de ensaios C23S300



Figura 3.4 – Bastidor de ensaios à compressão uniaxial utilizados nos grupos de ensaios C23S200, C16S200 e C16S300.

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 3.4 e na Figura 3.6.

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 (Figura 3.5). 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 foram ensaiados sob controlo de deslocamentos, por intermédio de um LVDT de 20 mm de campo e 0.05% de linearidade (Figura 3.6). O ensaio terminava quando o limite máximo do cursor do LVDT de controlo era atingido. Para determinar as extensões ocorridas no CFRP foram aplicados extensómetros segundo a disposição indicada na Figura 3.7. 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. 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 5 mm de comprimento. A Figura 3.8 mostra o procedimento de colagem do extensómetro à manta de CFRP.

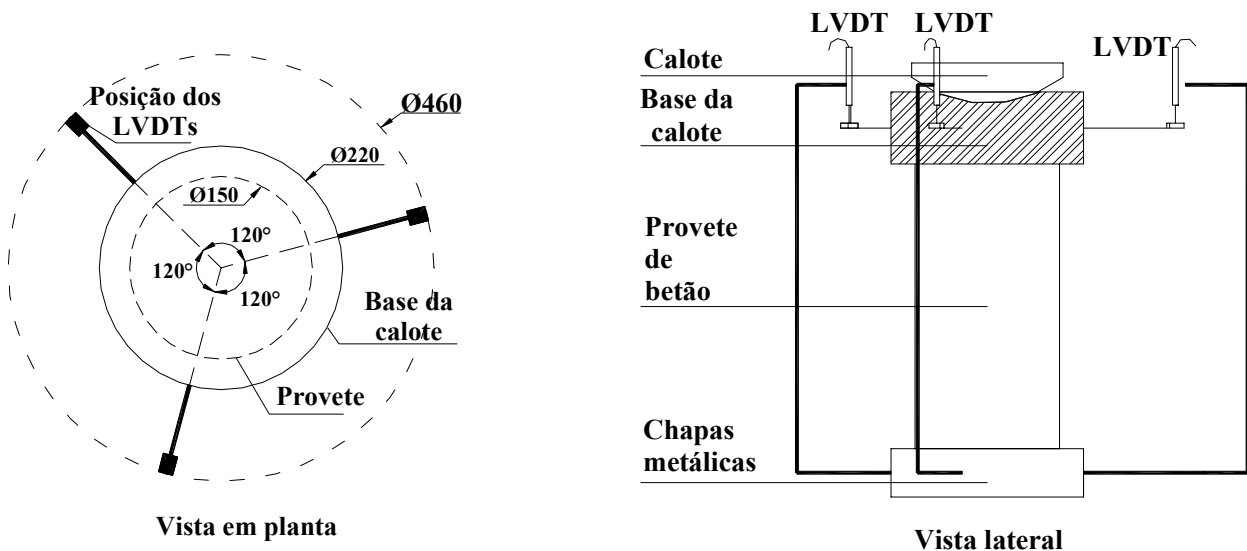


Figura 3.5– Posição dos 3 LVDTs

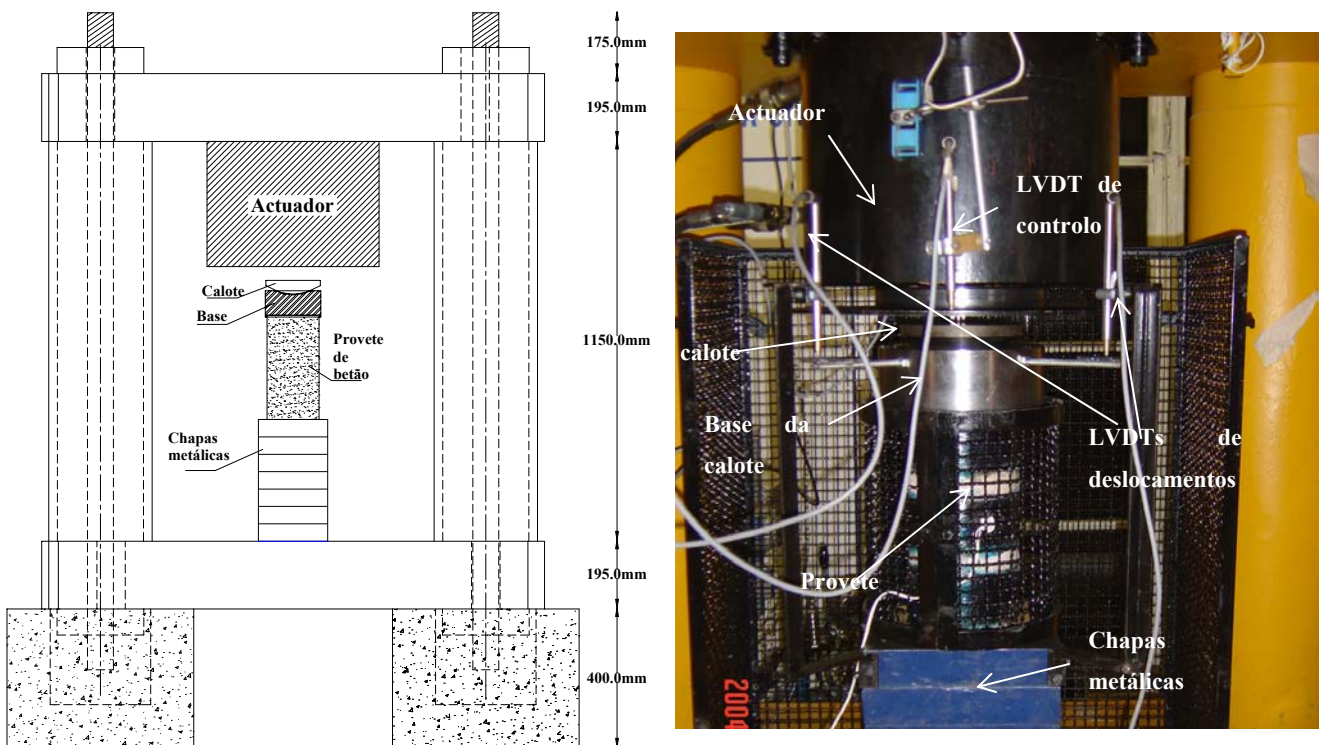


Figura 3.6 – Esquema do equipamento de ensaio.

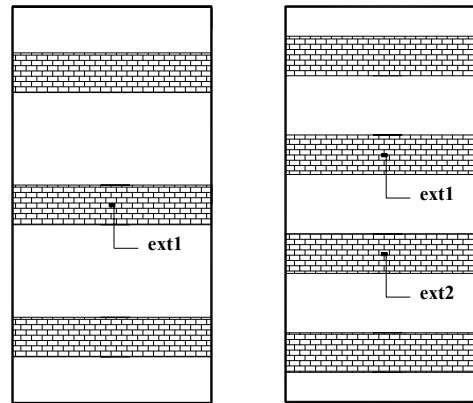


Figura 3.7 – Disposição dos extensómetros.



Aplicação do extensómetro

Soldagem do extensómetro aos terminais

Fixação dos terminais ao provete

Figura 3.8 – Aplicação dos extensómetros faixas de FRP

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, por forma a diminuir o atrito entre o provete e o prato e, conseqüentemente, o confinamento introduzido no betão por este efeito. 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.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

### 4.1 Introdução

Nos provetes de betão, sem reforço, ensaiados à compressão simples, ocorreu a formação de fissuras verticais no sentido da aplicação da carga, como é ilustrado na Figura 4.1. A relação tensão-extensão axial do betão sem reforço está apresentada na Figura 4.2. A curva representa o comportamento típico registado neste tipo de ensaios. A primeira parte da curva é não linear porque existem deformações localizadas no contacto entre o provete e os pratos e devido ao acomodamento do sistema de carga, Untiveros [2002]. Esta não linearidade é corrigida mediante a determinação da inclinação e extrapolação da parte linear da curva ascendente. O procedimento efectuado está ilustrado na Figura 4.2, onde se mostra uma curva correspondente ao comportamento registado durante o ensaio e uma nova curva corrigida. O valor da extensão correspondente à tensão máxima é da ordem dos  $3.20 \times 10^{-3}$  superior aos  $2.2 \times 10^{-3}$  indicados no CEB. Esta diferença deve estar relacionada com a localização dos LVDTs. Segundo Van Mier as leituras das deformações axiais sofridas no provete de betão devem ser lidas na zona central do provete. Nestes ensaios os LVDTs foram colocados nos pratos da prensa pelo que registam a deformação não somente da deformação central do provete, como também das extremidades do provete, zonas estas que estão sob a influência da acção dos pratos da prensa.

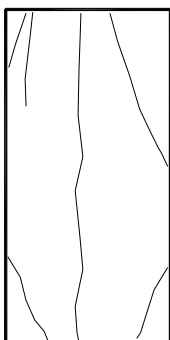


Figura 4.1-Fissuras no betão simples

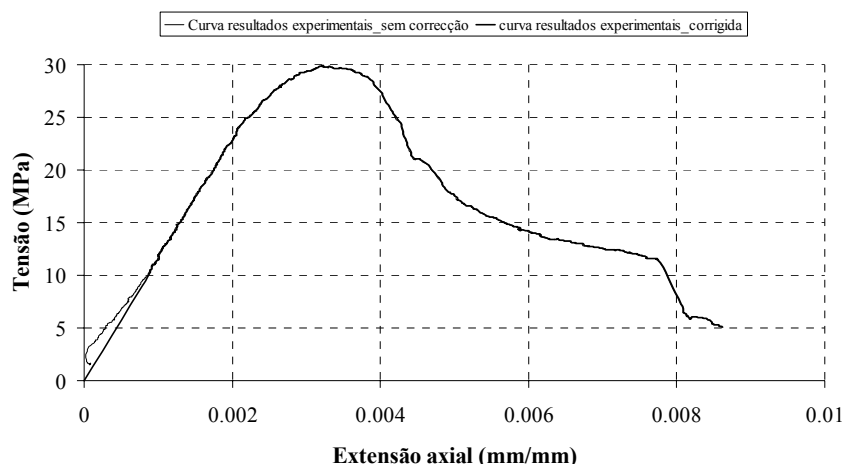


Figura 4.2 – Gráfico tensão- extensão axial

A carga transmite-se através de uma rótula situada na extremidade do actuador. É importante conhecer a magnitude da rotação. Utilizando três LVDTs, colocados no

prato fixo da prensa, tal como está descrito em 3.2 e ilustrado na Figura 3.5, são medidos os deslocamentos entre pratos. Com estas leituras e sabendo as coordenadas dos pontos onde estão aplicados os LVDTs,  $[(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2) \text{ e } (x_3, y_3, z_3)]$ , determina-se a rotação do prato superior da prensa a partir do plano definido pelos três pontos:

$$A \times (x - x_1) + B \times (y - y_1) + C \times (z - z_1) = 0 \quad (4.1)$$

onde A, B e C são determinantes calculados a partir das expressões a seguir apresentadas:

$$A = \begin{vmatrix} y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} \quad B = \begin{vmatrix} z_2 - z_1 & x_2 - x_1 \\ z_3 - z_1 & x_3 - x_1 \end{vmatrix} \quad C = \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \end{vmatrix}$$

A rotação do plano em relação ao eixo vertical do provete de betão é dado por:

$$\alpha = \arctan \frac{\sqrt{A^2 + B^2}}{C} \quad (4.2)$$

Esta expressão foi aplicada por Choi et al. [1994] para determinar as rotações relativas dos pratos durante ensaios de compressão uniaxial.

Na Figura 4.3 apresenta-se a relação rotação versus extensão axial registada num ensaio com provete de betão simples, bem como a relação tensão axial versus extensão axial para o mesmo provete.

Da análise do gráfico rotação versus extensão axial observa-se uma relação linear até ao ponto assinalado com um triângulo, a que corresponde uma rotação máxima na ordem dos 0.0003 radianos. Estes valores estão de acordo com os obtidos por outros investigadores com Choi et al. [1994] e Zanguelmi [1999]. Nesta fase as rotações são em geral pequenas, aumentando de forma aproximadamente linear com o deslocamento axial do provete. A partir deste ponto ocorre um aumento significativo da rotação devido à ocorrência de roturas localizadas no provete.

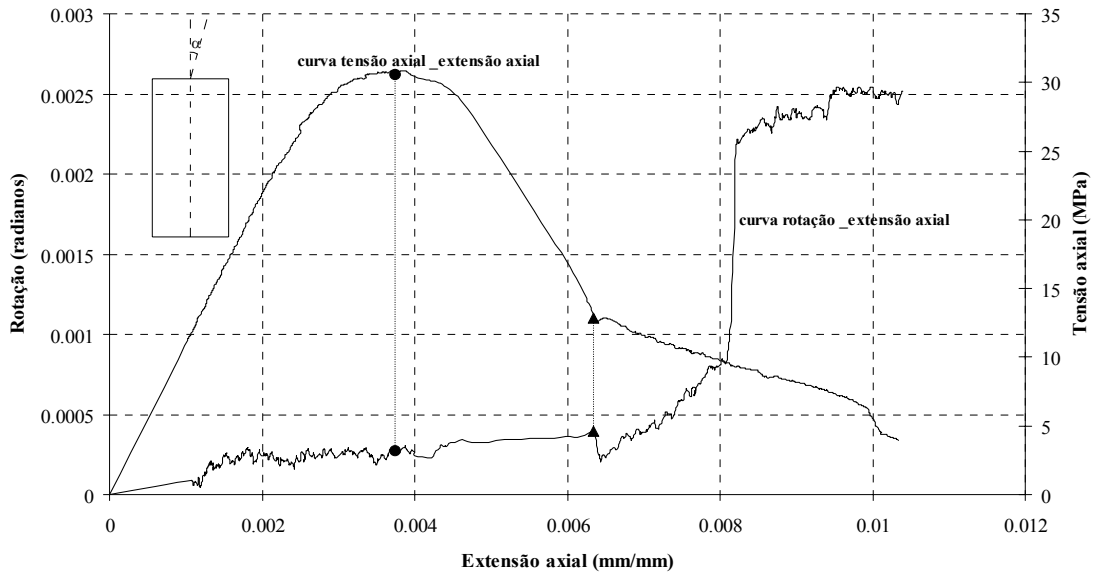


Figura 4.3 – Gráfico tipo rotação-extensão axial para um provete de betão simples.

Na Figura 4.4 apresentam-se as curvas tipo rotação versus extensão axial para provetes reforçados com faixas de CFRP. Em todas as curvas está assinalado o ponto correspondente à tensão máxima. A rotação nos provetes confinados aumentou de forma aproximadamente linear com a evolução da extensão axial do provete. Tal deve-se ao facto dos sistemas de confinamento evitarem a propagação de roturas localizadas, típicas dos provetes não confinados (ver o aumento brusco de rotação na Figura 4.3). Na maior parte dos provetes, reforçados com 3 camadas, as rotações foram superiores às rotações registadas nos provetes reforçados com 5 camadas. Em geral, quanto mais rígido era o sistema de confinamento (maior nº de faixas e de camadas) menor foi a rotação registada.

Os gráficos rotação-extensão axial de todos os grupos de ensaios estão apresentados no anexo A.

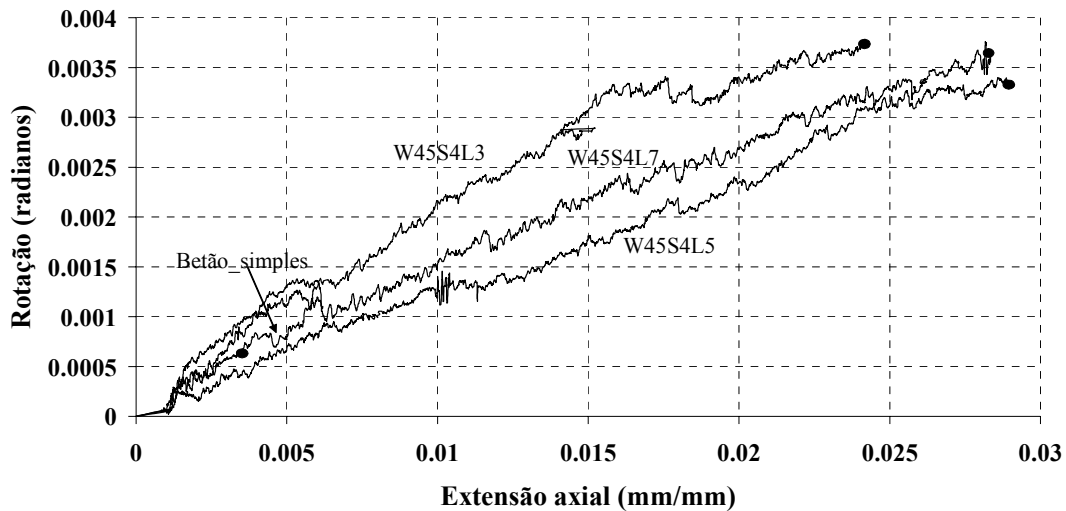


Figura 4.4 – Gráfico tipo rotação-extensão axial de provetes reforçados com faixas de CFRP.

## 4.2 Séries de ensaios do grupo C23S300

As séries do grupo C23S300 representam os ensaios realizados em provetes de betão com uma resistência 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  $300 \text{ g/m}^2$  e uma espessura de 0.176 mm.

### 4.2.1 Modos de rotura

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.

Na Tabela 4.1 e na Figura 4.5 é caracterizada e localizada a rotura das diferentes séries de ensaios do grupo C23S300. As superfícies de rotura dos provetes desenvolveram-se, perpendicularmente, no sentido ortogonal ao das fibras de CFRP.

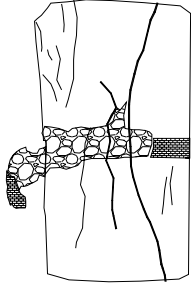
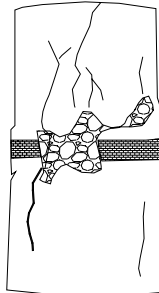
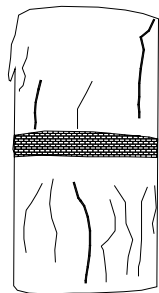
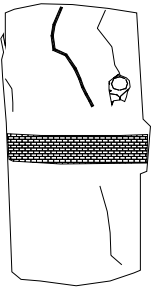
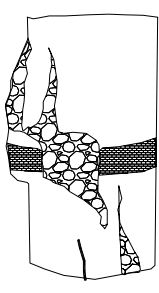
Tabela 4.1 – Caracterização da rotura dos provetes da série de ensaios do grupo C23S300 (cont.).

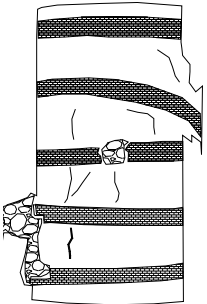
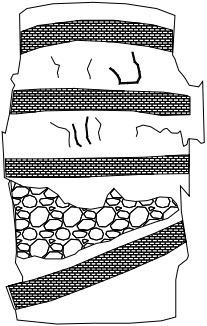
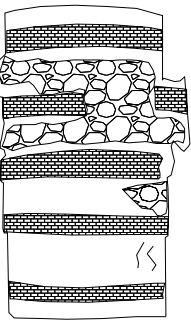
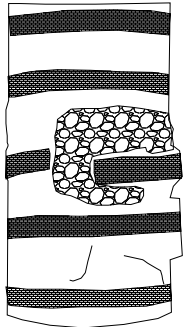
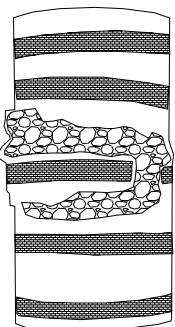
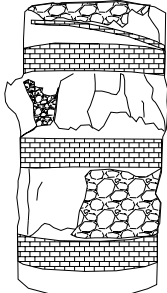
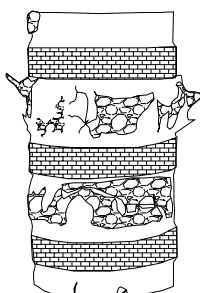
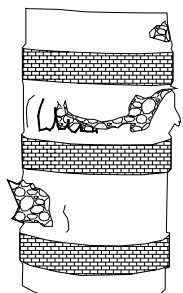
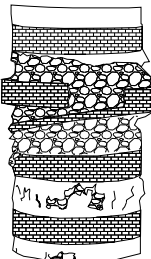
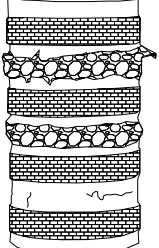
Betão confinado com <b>1</b> faixa de CFRP com <b>15mm</b> de largura	
1 camada	Rotura do CFRP. Fissuras verticais. Desintegração do betão.
2 camadas	Rotura do CFRP. Fissuras verticais. Desintegração do betão.
3 camadas	Rotura do CFRP. Fissuras verticais. Desintegração do betão.
4 camadas	Não houve rotura do CFRP. Fissuras verticais na metade superior do provete
6 camadas	Rotura do CFRP. Fissuras verticais. Desintegração do betão.
Betão confinado com <b>3</b> faixas de CFRP com <b>15mm</b> de largura	
1 camada	O primeiro CFRP a romper foi o do meio. Desintegração do betão.
2 camadas	A primeira faixa de CFRP a romper foi a do meio. Desintegração do betão. Muito fendilhado no 1/3 superior do provete.
3 camadas	Começou na fendilhar no 1/3 superior. A faixa do meio rompeu. Propagação das fendas para parte inferior do provete.
4 camadas	Fissuras em todo o provete. Rebentou a faixa do meio. Rotura muito violenta com destacamento parcial do betão.
6 camadas	O betão fendilhou muito. A faixa do meio rompeu perto do fim do ensaio. Rotura muito violenta com destacamento parcial do betão.
Betão confinado com <b>5</b> faixas de CFRP com <b>15mm</b> de largura	
1 camada	Rotura da 3ª e 4ª faixa a contar da parte superior do cilindro. Rotura muito violenta com destacamento parcial do betão.
2 camadas	Rotura da 2ª, 3ª e 4ª faixa a contar da parte superior do cilindro. Rotura muito violenta com destacamento parcial do betão.
3 camadas	Rotura da 2ª e 3ª faixa a contar da parte superior do cilindro. Rotura muito violenta com destacamento parcial do betão.
4 camadas	Rotura da 3ª faixa a contar da parte superior do cilindro. Rotura muito violenta com destacamento parcial do betão.
6 camadas	Rotura da 3ª faixa a contar da parte superior do cilindro. Rotura muito violenta com destacamento parcial do betão.
Betão confinado com <b>3</b> faixas de CFRP com <b>30mm</b> de largura	
3 camadas	Não há rotura das faixas. Betão muito fissurado entre as faixas de CFRP.
5 camadas	Não há rotura das faixas. Betão muito fissurado entre as faixas de CFRP.
7 camadas	Não há rotura das faixas. Betão muito fissurado entre as faixas de CFRP.
Betão confinado com <b>4</b> faixas de CFRP com <b>30mm</b> de largura	
3 camadas	Rotura da 2ª faixa a contar da parte superior do cilindro. Betão muito degradado na parte central do provete.
5 camadas	Não há rotura das faixa. Betão fissurado entre as faixas de CFRP.

Tabela 4.1 (cont.) – Caracterização da rotura dos provetes da série de ensaios do grupo C23S300

Betão confinado com 4 faixas de CFRP com 45mm de largura	
3 camadas	As faixas foram muito solicitadas. Ouvia-se o romper das fibras de carbono, chegando mesmo a rebentar num dos provetes. Betão muito fissurado.
5 camadas	Não há rotura das faixas. Betão fissurado entre as faixas de CFRP.
7 camadas	Não há rotura das faixas. Betão fissurado entre as faixas de CFRP.
Betão confinado com 3 faixas de CFRP com 60mm de largura	
3 camadas	Rotura violenta da faixa do meio. Betão muito danificado entre faixas
5 camadas	Não há rotura das faixas. Betão danificado entre as faixas de CFRP.
7 camadas	Não há rotura das faixas. Betão danificado entre as faixas de CFRP.
Betão totalmente confinado com CFRP	
3 camadas	Rotura das camadas mais externas da manta de CFRP.
5 camadas	Não há rotura da manta.

A Figura 4.5 mostra os esquemas de rotura para a série de ensaios do grupo de provetes C23S300. Cada série era composta por três provetes, mas apenas se apresenta a rotura observada num dos provetes, que foi geralmente representativo dos outros dois provetes da série. No anexo B apresenta-se a caracterização completa, em termos de fissuração, de todos os provetes.

Provetes confinados com 1 faixa de CFRP de 15mm de largura		
1 camada	2 camadas	3 camadas
		
4 camadas	6 camadas	Observações
		Nos provetes em que houve rotura do CFRP, a rotura foi repentina. Em todos os provetes surgiram fissuras verticais. Os provetes no fim do ensaio estavam pouco danificados.
Figura 4.5 – Modos de rotura dos provetes do grupo C23S300 (cont.).		

<b>Provetes confinados com 5 faixas de CFRP de 15mm de largura</b>			
1 camada	2 camadas	3 camadas	
			
4 camadas	6 camadas	Observações	
		Rotura violenta, das cintas centrais de CFRP com destacamento parcial do betão. Os provetes no fim do ensaio apresentavam algum dano.	
<b>Provetes confinados com 3 faixas de CFRP de 30mm de largura</b>			
3 camadas	5 camadas	7 camadas	Observações
			Não houve rotura de nenhuma das cintas de reforço dos provetes. Betão muito danificado entre as cintas.
<b>Provetes confinados com 4 faixas de FRP de largura igual a 30mm</b>			
3 camadas	5 camadas	Observações	
		As faixas de CFRP apenas romperam nos arranjos constituídos por 3 camadas. Betão entre cintas muito danificado.	
Figura 4.5 (cont) – Modos de rotura dos provetes do grupo C23S300.			

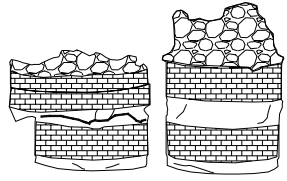
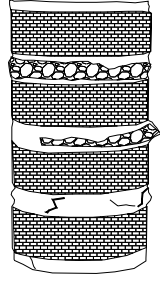
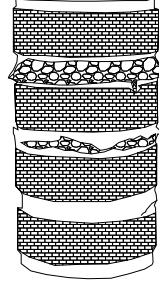
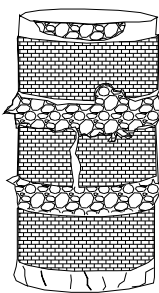
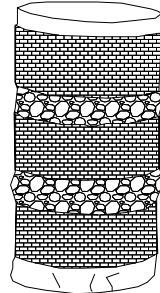
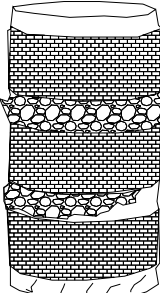
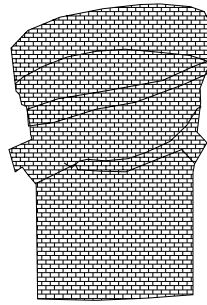
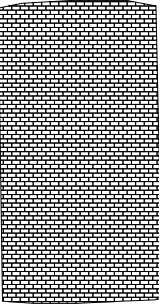
<b>Provetes confinados com 4 faixas de CFRP de 45mm de largura</b>			
3 camadas	5 camadas	7 camadas	Observações
			Em todos os provetes ouviram-se as fibras de CFRP a romper chegando a rebentar nos provetes reforçados com 3 camadas de CFRP. Nestes provetes o betão ficou muito danificado tendo os provetes no final do ensaio apresentado uma configuração cônica.
<b>Provetes confinados com 4 faixas de CFRP de 60mm de largura</b>			
3 camadas	5 camadas	7 camadas	Observações
			Apenas nos provetes reforçados com 3 camadas rebentou a cinta central de forma muito violenta. O betão entre as cintas ficou muito danificado.
<b>Provetes confinados com faixas de CFRP de 300mm de largura</b>			
3 camadas	5 camadas	Observações	
		Houve rotura da camada exterior de CFRP nos provetes reforçados com 3 camadas. Nos provetes reforçados com 5 camadas o provete, aparentemente, manteve-se intacto.	

Figura 4.5 (cont) – Modos de rotura dos provetes do grupo C23S300.

Em todos os ensaios em que ocorreu rotura do CFRP, a rotura do provete foi muito repentina. Nas séries de provetes com  $\rho_f$  superior a 0.167, a rotura caracterizou-se, para além, de repentina, também explosiva e violenta. Foi necessário enclausurar o provete com uma rede de aço, de forma a evitar danos nos aparelhos de aquisição de dados. Nos provetes totalmente reforçados com 5 camadas de CFRP as mantas não rebentaram, dado que o ensaio terminou por se ter atingido a capacidade máxima de carga do equipamento, dando indicação de que o provete ainda não tinha atingido a sua capacidade máxima de carga.

#### 4.2.2 Síntese dos resultados mais relevantes e curvas tensão-extensão

Os principais indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento utilizados, para os ensaios do grupo C23S300, estão incluídos na Tabela 4.2, 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),  $\epsilon_{co}$  é a extensão axial do provete correspondente a  $f_{co}$ ,  $\epsilon_{cc}$  é a extensão axial correspondente a  $f_{cc}$  (nas séries de provetes de BS  $\epsilon_{cc} = \epsilon_{co}$ ),  $\epsilon_{fmax}$  é a extensão máxima no CFRP,  $\epsilon_{fu}$  é a extensão de rotura do CFRP,  $\epsilon_{fl,r}$  é a extensão de referência no CFRP no provete onde foi registada a menor extensão axial final ( $\epsilon_{axial}^1$ ) de uma determinada série de provetes e  $\epsilon_{fl}$  é a extensão no CFRP correspondente a  $\epsilon_{axial}^1$  (ver Figura 4.6). Cada um dos valores indicados nestas tabelas representa a média dos resultados registados nos três provetes que constituem cada série. O quociente entre  $\epsilon_{cc}$  e  $\epsilon_{co}$  representa o índice de ductilidade.

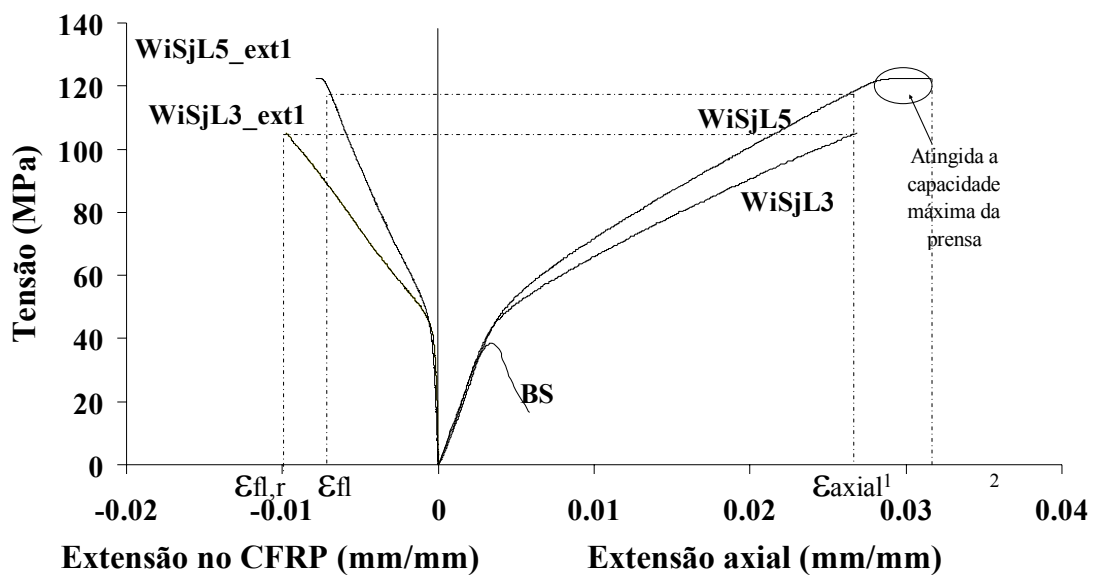
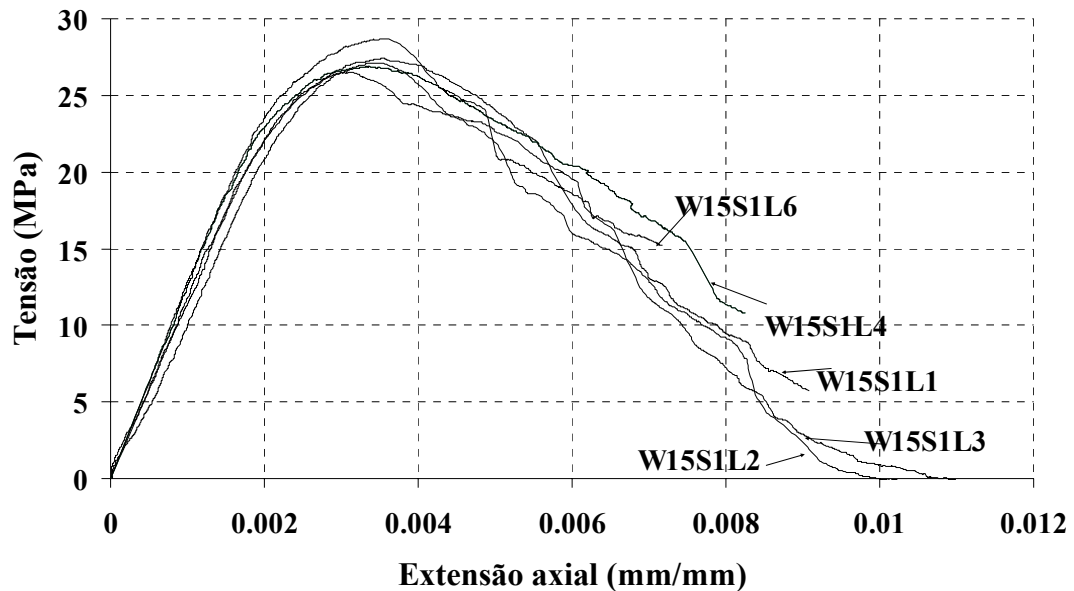


Figura 4.6 – Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP para um provete tipo.

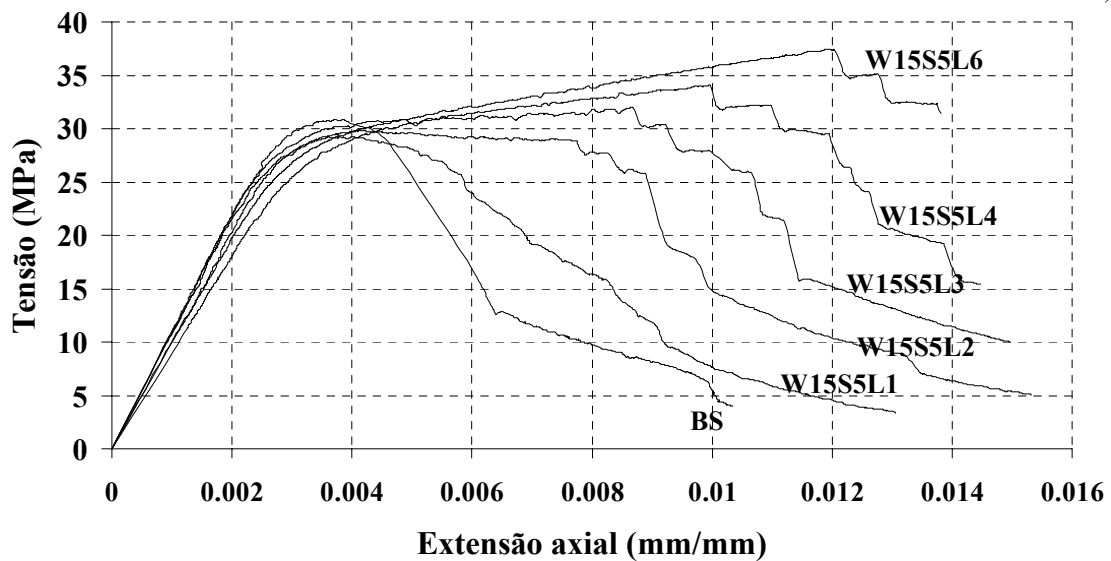
Tabela 4.2-Indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento referentes ao grupo de ensaios C23S300

Designação do provete	S	Tipo betão	Tipo manta	L	$\rho_f$ [%]	$f_{cc}$ (Mpa)	$f_{cc}/f_{co}$	$\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$	$\varepsilon_{fmax}/\varepsilon_{fu}$	$\varepsilon_{\Pi}/\varepsilon_{\Pi,r}$
Betão simples	-	C35/30	S&P C-240 (300gm/m <sup>2</sup> )	-	-	-	-	-	-	-
W15S1L1	1			1	0.011	27.46	-	-	-	-
W15S1L2				2	0.022	27.12	-	-	-	-
W15S1L3				3	0.033	26.48	-	-	-	-
W15S1L4				4	0.045	26.86	-	-	-	-
W15S1L6				6	0.069	28.68	-	-	-	-
Betão simples	-	C35/30	S&P C-240 (300gm/m <sup>2</sup> )	0		28.5 ( $f_{co}$ )	1.0	1.0		
W15S3L1	3			1	0.033	30.6	1.07	1.20	0.284	
W15S3L2				2	0.069	30.3	1.06	1.28	0.245	
W15S3L3				3	0.100	30.4	1.07	1.22	0.454	
W15S3L4				4	0.134	31.2	1.09	1.32	0.493	
W15S3L6				6	0.200	30.5	1.07	1.51	0.556	
Betão simples	-	C35/30	S&P C-240 (300gm/m <sup>2</sup> )	0		30.8 ( $f_{co}$ )	1.0	1.0	-	-
W15S5L1	5			1	0.058	29.2	0.95	1.03	-	-
W15S5L2				2	0.111	29.8	0.97	1.05	-	-
W15S5L3				3	0.167	32.00	1.04	2.21	-	-
W15S5L4				4	0.223	34.0	1.10	2.55	-	-
W15S5L6				6	0.334	37.4	1.21	3.08	-	-
Betão simples	-	C35/30	S&P C-240 (300gm/m <sup>2</sup> )	0		32.7 ( $f_{co}$ )	1.0	1.0	-	-
W30S3L3	3			3	0.200	38.85	1.19	2.94	0.825	1.41
W30S3L5				5	0.334	42.04	1.28	6.21	0.161	0.30
W30S3L7				7	0.468	43.46	1.33	6.33	0.438	1.00
Betão simples	-	C35/30	S&P C-240 (300gm/m <sup>2</sup> )	0		38.8 ( $f_{co}$ )	1.0	1.0	-	-
W30S4L3	4			3	0.267	57.48	1.48	6.9	0.517	0.78
W30S4L5				4	0.445	65.76	1.70	6.5	0.465	1.07
				5	0.445	65.76	1.70	6.5	0.652	1.00
							0.422	1.00		
Betão simples	-	C35/30	S&P C-240 (300gm/m <sup>2</sup> )	0		39.2 ( $f_{co}$ )	1.0	1.0		-
W45S4L3	4			3	0.401	71.99	1.84	7.24	0.175	1.00
W45S4L5				4	0.668	91.05	2.33	8.45	0.475	1.00
				5	0.668	91.05	2.33	8.45	0.422	0.75
W45S4L7	7			0.935	91.85	2.35	8.69	0.431	1.43	
	7			0.935	91.85	2.35	8.69	0.167	0.32	
							0.212	0.68		
Betão simples	-	C35/30	S&P C-240 (300gm/m <sup>2</sup> )	0		40.0 ( $f_{co}$ )	1.0	1.0		-
W60S3L3	3			3	0.401	65.87	1.65	8.32	0.727	1.00
W60S3L5				5	0.668	79.28	1.98	8.36	0.409	0.56
W60S3L7				7	0.935	83.72	2.09	8.80	0.394	0.53
Betão simples	-	C35/30	S&P C-240 (300gm/m <sup>2</sup> )	0		38.0 ( $f_{co}$ )	1.0	1.0		-
W300S1L3	-			3	0.668	105.08	2.76	7.45	0.631	1.00
W300S1L5				5	1.11	122.45	3.22	8.77	0.508	0.72

Na Figura 4.7 representa-se a relação entre a tensão e a extensão axial do provete das séries W15S1 e W15S5, para o grupo C23S300. 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.



a)



b)

Figura 4.7 – Curvas tensão versus extensão axial nas séries a) W15S1; b) W15S5 do grupo C23S300.

Na Figura 4.8 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. Cada uma das curvas das Figura 4.7 e Figura 4.8 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.

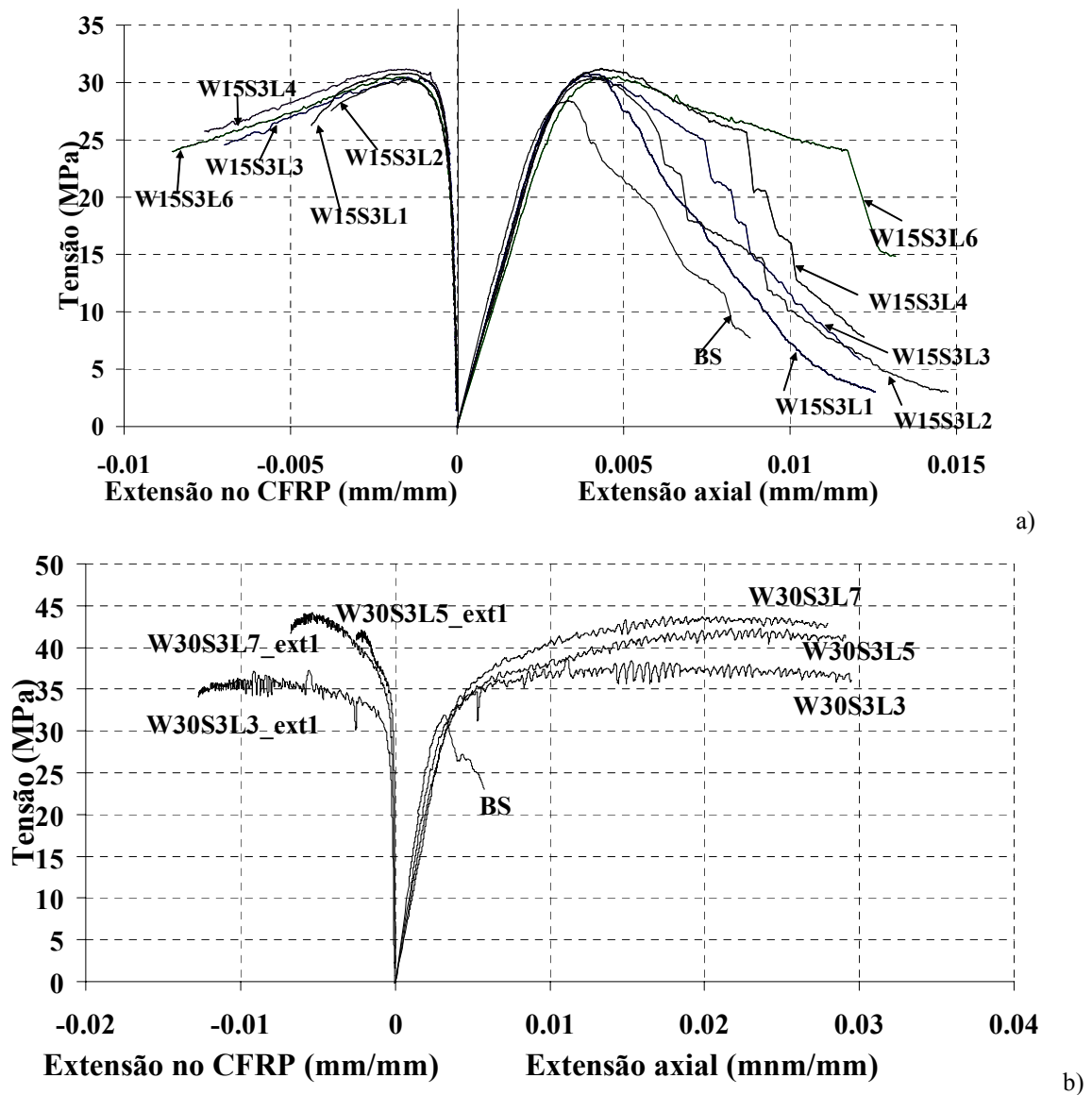
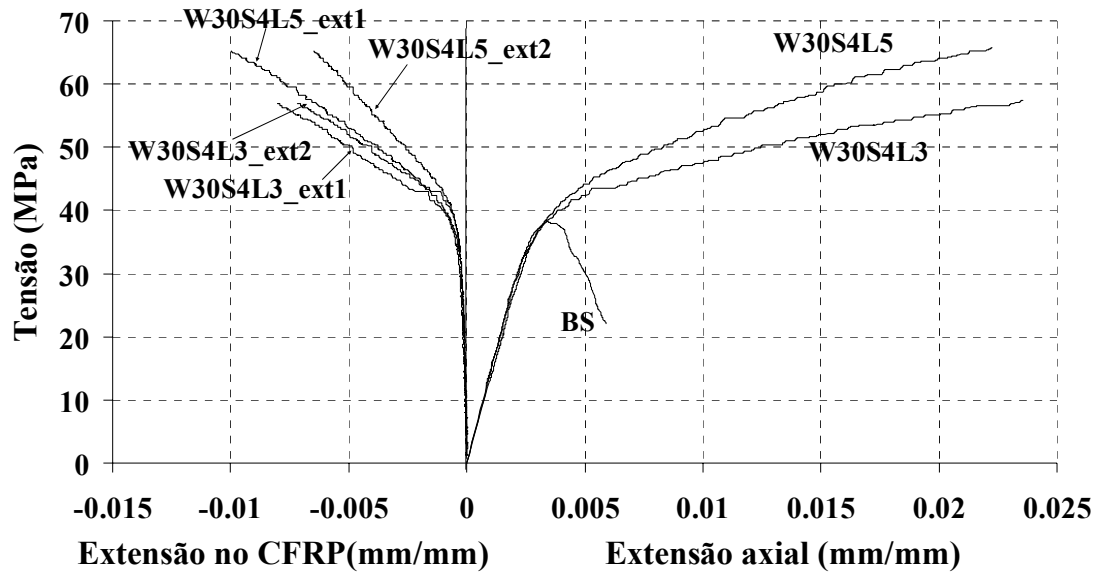
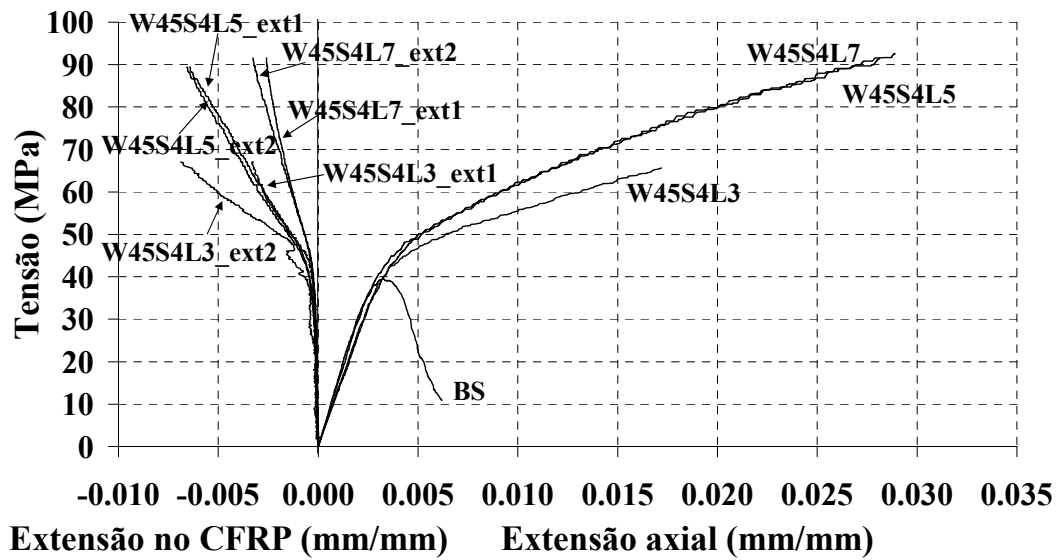


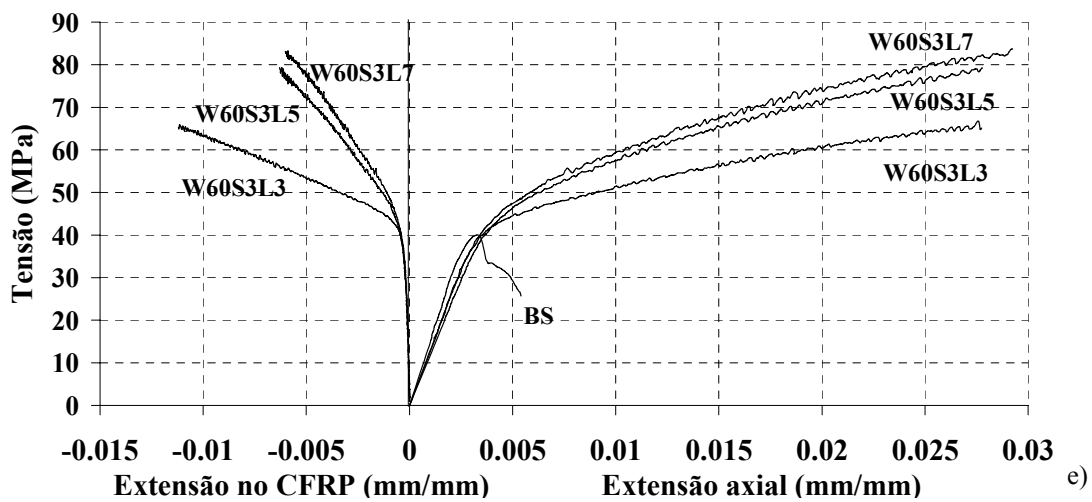
Figura 4.8 – Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries: a) W15S3; b) W30S3; c) W30S4; d) W45S4; e) W60S3; f) W300S1 do grupo C23S300(cont.).



c)



d)



e)

Figura 4.8 (cont.) – Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries: a) W15S3; b) W30S3; c) W30S4; d) W45S4; e) W60S3; f) W300S1 do grupo C23S300.

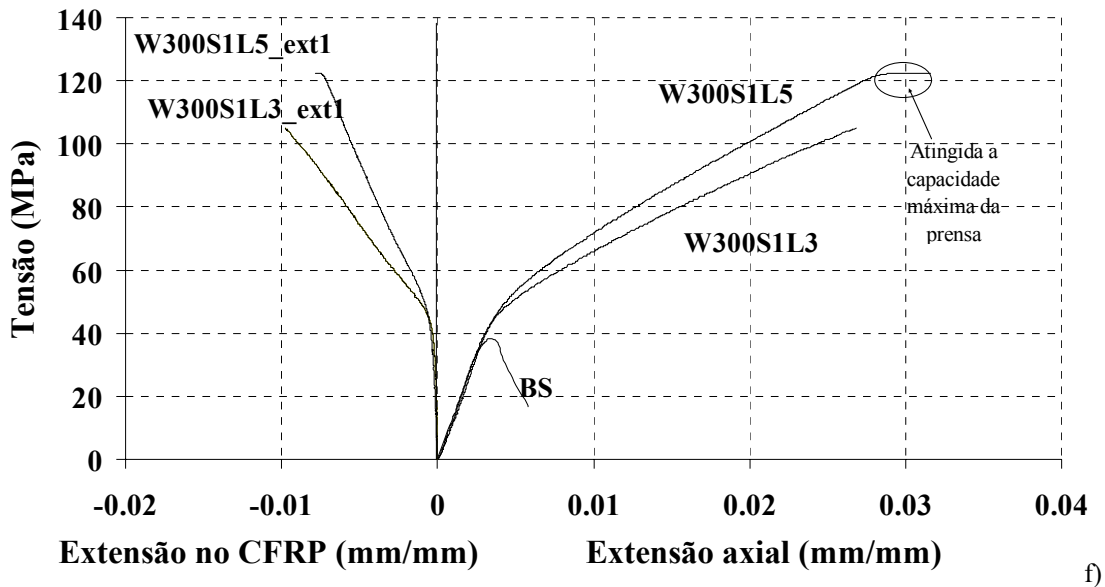


Figura 4.8 (cont.) – Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries: a) W15S3; b) W30S3; c) W30S4; d) W45S4; e) W60S3; f) W300S1 do grupo C23S300.

Da análise dos valores incluídos na Tabela 4.2 e dos gráficos das Figura 4.7 e Figura 4.8 (grupo C23S300) podem-se extrair 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, i.e., todos os provetes revelam uma fase de amolecimento. Na Figura 4.7b 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 (Figura 4.8a).
- 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), Figura 4.8b, 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), Figura 4.8c, 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  $\epsilon_{fu}$ . Nos provetes com cinco camadas por faixa, na faixa logo acima do plano de simetria transversal do provete (ext1, ver Figura 3.7) foram registadas extensões superiores às obtidas na faixa logo abaixo daquele plano (ext2), devido à maior deformabilidade transversal ocorrida na parte superior dos provetes desta série (ver Figura 3.7). Na faixa superior foi alcançada uma extensão máxima próxima de 65% de  $\epsilon_{fu}$ ;
- Na série de provetes W45S4, i.e., nos provetes com quatro faixas de 45mm 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, como 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  $\epsilon_{fu}$ ;
- As séries W45S4 e W60S3, apesar de terem o mesmo  $\rho_f$ , proporcionaram níveis diferentes de confinamento. Assim, em termos de aumento da capacidade de carga, foi mais elevado na série W45S4, revelando ser mais influente o número de faixas que a largura da faixa. Assim, quanto maior for o espaço livre entre faixas, maior é a eficácia do sistema de confinamento em termos de aumento de carga. No entanto, em termos de aumento de extensão máxima no CFRP, os maiores valores foram registados na série W60S3;
- 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

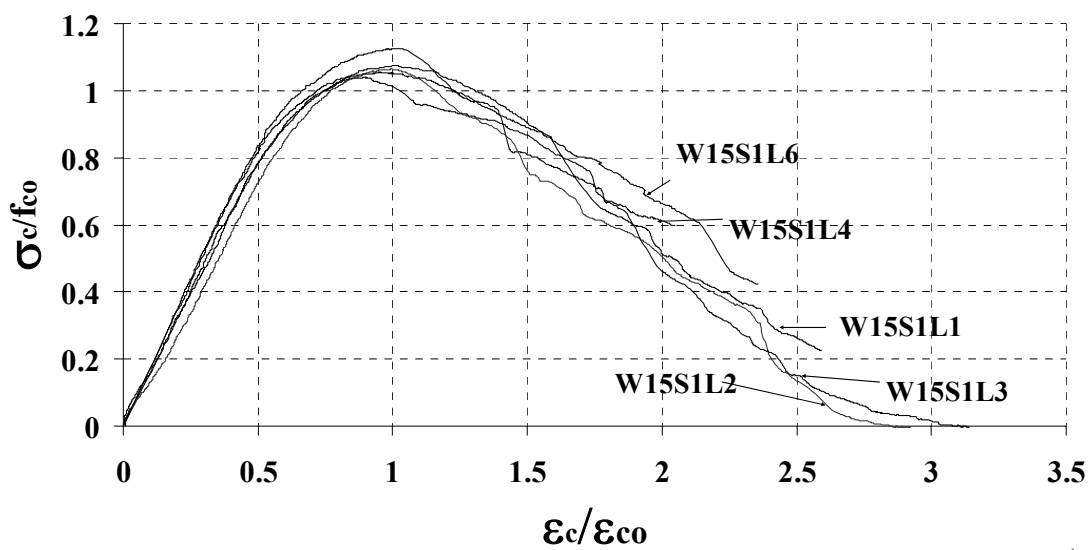
se verificou uma diminuição da extensão máxima no CFRP com o número de camadas de manta aplicadas;

- 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, tendo-se registado valores de 3 a 20. De sublinhar que, por limitação de capacidade de carga da prensa, nalgumas 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 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 para mais de cinco camadas de CFRP o acréscimo de carga e de capacidade de absorção de energia é marginal. Verificou-se também 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.

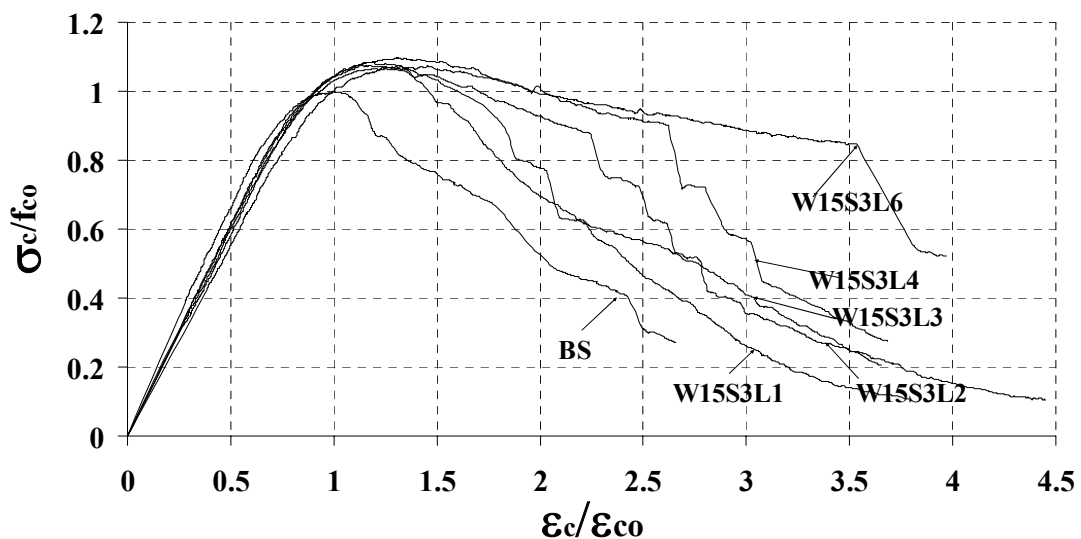
### 4.2.3 Curvas $\sigma_c/f_{c0}$ versus $\tilde{\epsilon}_c/\epsilon_{c0}$

Para 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, foi determinada a relação  $\sigma_c/f_{c0}$  versus  $\epsilon_c/\epsilon_{c0}$  em que  $\sigma_c$  e  $\epsilon_c$  são a tensão e a extensão no provete confinado e  $f_{c0}$  e  $\epsilon_{c0}$  são a tensão e a extensão no provete não confinado da correspondente série.

Na Figura 4.9 representam-se as curvas  $\sigma_c/f_{c0}$  versus  $\epsilon_c/\epsilon_{c0}$  para as séries de ensaio do grupo C23S300.

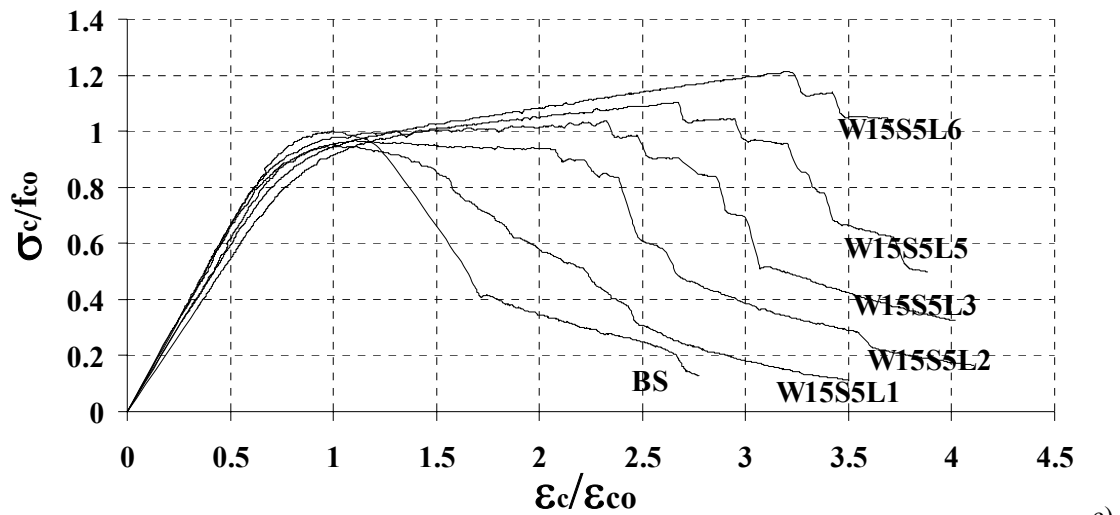


a)

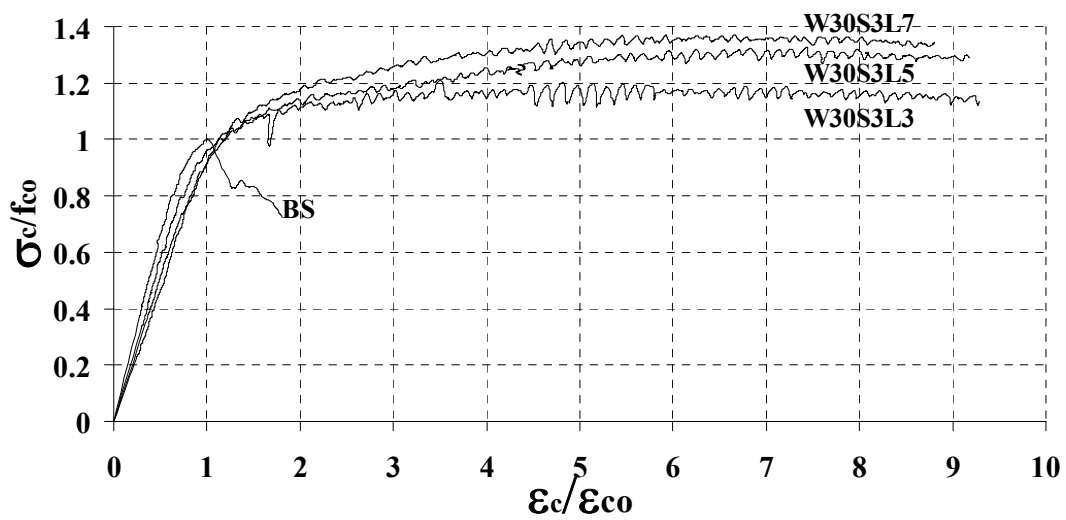


b)

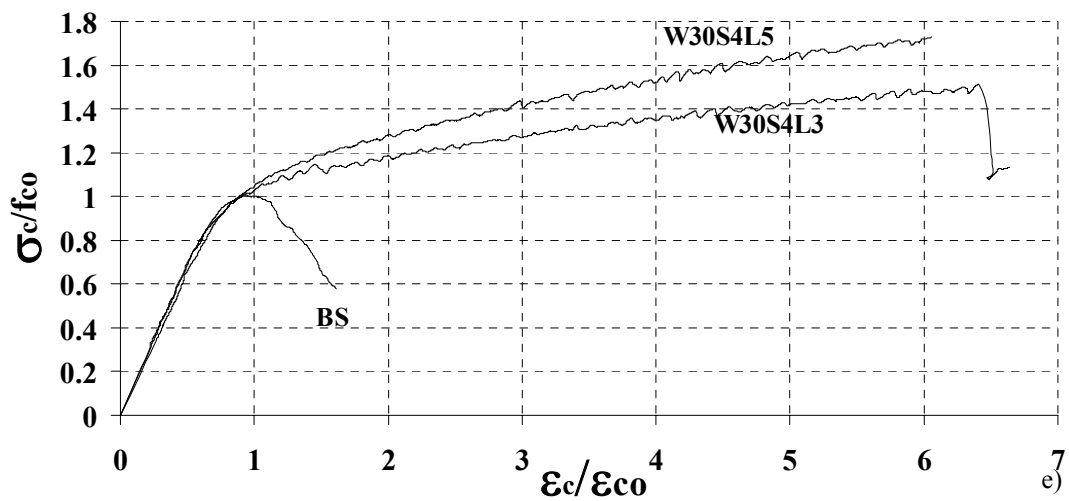
Figura 4.9 – Curvas  $\sigma_c/f_{c0}$  versus  $\epsilon_c/\epsilon_{c0}$  nas séries de ensaios do grupo S23S300 (cont.).



c)

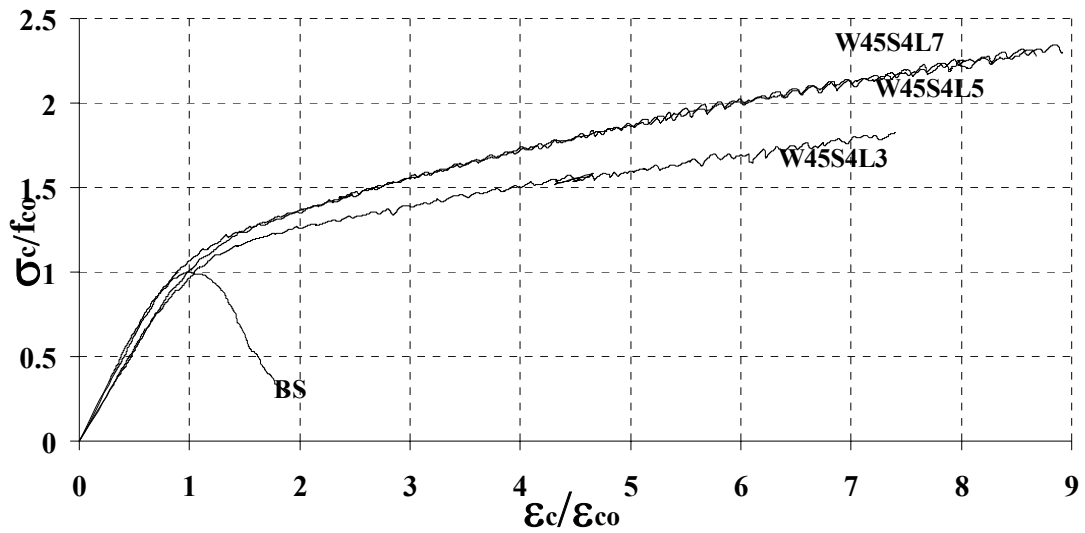


d)

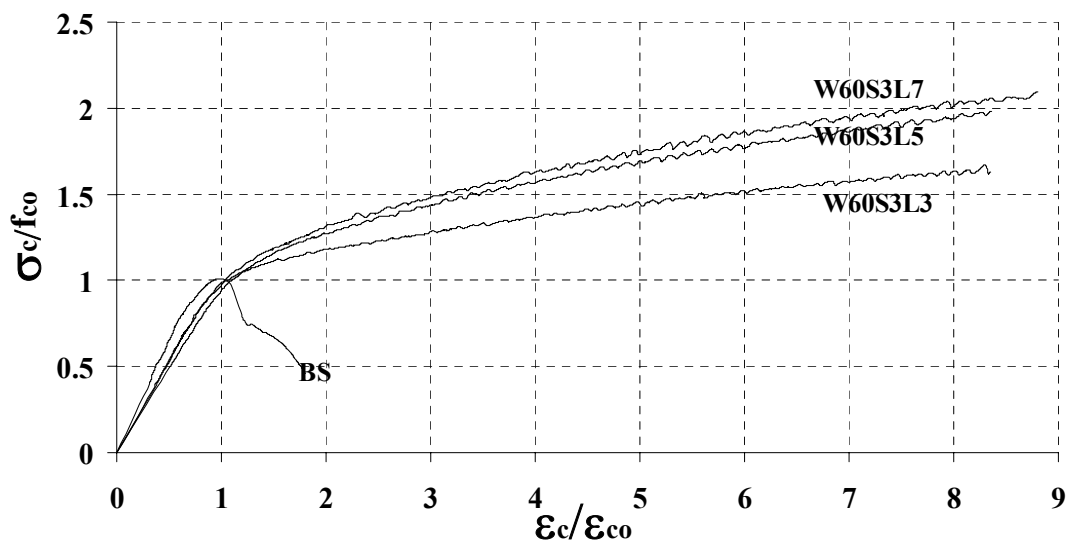


e)

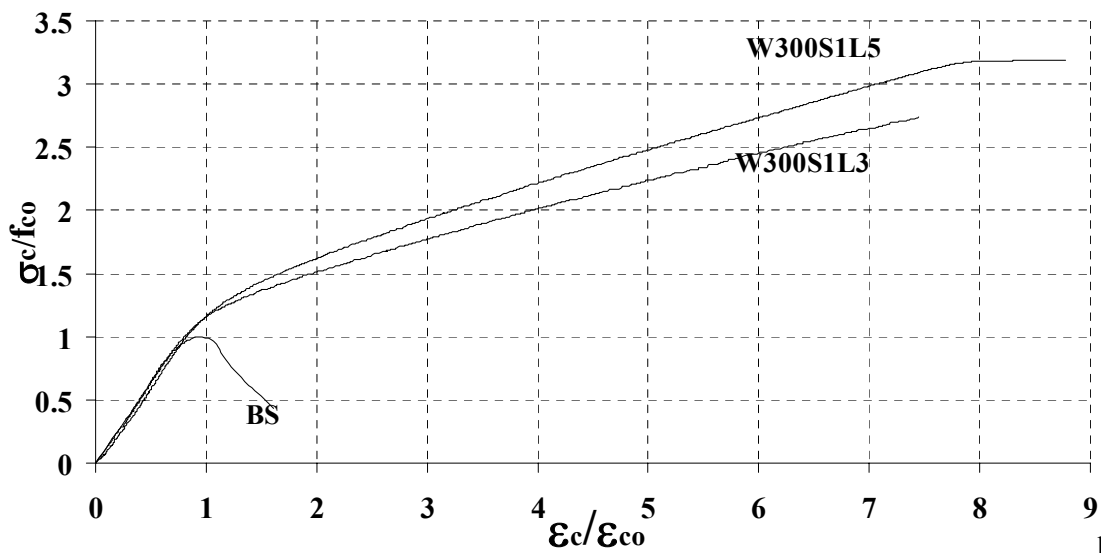
Figura 4.9 (cont.). – Curvas  $\sigma_c/f_{co}$  versus  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  nas séries de ensaios do grupo S23S300.



f)



g)



h)

Figura 4.9 (cont.) – Curvas  $\sigma_c/f_{c0}$  versus  $\epsilon_c/\epsilon_{c0}$  nas séries de ensaios do grupo S23S300.

Estas curvas reforçam as conclusões apresentadas no ponto 4.2.2 em relação às séries de ensaios do grupo C23S300. O aumento da capacidade de carga é marginal nos provetes confinados com faixas de 15mm. Em termos de extensão axial máxima nos provetes W15S5 o sistema de confinamento desta série permitiu aumentos da ordem de 4 vezes a extensão de pico do correspondente betão simples.

Nos provetes reforçados com faixas de 30 mm e percentagem de confinamento similar (ver Tabela 3.2), o aumento da capacidade de carga em relação ao provete de betão simples foi de 33 % para a série W30S3L6 e de 70% para a série W30S4L5. Em termos de deformabilidade, para as mesmas séries, atingiram-se valores superiores a seis vezes os registados no betão simples.

Independentemente de  $\rho_f$ , nas séries W45S4, W60S3 e W300S1 o aumento da capacidade de carga foi mais significativo do que nas restantes séries. Nas séries W45S4 e W60S3 foi possível duplicar a capacidade de carga dos correspondentes provetes de betão simples, enquanto nas séries W300S1 esse aumento foi de 3 vezes. Em termos de capacidade de deformação o aumento registado nas séries W45S4, W60S3 e W300S1 nos provetes reforçados com faixas de 45 mm, 60 mm e 300 mm foi de aproximadamente nove vezes ( $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co} \cong 9$ )

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

Na Figura 4.10 apresenta-se a relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e  $\rho_f$ , para diferentes estados de extensão axial relativa dos provetes confinados,  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$ , nomeadamente para,  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  de 2, 3, 4, 6 e 8. A relação  $\sigma_c/f_{co}$  versus  $\rho_f$  para diferentes  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  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.

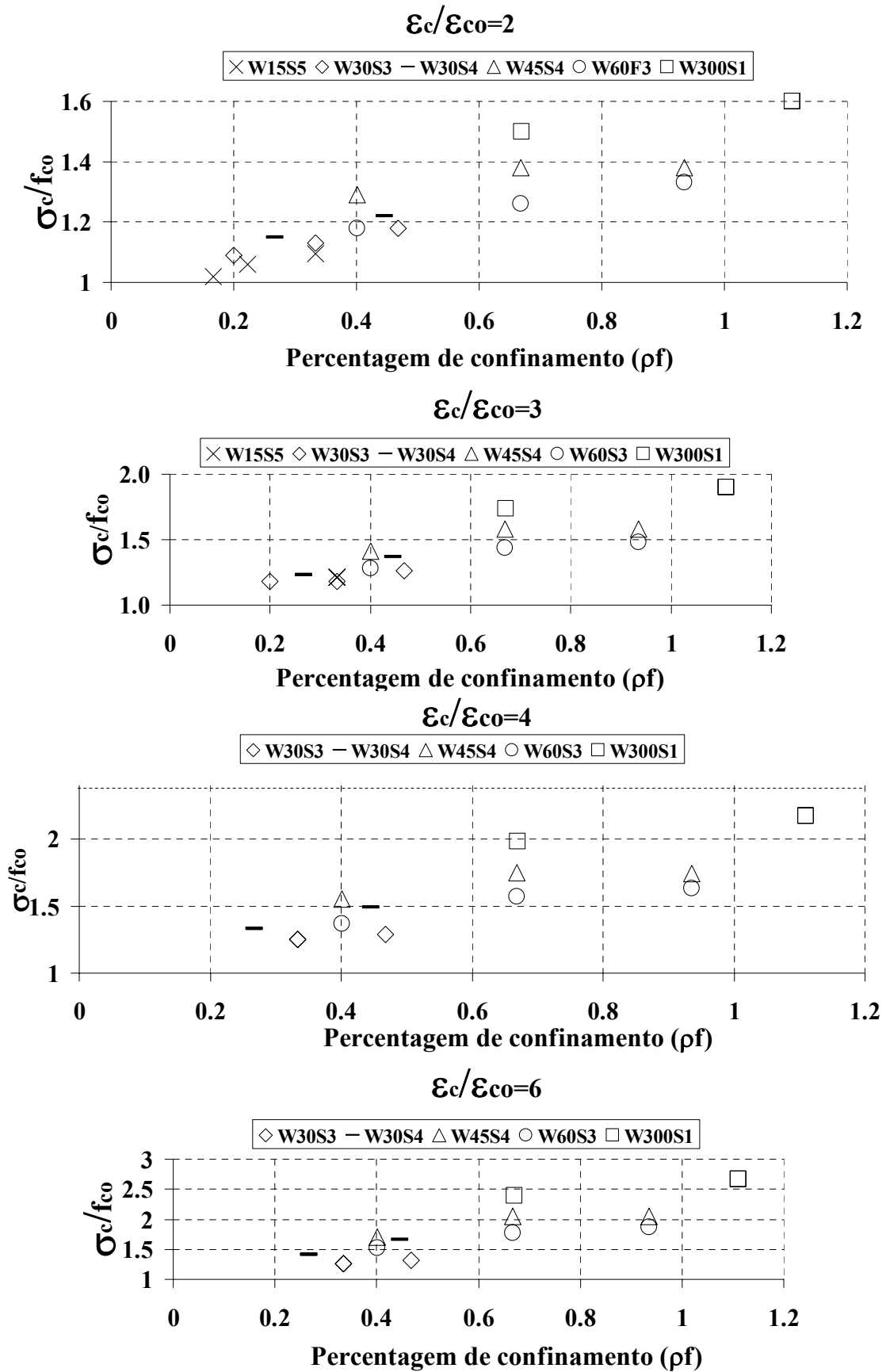


Figura 4.10 – Relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) nas séries de ensaios do grupo C23S300 (cont.).

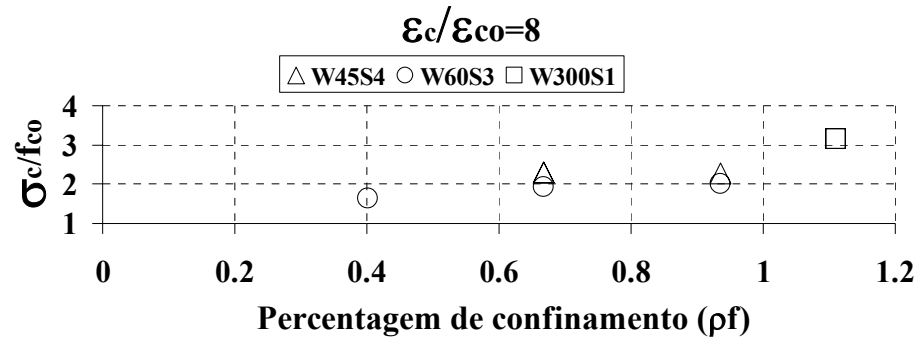


Figura 4.10 (cont.) – Relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) nas séries de ensaios do grupo C23S300.

Da análise dos gráficos representados na Figura 4.10 verifica-se que:

- A capacidade de carga aumentou com  $\rho_f$ ;
- Apesar de terem a mesma percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ), a série W45S4 registou incrementos de carga superiores aos da série W60S3.

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

Na Figura 4.12 representa-se a eficácia dos sistemas de confinamento em termos de capacidade de absorção de energia, obtida da relação  $\Delta U/U_c$ - $\rho_f$ , para diferentes estados de extensão axial relativa dos provetes confinados,  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$ , nomeadamente para,  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}=2, 3, 4, 6$  e  $8$ , para as séries de ensaio do grupo C23S300.  $\Delta U$  é o incremento de energia proporcionado pelo confinamento e  $U_c$  é a energia dissipada na deformação dos provetes não confinados. Para estes provetes, na avaliação de  $U_c$ , considerou-se para extensão última 5.5 %, ver Figura 4.11. 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 4.11. O processo para determinar  $\Delta U$  está esquematizado na Figura 4.11, 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

$$U_{i+1} = U_i + \frac{\sigma_{i+1} + \sigma_i}{2} \times (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i) \quad (4.1)$$

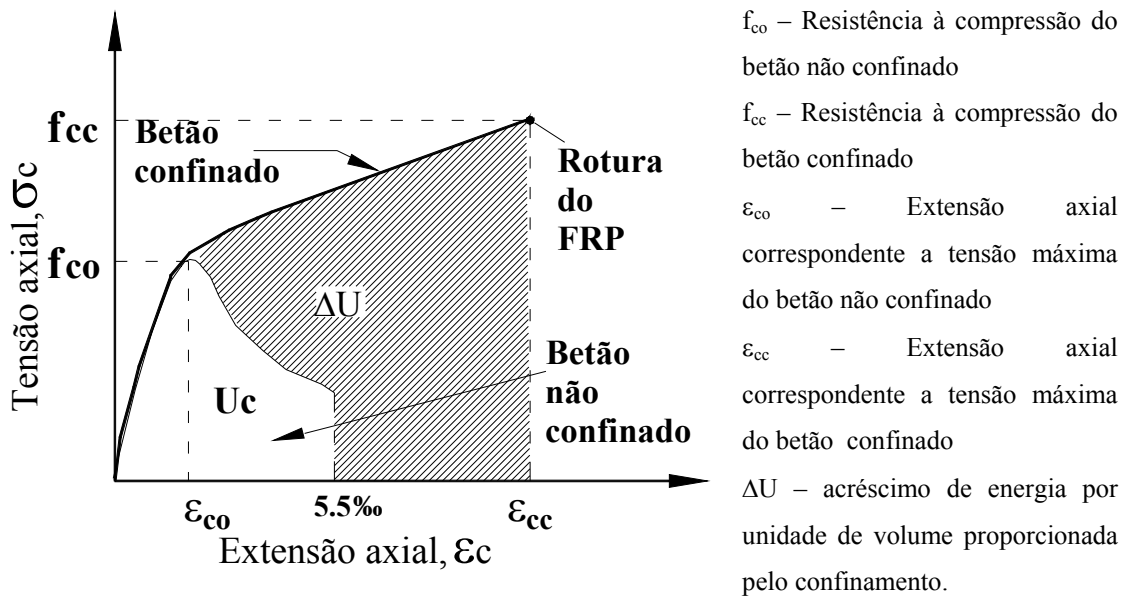


Figura 4.11 – Representação para a determinação de  $U_c$ .

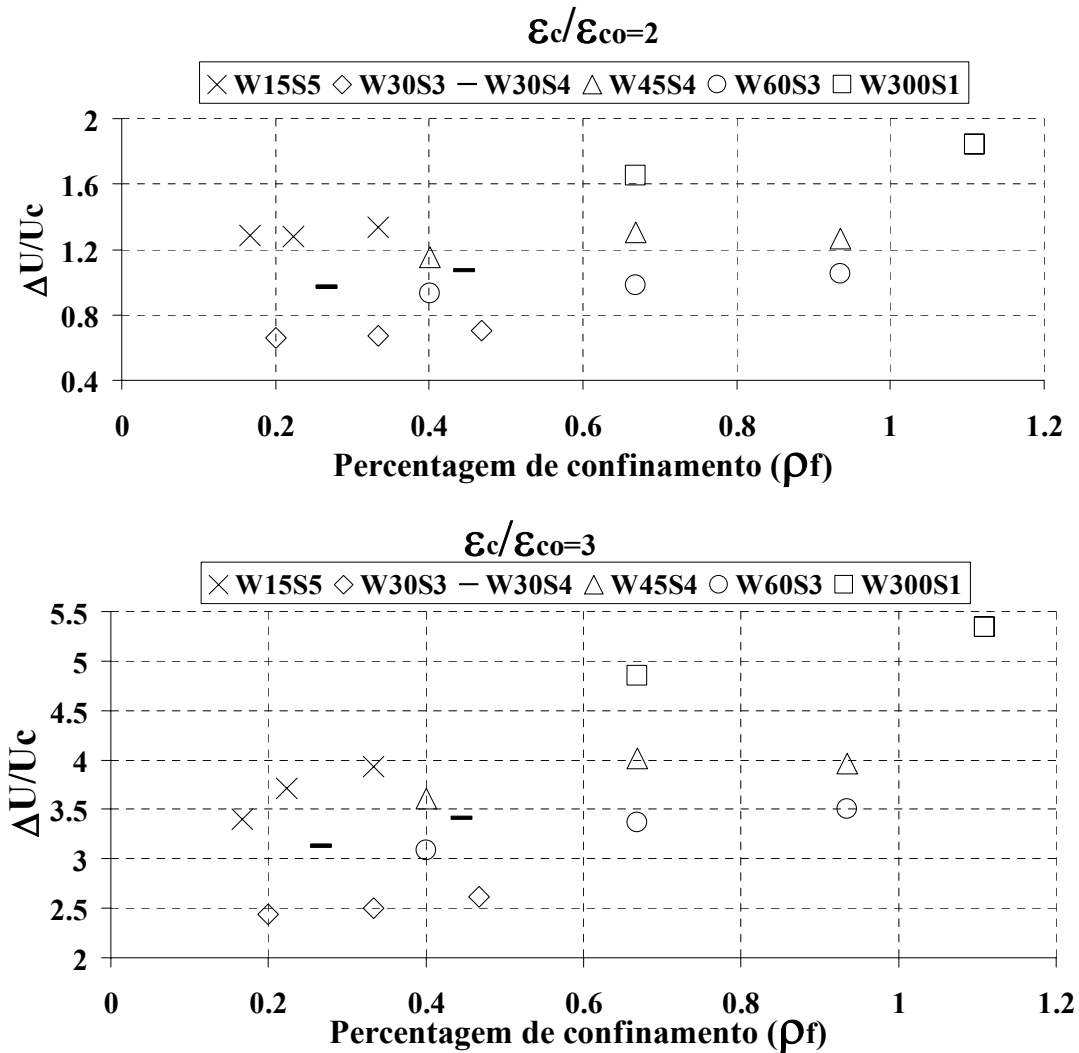


Figura 4.12 – Relação entre  $\Delta U/U_c$  e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) nas séries de ensaios do grupo C23S300 (cont.).

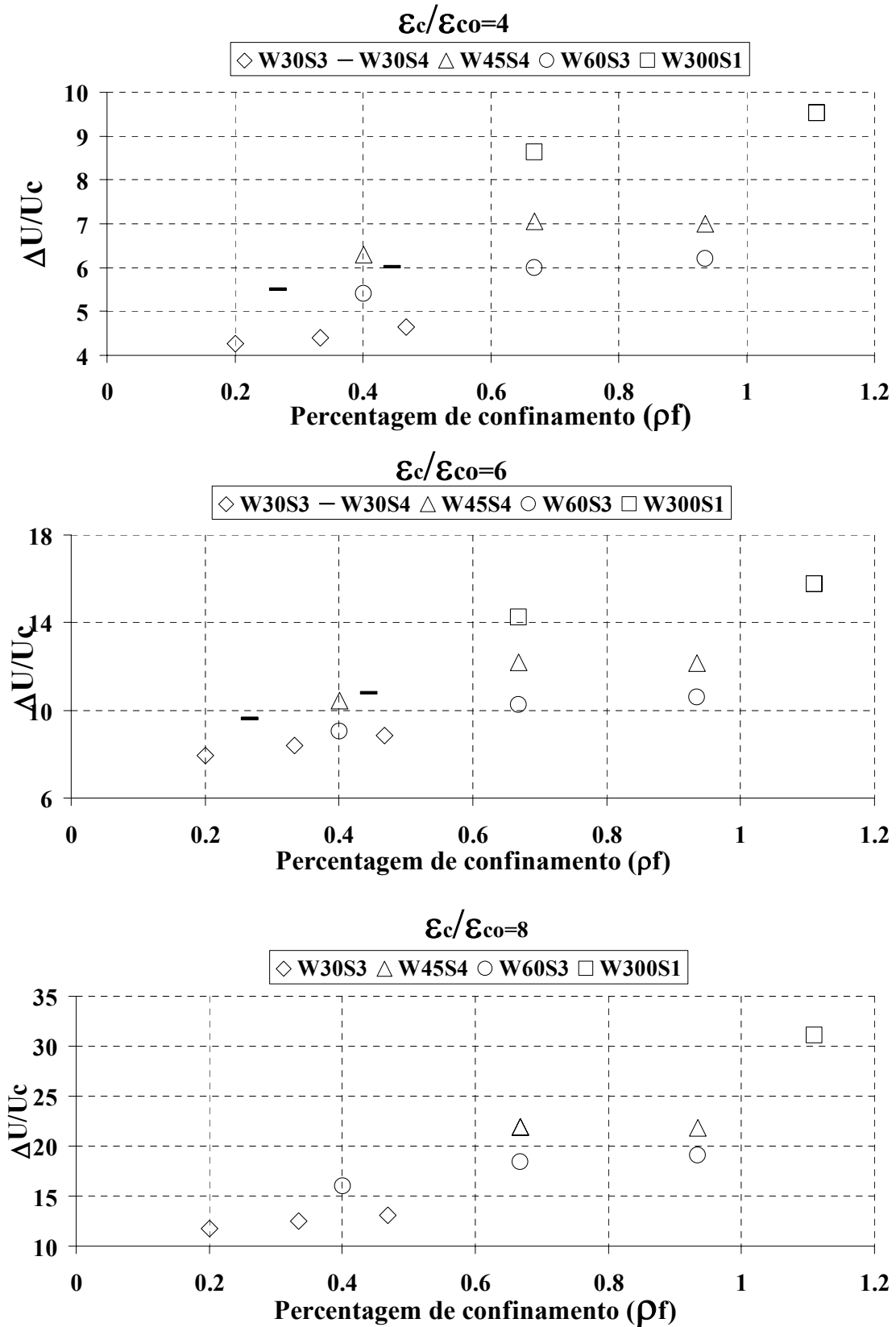


Figura 4.12 (cont.) – Relação entre  $\Delta U/U_c$  e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) nas séries de ensaios do grupo C23S300.

Da análise dos gráficos apresentados na Figura 4.12 observa-se que:

- A capacidade de absorção de energia aumenta com  $\rho_f$ .
- O incremento de  $\Delta U/U_c$  foi mais pronunciado nas séries W60S3 e W45S4.
- Para níveis de deformação duas vezes superiores à deformação correspondente à tensão máxima dos provetes não confinados ( $\varepsilon_c/\varepsilon_{c0}=2$ ),  $\Delta U/U_c$  é inferior a 1.3, à excepção do sistema de confinamento W300S1. Para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{c0}=8$ ,  $\Delta U/U_c$  varia de 12 a 32, para  $\rho_f$  de 0.2 a 1.11.
- Apesar de igual  $\rho_f$ , a série W45S4 é mais efectiva em termos de capacidade de absorção de energia.
- Para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{c0}=8$ , a capacidade de absorção de energia registada nos provetes da série W45S4 não aumentou com o aumento de  $\rho_f$  (aumento do número de camadas de 5 para 7).
- Para extensões de cerca de 10%, isto é, para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{c0}=4$ , que é um valor de extensão que pode ocorrer em alguns elementos de betão reforçados quando submetidos à acção sísmica,  $\Delta U/U_c$  varia de 4 a 6, que são incrementos significativos de absorção de energia, proporcionando aumentos consideráveis da segurança desses elementos.

#### 4.2.6 Gráficos $\sigma/\sigma_{\text{conf,L3,5}}$ versus $\rho/\rho_{\text{conf,L3,5}}$

Na Figura 4.13 representa-se a relação entre a tensão máxima nos vários sistemas confinados com 3 camadas,  $\sigma_c/\sigma_{c,L3}$ , e a tensão máxima nos provetes totalmente confinados com 3 camadas (full wrapping), para distintos  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  e para os níveis de extensão,  $\varepsilon_c/\varepsilon_{c0}$ , que se têm vindo a considerar, em que  $\rho_{f,L3}$  é a percentagem de confinamento do sistema totalmente confinado com 3 camadas. Na Figura 4.14 efectua-se a mesma análise, mas agora para os sistemas de confinamento constituídos por cinco camadas. Com estes gráficos pretende-se ilustrar a eficácia dos sistemas de confinamento parcial em comparação com o sistema de confinamento total.

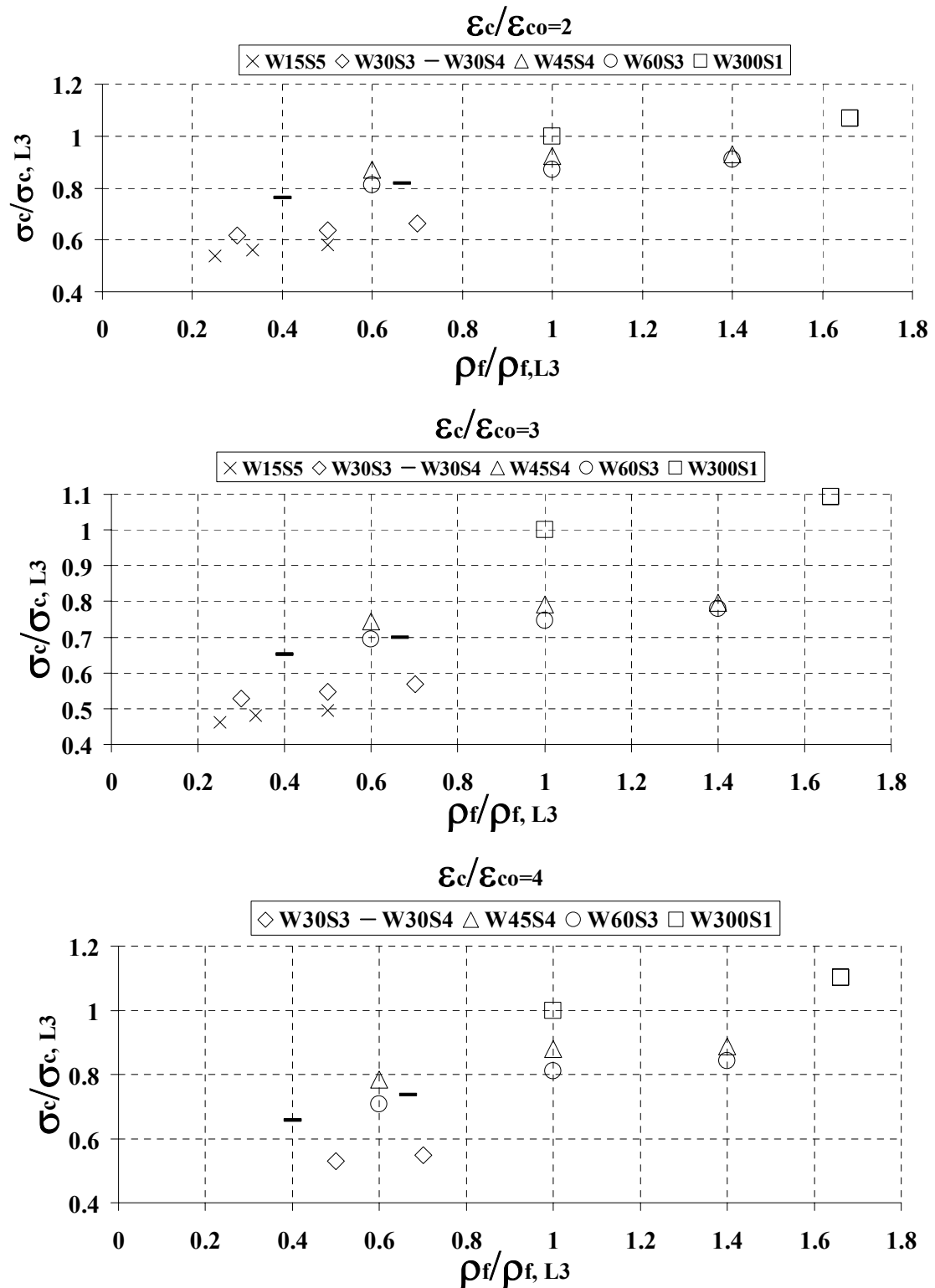


Figura 4.13 - Gráficos  $\sigma_c/\sigma_{c,L3}$  versus  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  nas séries de ensaios do grupo C23S300 (cont.).

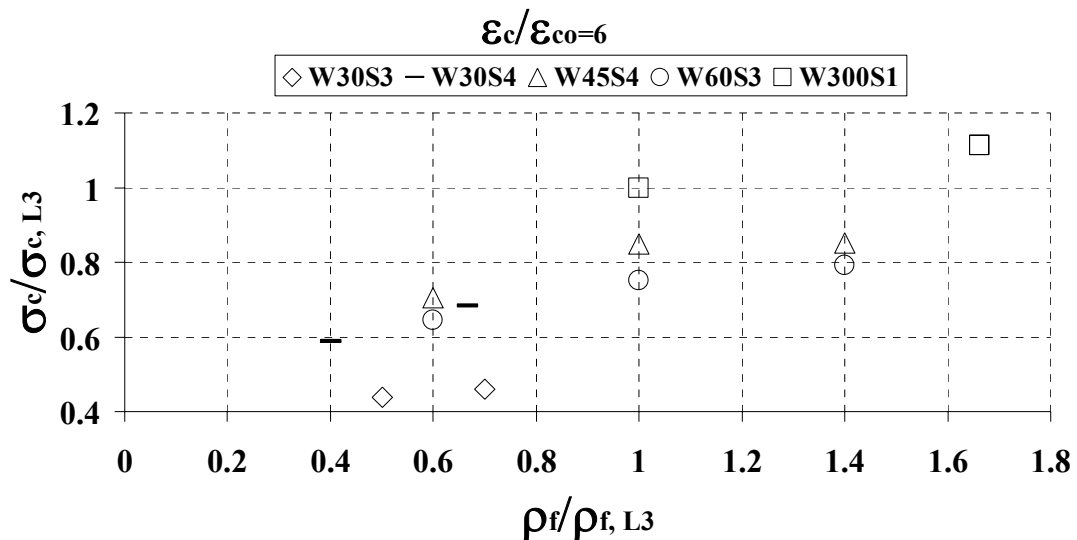


Figura 4.13 (cont.) – Gráficos  $\sigma_c/\sigma_{c,L3}$  versus  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  nas séries de ensaios do grupo C23S300.

Da análise dos gráficos da Figura 4.13 observa-se que:

- Para níveis de deformação duas vezes superiores à deformação correspondente à tensão nos provetes não confinados ( $\varepsilon/\varepsilon_{cp}=2$ ) as séries W15 e W30 são pouco eficazes. As séries W45S4 e W60S3 tiveram incrementos de capacidade de carga apenas ligeiramente inferiores aos obtidos para os provetes totalmente reforçados (menos de 10%).
- Para níveis de deformação três, quatro e seis vezes superiores a  $\varepsilon_{c0}$  ( $\varepsilon_c/\varepsilon_{c0}$  de 3, 4, 6), as séries têm um comportamento semelhante ao descrito anteriormente. No entanto, a eficácia relativa dos sistemas de confinamento W45S4 e W60S3 baixaram um pouco, sendo agora da ordem dos 80 a 90% da eficácia do sistema W300S1.

Na Figura 4.14 o quociente  $\sigma_c/\sigma_{c,L5}$  representa a tensão máxima registada ( $f_{cc}$ ) nas séries W30S3, W30S4, W45S4, W60S3 e W300S1 dividida pela tensão máxima obtida nos provetes totalmente confinados com 5 camadas ( $\sigma_{c,L5}$ ), W300S1L5. O quociente  $\rho_f/\rho_{f,L5}$ , representa a percentagem de confinamento de cada uma das séries W30S3, W30S4, W45S4 e W60S3 dividida pela percentagem de confinamento dos provetes totalmente confinados com 5 camadas, W300S1L5.

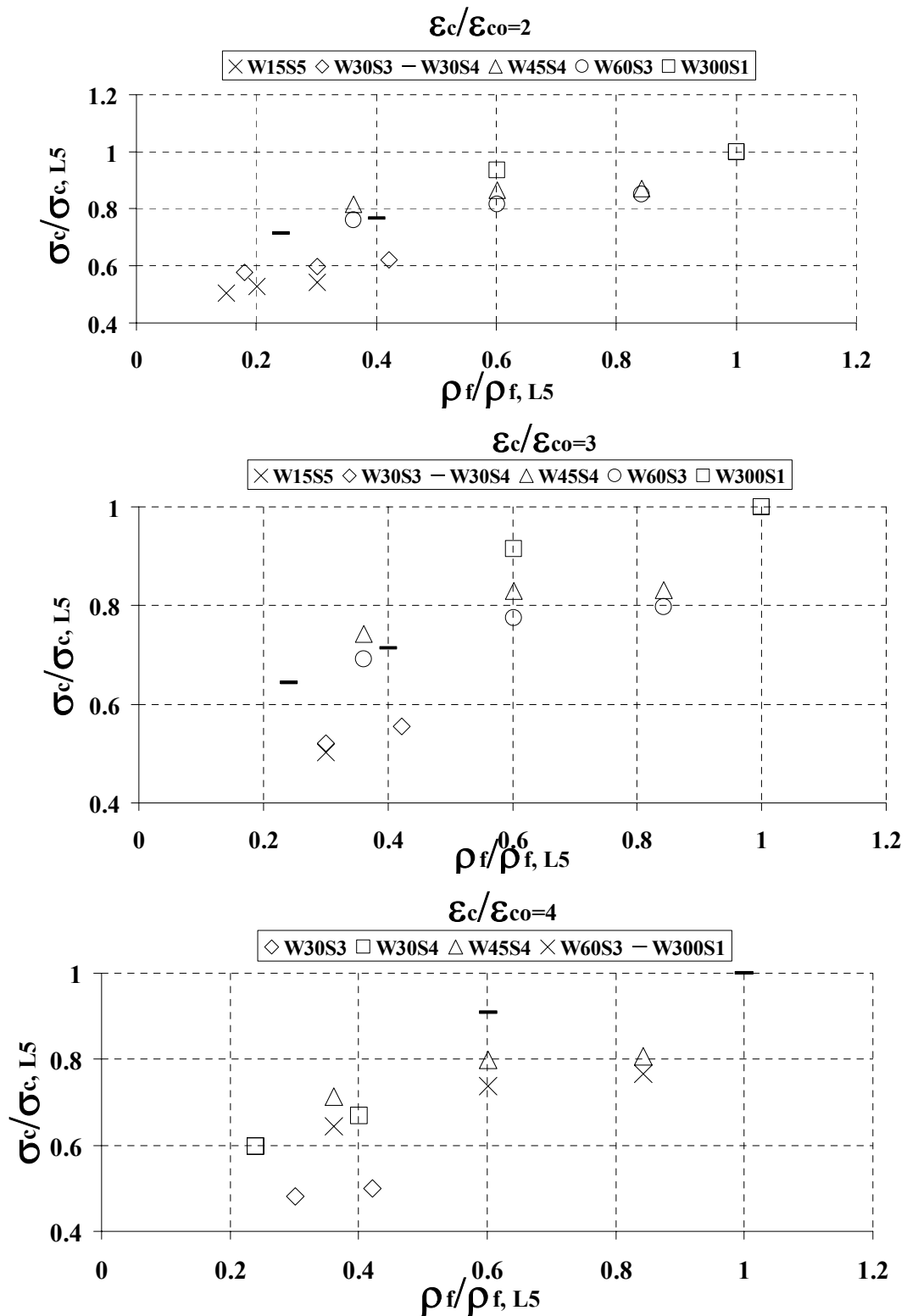


Figura 4.14 - Gráficos  $\sigma_c/\sigma_{c,L5}$  versus  $\rho_f/\rho_{f,L5}$  nas séries de ensaios do grupo C23S300 (cont).

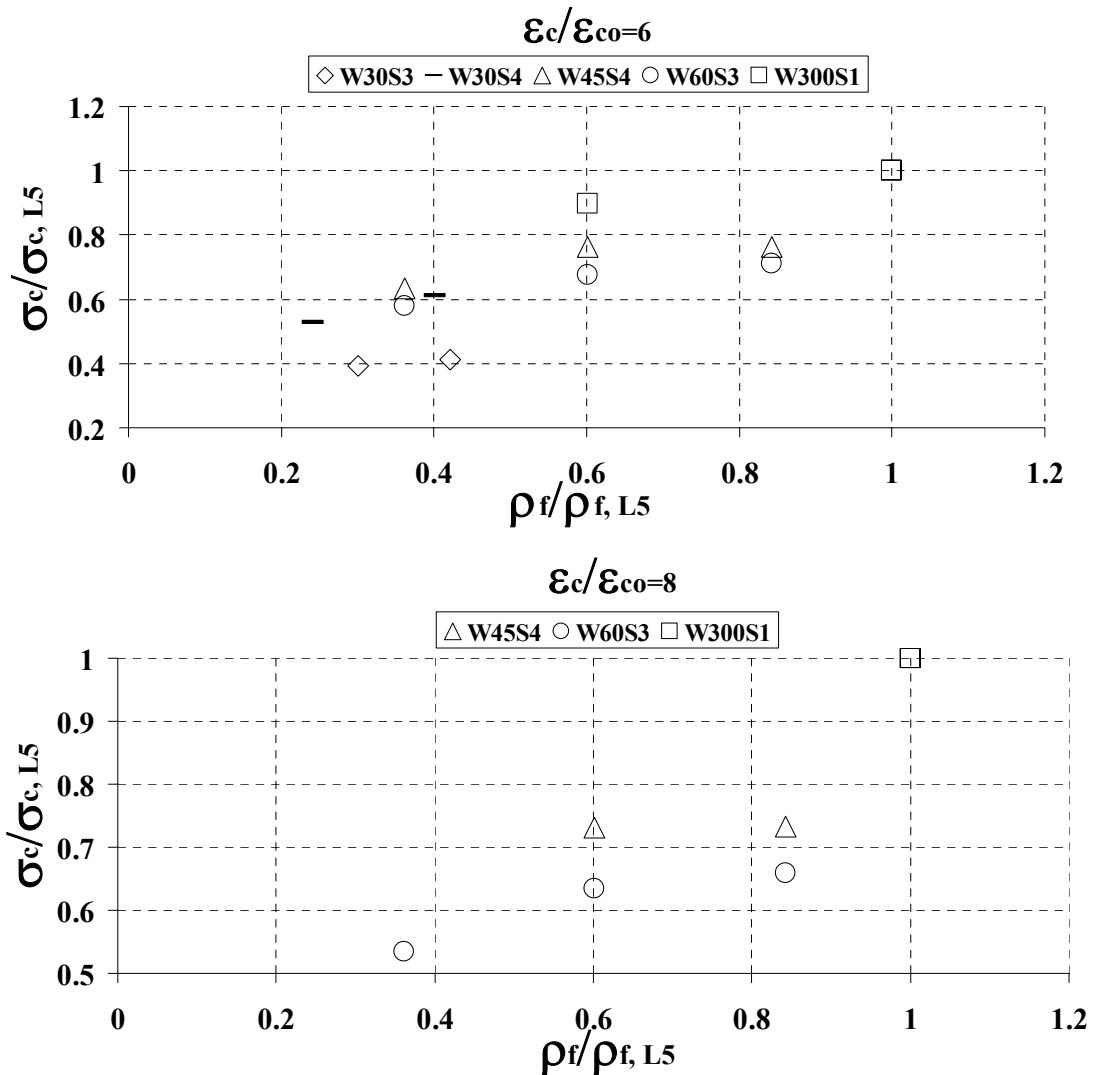


Figura 4.14 (cont.) – Gráficos  $\sigma_c/\sigma_{c,L5}$  versus  $\rho_f/\rho_{f,L5}$  nas séries de ensaios do grupo C23S300.

Da análise dos gráficos da Figura 4.14 observa-se que:

- O desempenho dos sistemas de confinamento parcial em relação ao do sistema de confinamento com 5 camadas é ligeiramente inferior ao obtido no caso anterior em que foi utilizado como base de referência o confinamento total com 3 camadas.
- Para níveis de deformação duas vezes superiores à deformação correspondente à tensão máxima nos provetes não confinados ( $\epsilon_c/\epsilon_{co}=2$ ) os níveis de eficácia relativa nos sistemas de confinamento variaram de 80% a 90% .
- A eficácia relativa dos sistemas de confinamento parcial diminuiu com o aumento de  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$ .
- Dos sistemas de confinamento parciais, W45S4 e W60S3 são os que apresentam maiores níveis de eficácia relativa.

- Para cinco camadas, os sistemas W45S4 e W60S3 apresentam uma eficácia relativa que varia entre 70% a 90%.

#### 4.2.7 Índice de rentabilidade

Na Figura 4.15 apresenta-se o índice de rentabilidades (IR) para distintos  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  e para os níveis de extensão,  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$ , que se têm vindo a considerar, em que  $\rho_{f,L3}$  é a percentagem de confinamento do sistema totalmente confinado com 3 camadas e  $\rho_f$  é a percentagem de CFRP dos distintos arranjos de confinamento considerado neste trabalho.

O índice de rentabilidades (IR) determina-se segundo a equação 4.3 em que  $\sigma_c$  é a tensão máxima nos vários sistemas confinados com 3 camadas e  $\sigma_{c,L3}$  é tensão máxima nos provetes totalmente confinados com 3 camadas (full wrapping). O factor em denominador na equação 4.3 é o quociente entre a área dum sistema de confinamento parcial ( $S \times W \times L$ ) e a área de CFRP dum confinamento total ( $300 \times L$ ).

$$IR = \frac{\frac{\sigma_c}{\sigma_{c,L3}}}{\frac{S \times W \times L}{300 \times L}} \quad (4.3)$$

em que  $S$  é o número de faixas aplicadas,  $W$  é a largura das faixas e  $L$  é o número de camadas.

Na Figura 4.16 efectua-se a mesma análise, mas agora para os sistemas de confinamento constituídos por cinco camadas. Com estes gráficos pretende-se ilustrar a rentabilidade do sistema de confinamento parcial em comparação com o sistema de confinamento total, sendo a rentabilidade avaliada em termos de incremento da capacidade de carga por quantidade de CFRP aplicado no confinamento.

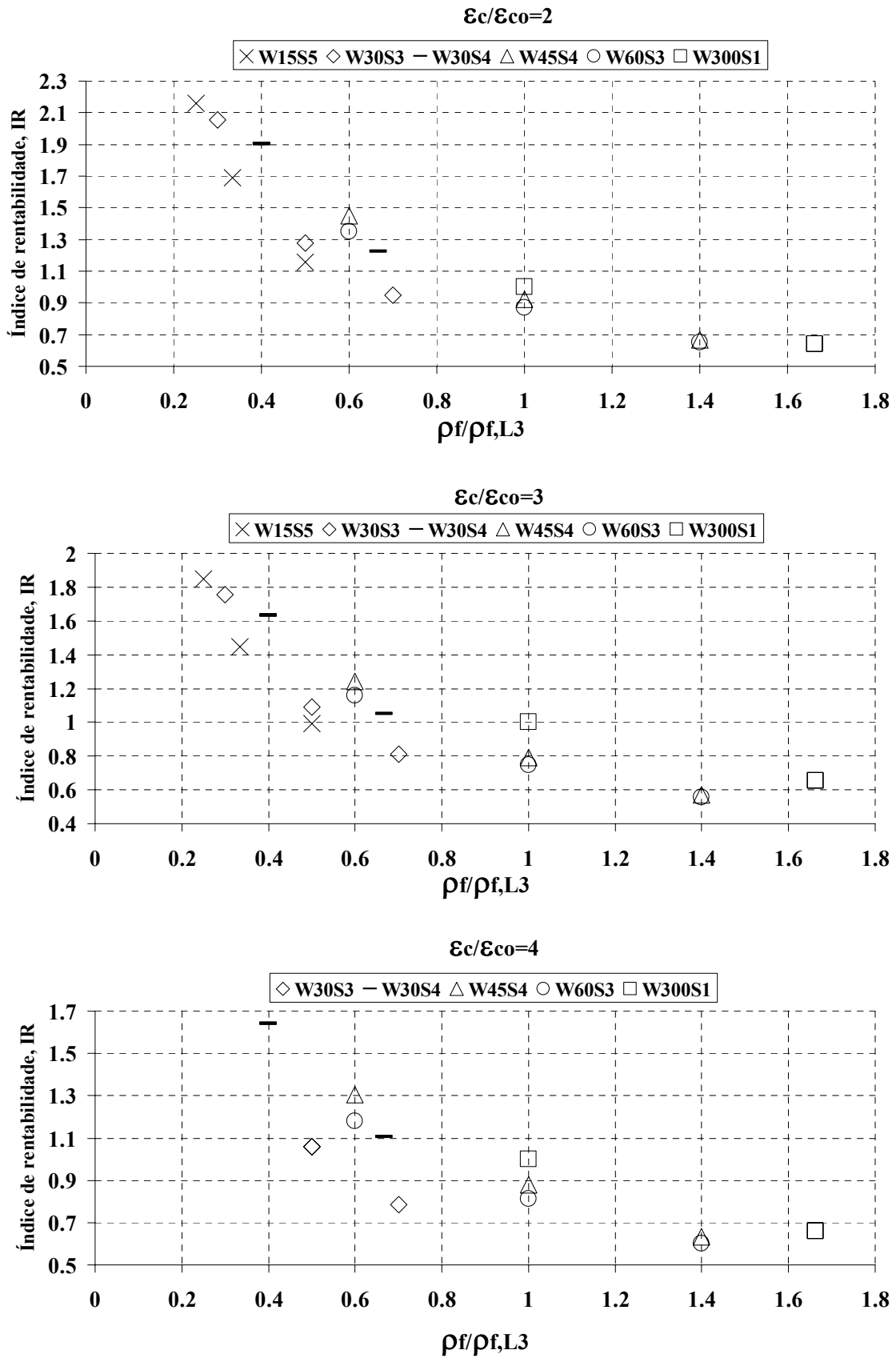


Figura 4.15 – Índice de rentabilidade (IR) versus  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  nas séries de ensaios do grupo C23S300 (cont.).

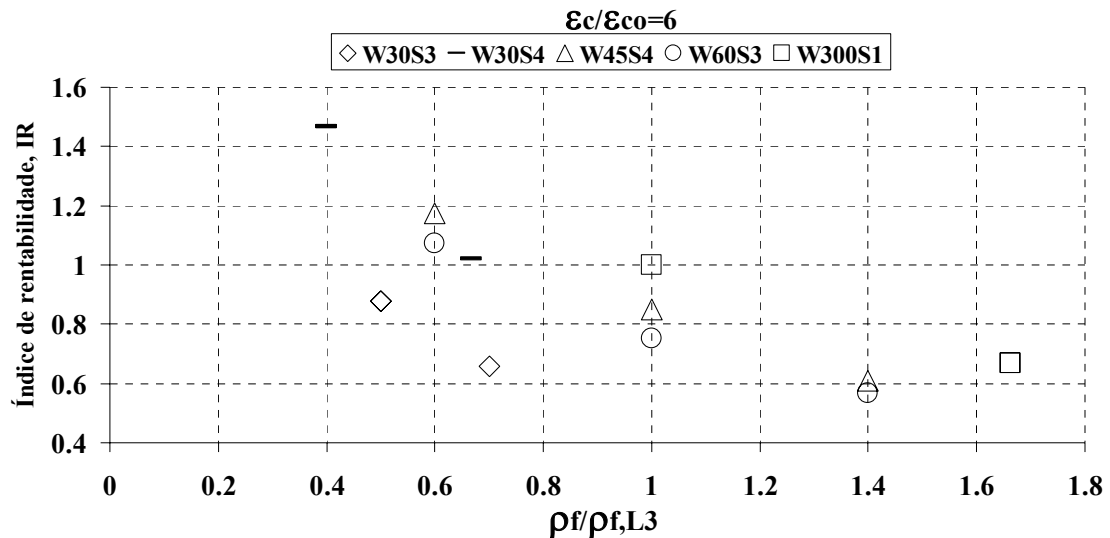


Figura 4.15 (cont.) – Índice de rentabilidade (IR) versus  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  nas séries de ensaios do grupo C23S300.

Da análise dos gráficos da Figura 4.15 observa-se que:

- Para níveis de deformação duas vezes superiores à deformação correspondente à tensão máxima nos provetes não confinados ( $\epsilon_c/\epsilon_{co}=2$ ) as séries W15 e W30 são as mais rentáveis.
- Para níveis de deformação quatro e seis vezes superiores a  $\epsilon_{co}$  ( $\epsilon_c/\epsilon_{co}= 4, 6$ ) a série W30S4 é a que apresenta melhor desempenho em termos de rentabilidade.
- As séries W45S4 e W60S3, apesar de serem confinadas com a mesma percentagem de CFRP, proporcionaram índices de rentabilidade diferentes. A série W45S4 obtém maior rentabilidade porque atinge níveis de capacidade de carga superiores aos da série W60S3.
- O índice de rentabilidade baixa com o aumento dos níveis de deformação.

Na Figura 4.16 apresenta-se o índice de rentabilidades (IR) para distintos  $\rho_f/\rho_{f,L5}$  e para os valores de  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  que se têm vindo a considerar, em que  $\rho_{f,L5}$  é a percentagem de confinamento do sistema totalmente confinado com 5 camadas. O índice de rentabilidades (IR) é determinado através da expressão (4.3) em que o número de camadas,  $L$ , é igual a 5.

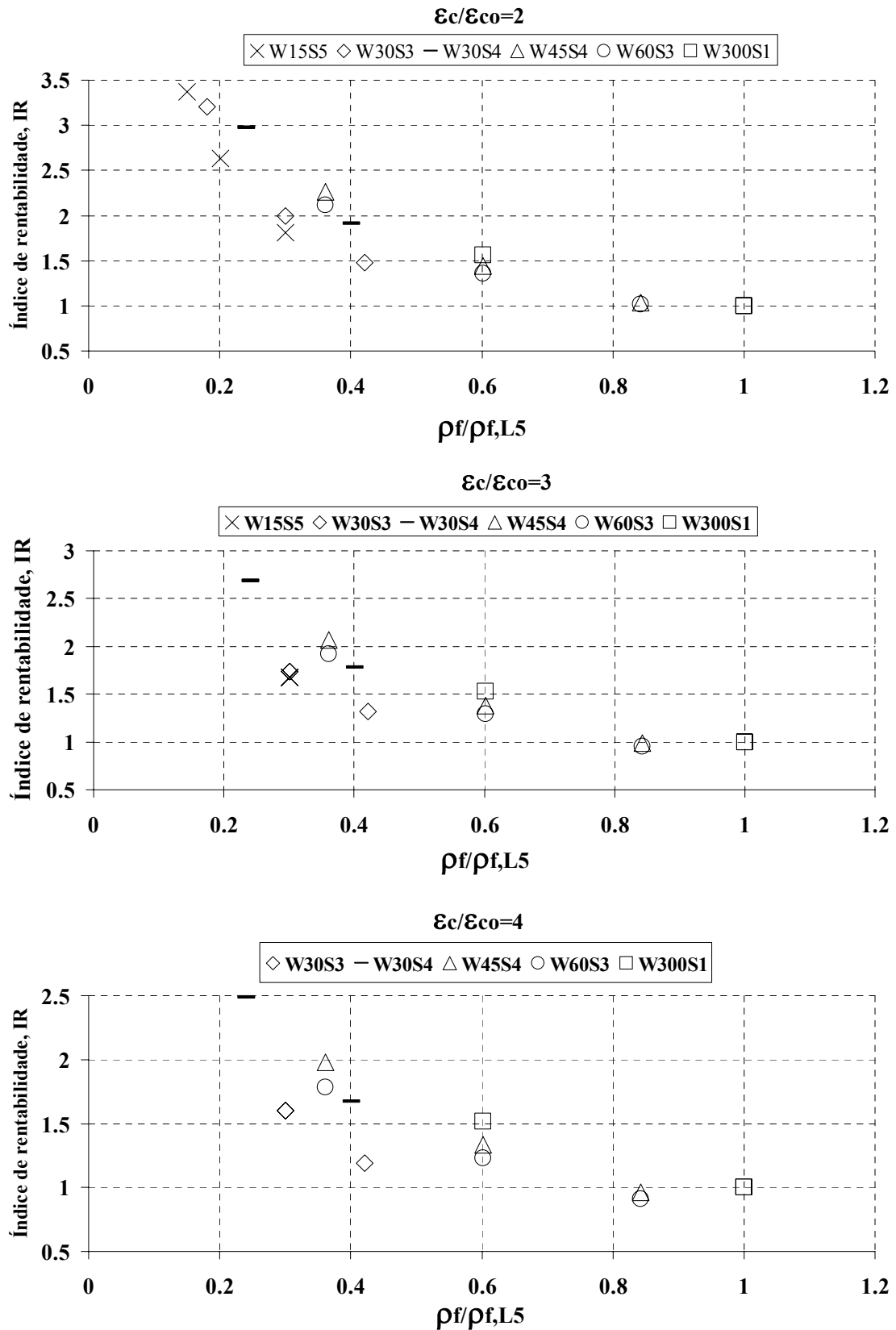


Figura 4.16 – Índice de rentabilidade (IR) versus  $\rho_f/\rho_{f,L5}$  nas séries de ensaios do grupo C23S300 (cont.).

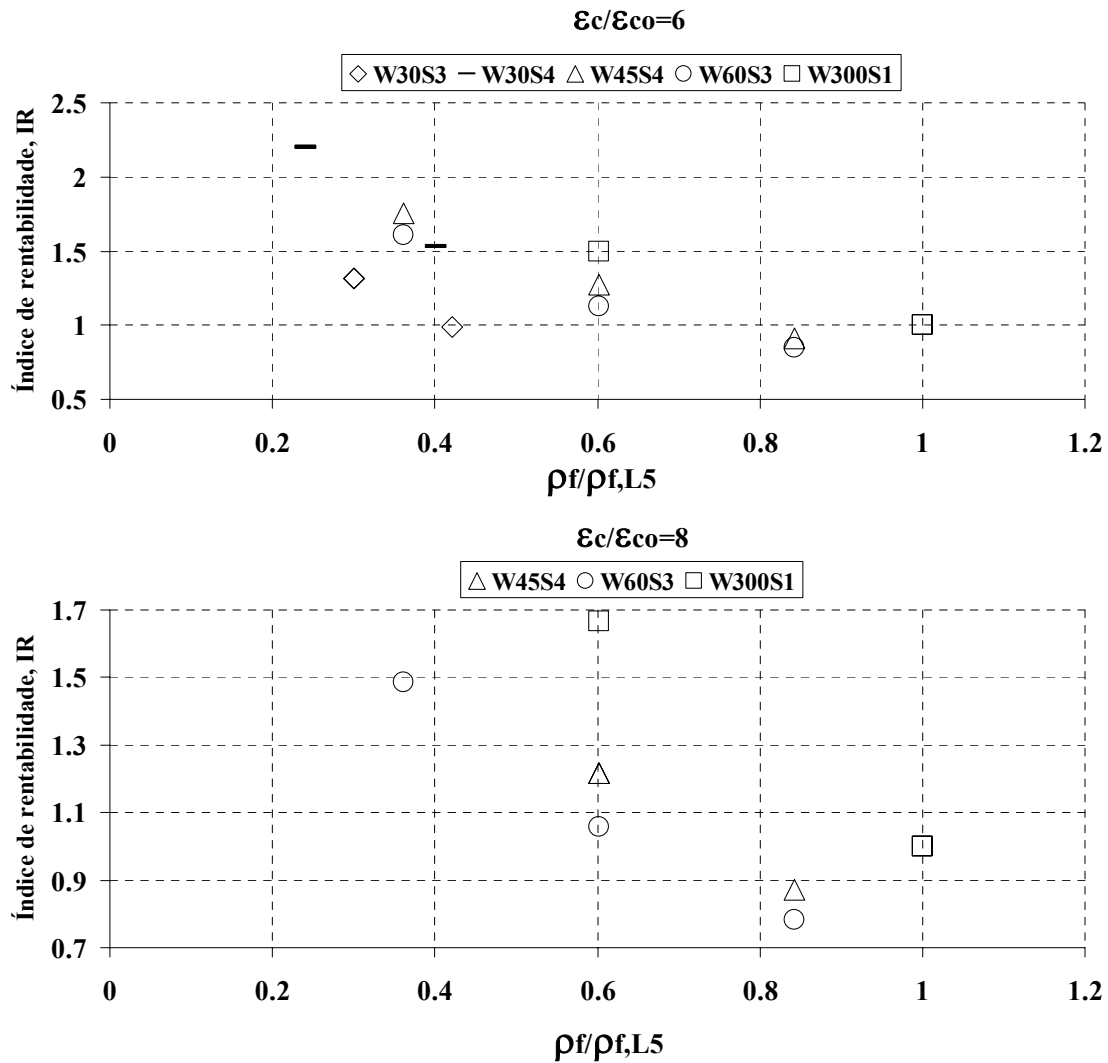


Figura 4.16 (cont.) – Índice de rentabilidade (IR) versus  $\rho_f/\rho_{f,L5}$  nas séries de ensaios do grupo C23S300.

Da análise dos gráficos da Figura 4.16 observa-se que:

- Para níveis de deformação duas vezes superiores à deformação correspondente à tensão máxima nos provetes não confinados ( $\epsilon_c/\epsilon_{co}=2$ ) as séries W15 e W30 são as mais rentáveis.
- Para níveis de deformação três, quatro e seis vezes superiores a  $\epsilon_{co}$  ( $\epsilon_{co}/\epsilon_{co}=3, 4, 6$ ), a série W30S4 é a que apresenta melhor desempenho em termos de rentabilidade.
- As séries W45S4 e W60S3, apesar de serem confinadas com a mesma percentagem de CFRP, proporcionaram índices de rentabilidade diferentes. A série W45S4 obtém maior rentabilidade porque atinge níveis de capacidade de carga superiores aos da série W60S3.
- O índice de rentabilidade é mais elevado nos sistemas confinados com 5 camadas de CFRP do que nos sistemas confinados com 3 camadas de CFRP. Se

os índices de rentabilidade obtidos forem comparados, por exemplo, para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}=2$ , na série W15S5L3 confinadas com 3 camadas, o índice de rentabilidade é de 2.15, enquanto na série confinada com 5 camadas o índice de rentabilidade é de 3.4.

- O índice de rentabilidade baixa com o aumento dos níveis de deformação, o mesmo sucede no caso  $IR-\rho_f/\rho_{f,L3}$ .

### 4.3 Séries de ensaios do grupo C23S200

As séries do grupo C23S200 representam os ensaios realizados em provetes de betão com resistência 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 0.117 mm de espessura efectiva.

#### 4.3.1 Modos de rotura

Na Tabela 4.3 e na Figura 4.17 é feita a caracterização da rotura dos provetes da série de ensaios do grupo C23S200.

Tabela 4.3 – Caracterização da rotura dos provetes da série de ensaios do grupo C23S200.

Betão confinado com <b>4</b> faixas de CFRP com <b>45mm</b> de largura	
3 camadas	Rotura violenta das cintas do meio.
5 camadas	Rotura violenta das duas cintas do meio. Provetes muito danificados no fim do ensaio.
Betão confinado com <b>3</b> faixas de CFRP com <b>60mm</b> de largura	
3 camadas	Rotura violenta da cinta do meio. Betão muito danificado entre cintas.
5 camadas	Rotura violenta da cinta do meio. Betão muito danificado entre cintas.
Betão totalmente confinado com CFRP	
3 camadas	Rotura muito violenta do CFRP. Betão muito danificado.
5 camadas	Rotura extremamente violenta do CFRP. Betão muito danificado.

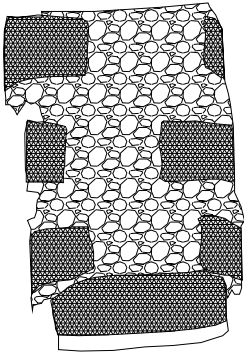
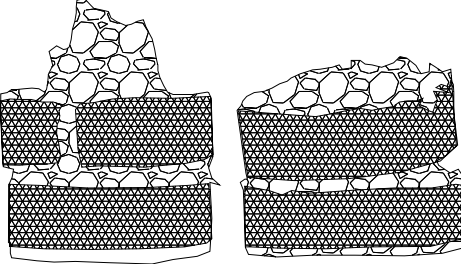
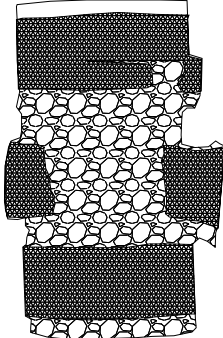
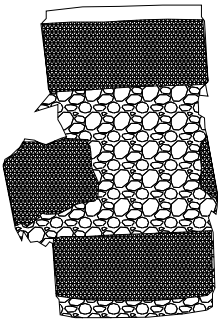
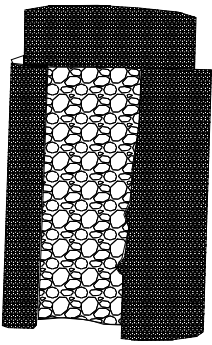
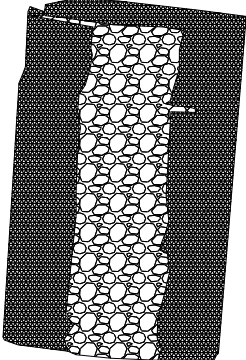
<b>Provetes confinados com 4 faixas de CFRP de 45mm de largura</b>		
3 camadas	5 camadas	Observações
		Rotura muito violenta das faixas centrais. No fim dos ensaios o betão dos provetes ficou muito danificado. Em alguns restaram as extremidades do provete com forma tronco-cónica.
<b>Provetes confinados com 3 faixas de CFRP de 60mm de largura</b>		
3 camadas	5 camadas	Observações
		Rotura muito violenta da faixa central. No fim dos ensaios o betão dos provetes ficou muito danificado
<b>Provetes totalmente confinados com CFRP</b>		
3 camadas	5 camadas	Observações
		Rotura extremamente violenta do CFRP. O CFRP rompeu na direcção vertical. O betão desintegrou-se totalmente, sobretudo nos provetes reforçados com 3 camadas, em que apenas ficou o betão que aderiu ao CFRP. Os provetes no fim do ensaio estavam completamente destruídos.

Figura 4.17– Modos de rotura dos provetes do grupo C23S200.

A rotura dos provetes deste grupo foi muito violenta. As faixas de CFRP romperam em todos os tipos de arranjos de confinamento, tendo os provetes ficado muito danificados. O provete reforçado com faixas de 45 mm e 5 camadas ficou cortado ao meio. Na Figura 4.18 pode ver-se o aspecto final de um dos provetes após ter sido ensaiado. O betão no interior do reforço ficou desintegrado. A calote e a base ficaram assentes no reforço. A rede de protecção impediu a projecção de fragmentos de betão. Também se pode verificar que os provetes deslizaram na direcção ortogonal à da carga.

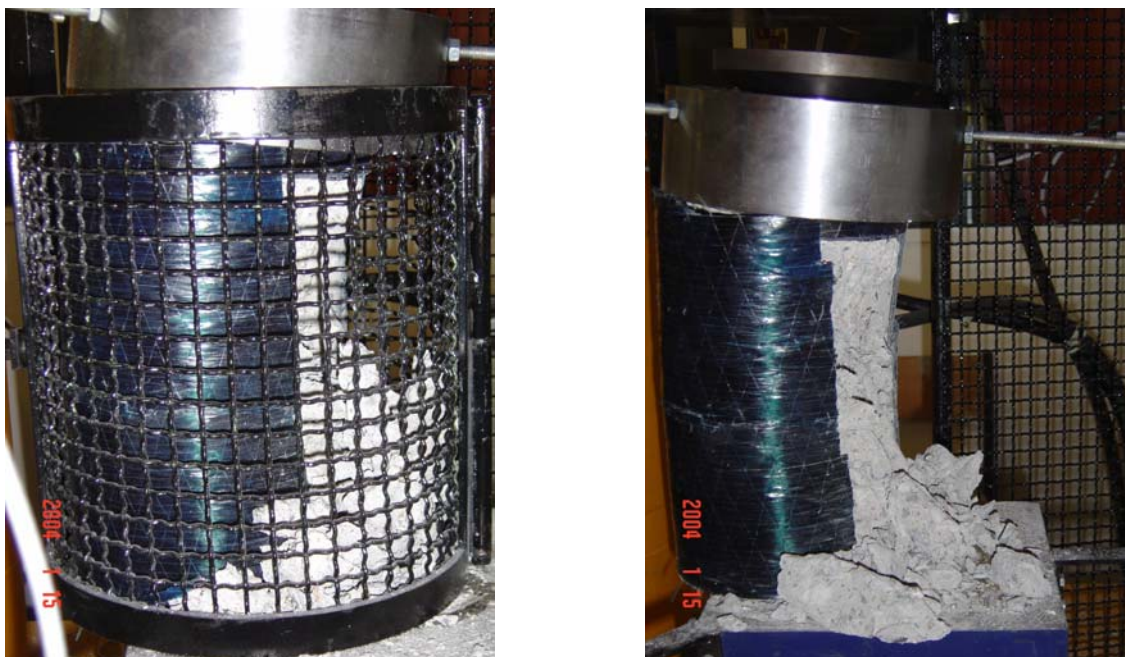


Figura 4.18 – Aspecto final de um dos provetes após ter sido ensaiado.

#### 4.3.2 Síntese dos resultados mais relevantes e curvas tensão-extensão

Na Tabela 4.4 apresentam-se os valores dos indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento do grupo de ensaios C23S200.

Tabela 4.4 - Indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento referentes ao grupo de ensaios C23S200

Designação do provete	S	Tipo betão	Tipo manta	L	$\rho_f$ [%]	$f_{cc}$ (MPa)	$f_{cc}/f_{co}$	$\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$	$\varepsilon_{fmax}/\varepsilon_{fu}$	$\varepsilon_{\bar{f}}/\varepsilon_{fLr}$
Betão simples	-	C35/30	S&P C-240 (200 gm/m <sup>2</sup> )	0	-	38.4( $f_{co}$ )	1.0	1.0	-	-
W45S4L3	4			3	0.26	52.76	1.37	3.14	0.408	1.00
W45S4L5				5	0.44	69.37	1.81	4.55	0.506	0.85
W60S3L3	3			3	0.26	53.13	1.38	3.21	0.518	1.00
W60S3L5				5	0.44	62.63	1.60	4.22	0.504	0.74
W300S1L3	1			3	0.44	74.22	1.93	5.02	0.615	1.00
W300S1L5				5	0.73	90.52	2.36	5.89	0.506	0.70

Na Figura 4.19 representa-se a relação entre a tensão e a extensão axial do provete, bem como com a extensão axial no CFRP das séries do grupo de ensaios C23S200.

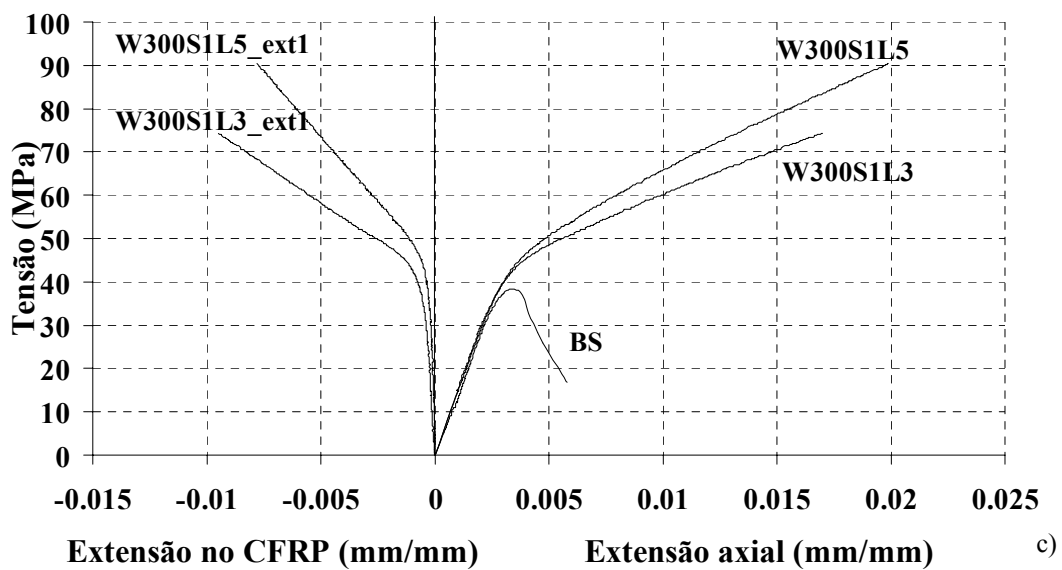
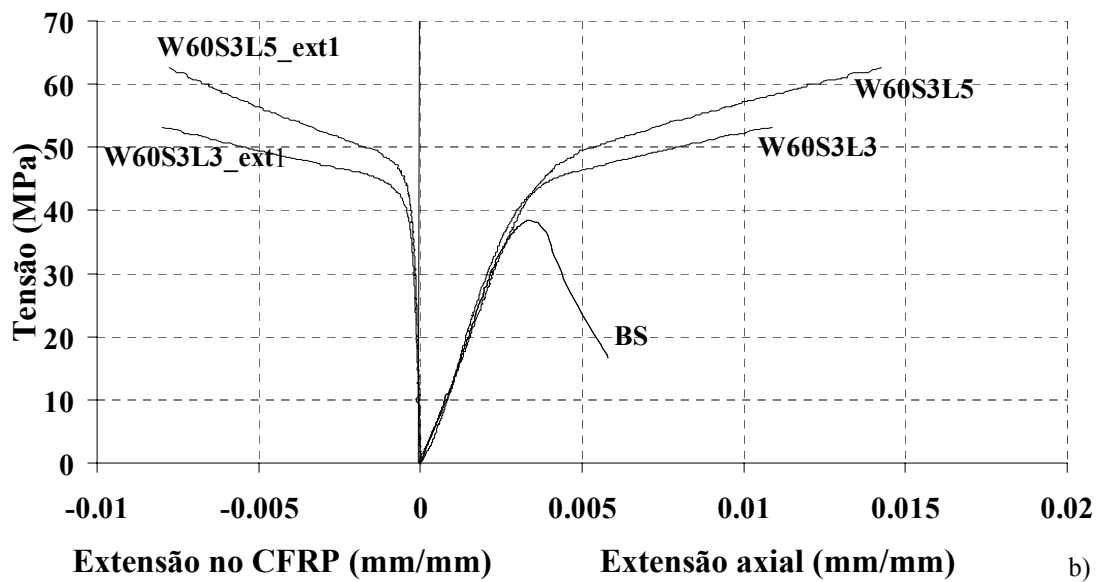
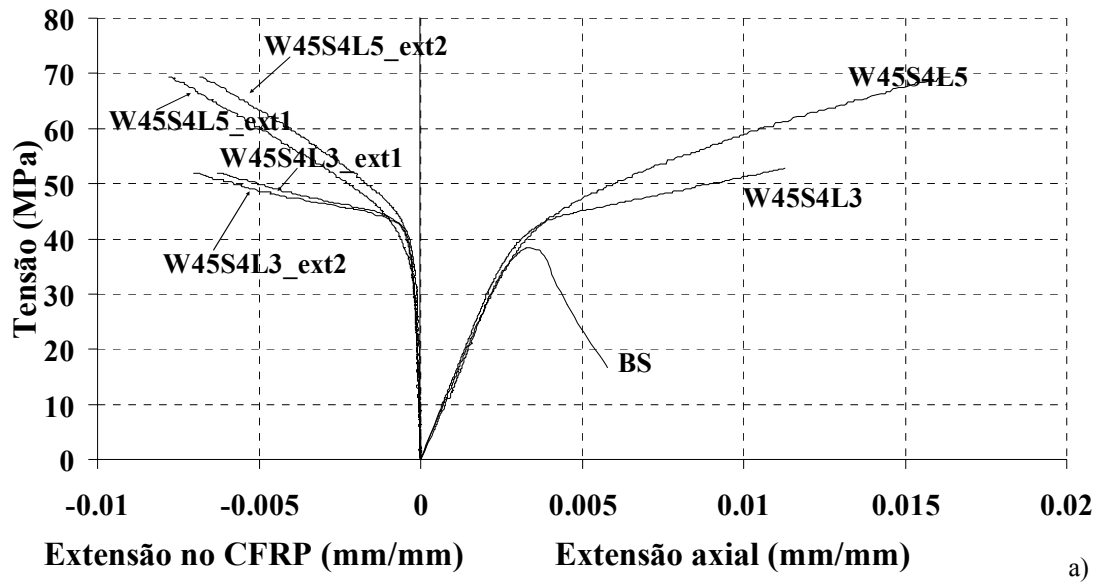


Figura 4.19 - Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries: a) W45S4; b) W60S3; c) W300S1 do grupo C23S200.

Da análise dos valores incluídos na Tabela 4.4 e dos gráficos da Figura 4.19 podem-se extrair 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  $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{c0}$  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  $\rho_f$  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 das 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.

#### 4.3.3 Curvas $\sigma_c/f_{c0}$ versus $\varepsilon_c/\varepsilon_{c0}$

Na Figura 4.20 representam-se as curvas  $\sigma_c/f_{c0}$  versus  $\varepsilon_c/\varepsilon_{c0}$  para as séries do grupo C23S200.

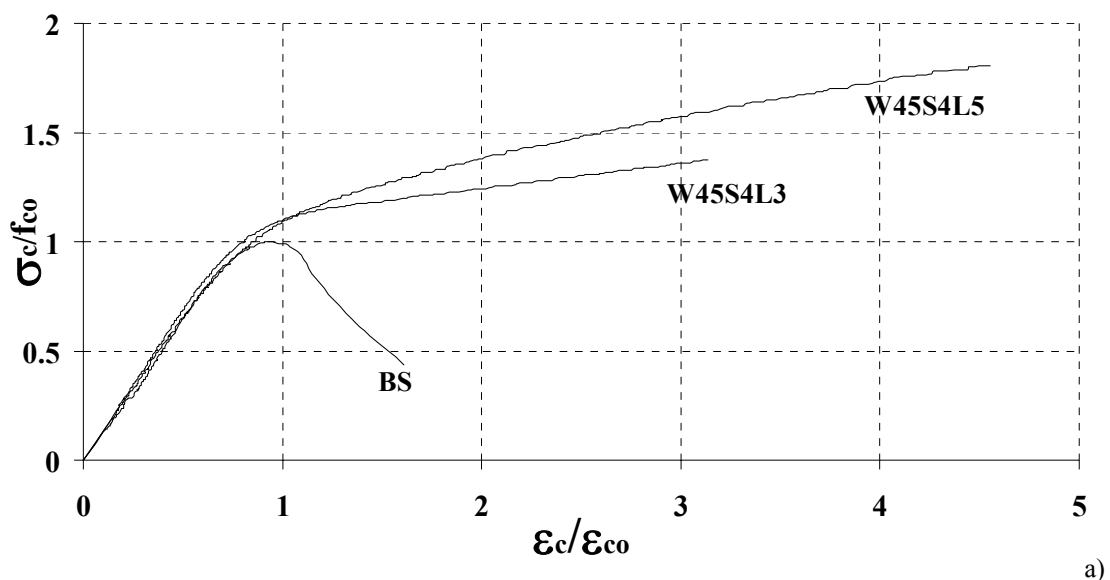


Figura 4.20 – Curvas  $\sigma_c/f_{c0}$  versus  $\varepsilon_c/\varepsilon_{c0}$  nas séries de ensaios do grupo C23S200 (cont.).

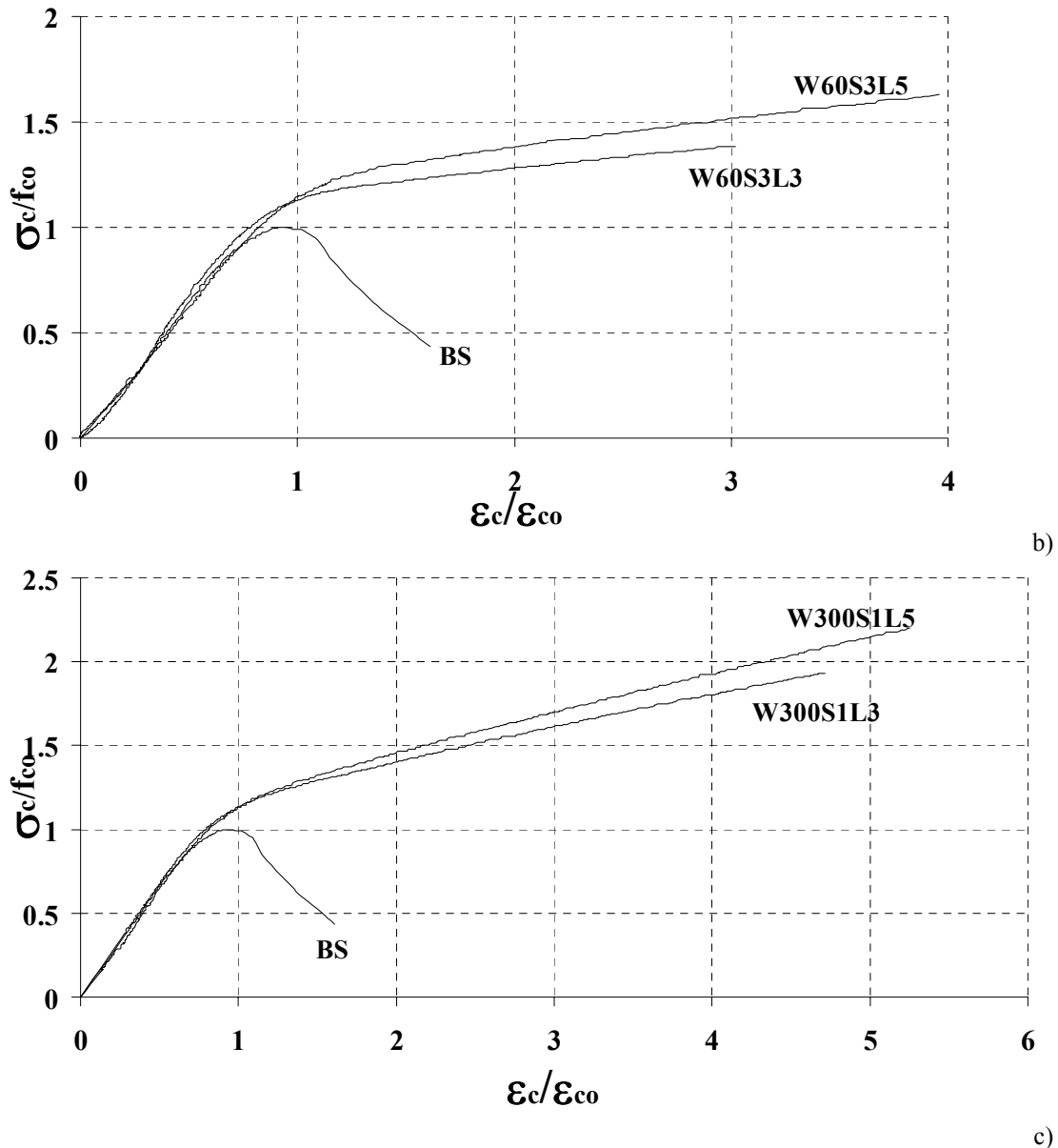


Figura 4.20 (cont.) – Curvas  $\sigma_c/f_{co}$  versus  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  nas séries de ensaios do grupo C23S200.

O incremento de  $\sigma_c/f_{co}$  e de  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  nas séries W45S4L3 foi de 1.4 e 3. Para a mesma série mas com 5 camadas estes aumentos foram de 1.8 e 4.5. Para as séries W60S3L3 e W60S3L5 a capacidade de carga aumentou 40% e 60%, respectivamente, enquanto  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  aumentou 3 e 4 vezes, respectivamente.

Na série de provetes totalmente confinados, W300S1, a capacidade de carga duplicou e  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  foi 5 vezes superior aos valores registados nos provetes de betão simples.

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

Na Figura 4.21 representa-se a relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e  $\rho_f$ , para  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  de 2, 3 e 4 nas séries de ensaios do grupo C23S200. 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.

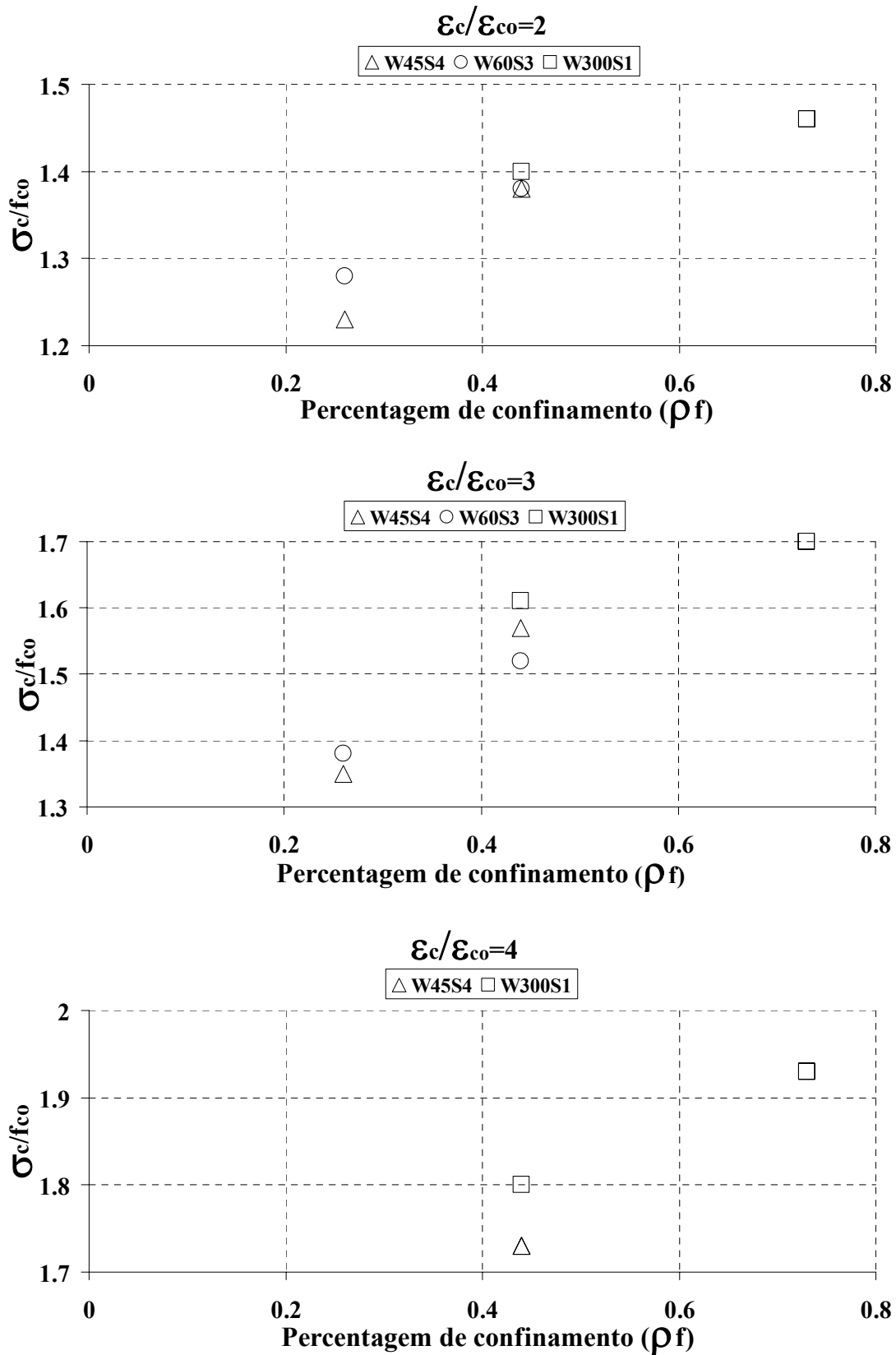


Figura 4.21 – Relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) nas séries de ensaios do grupo C23S200.

Os resultados gráficos apresentados na Figura 4.21 reforçam os resultados numéricos sintetizados na Tabela 4.4, ou seja:

- A capacidade de carga aumenta com a percentagem de confinamento;
- As séries W45S4 e W60S3 apresentam comportamento similar;
- Para igual  $\rho_f$ ,  $\sigma_c/f_{co}$  é similar, havendo contudo um ligeiro aumento com a diminuição da distância entre faixas (menor volume de betão não confinado).

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

Na Figura 4.22 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 e 4. O modo como o  $\Delta U$  e  $U_c$  foram obtidos está descrito na secção 4.2.5.

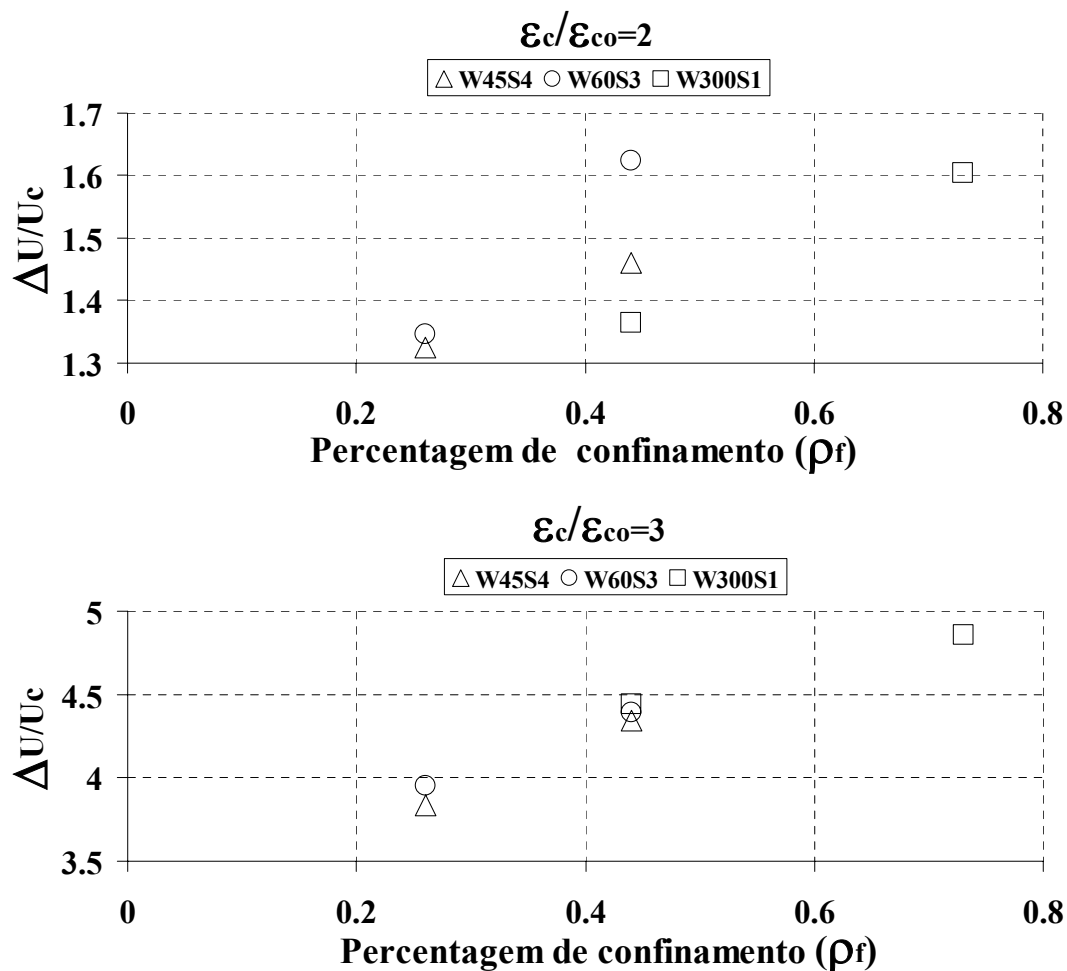


Figura 4.22 – Relação entre  $\Delta U/U_c$  e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) nas séries de ensaios do grupo C23S200 (cont.).

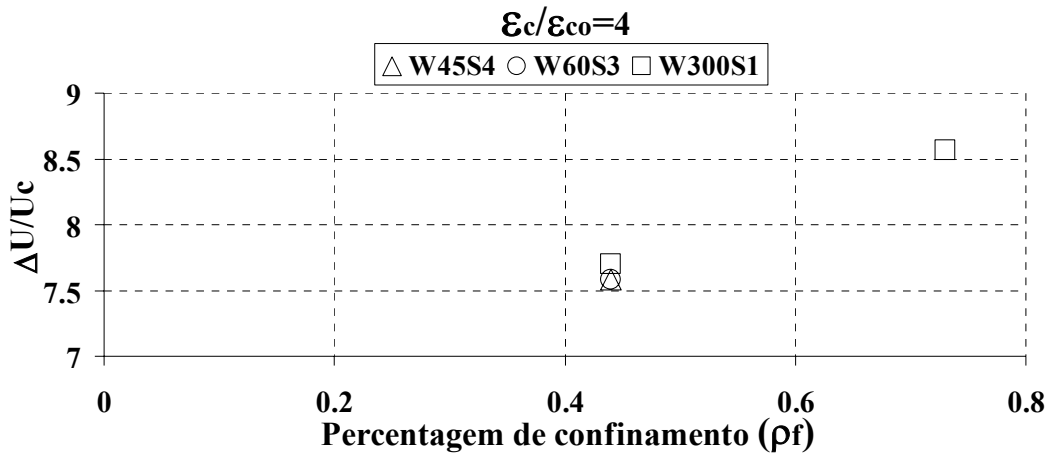


Figura 4.22 (cont.) – Relação entre  $\Delta U/U_c$  e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) nas séries de ensaios do grupo C23S200.

Da análise dos gráficos apresentados na Figura 4.22 verifica-se que:

- A capacidade de absorção de energia aumenta com  $\rho_f$ ;
- O valor médio de  $\Delta U/U_c$  é aproximadamente igual 1.5 e 8 para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  de 2 e 4, respectivamente;
- Quer para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}=3$  como para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}=4$ , para a mesma percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ), o aumento da capacidade de absorção de energia foi semelhante em todas as séries.

#### 4.3.6 Gráficos $\sigma_c/\sigma_{c,L3,5}$ versus $\rho_f/\rho_{f,L3,5}$

Na Figura 4.23 representa-se a relação entre  $\sigma_c/\sigma_{c,L3}$  e  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  de 2, 3 e 4, em que o significado de  $\sigma_{c,L3}$  e  $\rho_{f,L3}$  foi apresentado na secção 4.2.6.

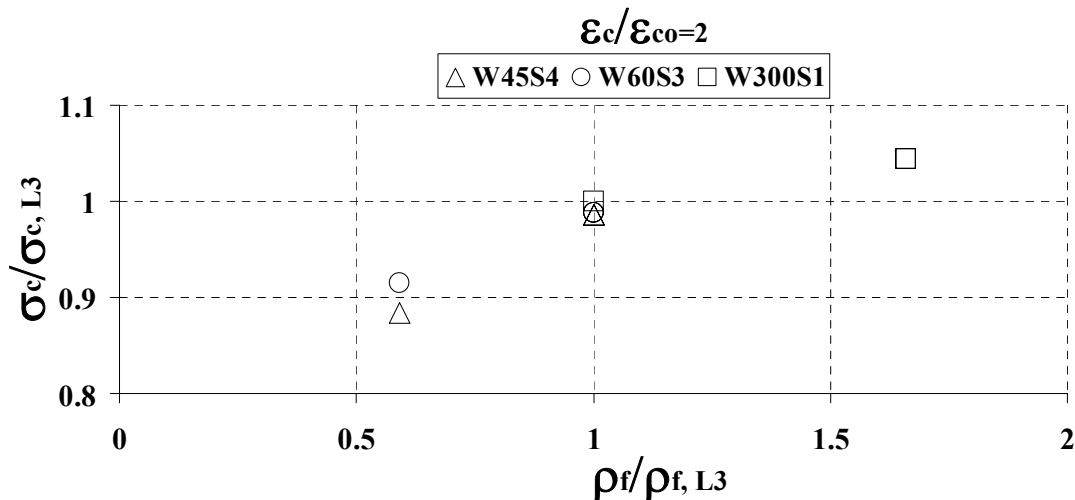


Figura 4.23 - Relação entre  $\sigma_c/\sigma_{c,L3}$  e  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  nas séries de ensaios do grupo C23S200 (cont.).

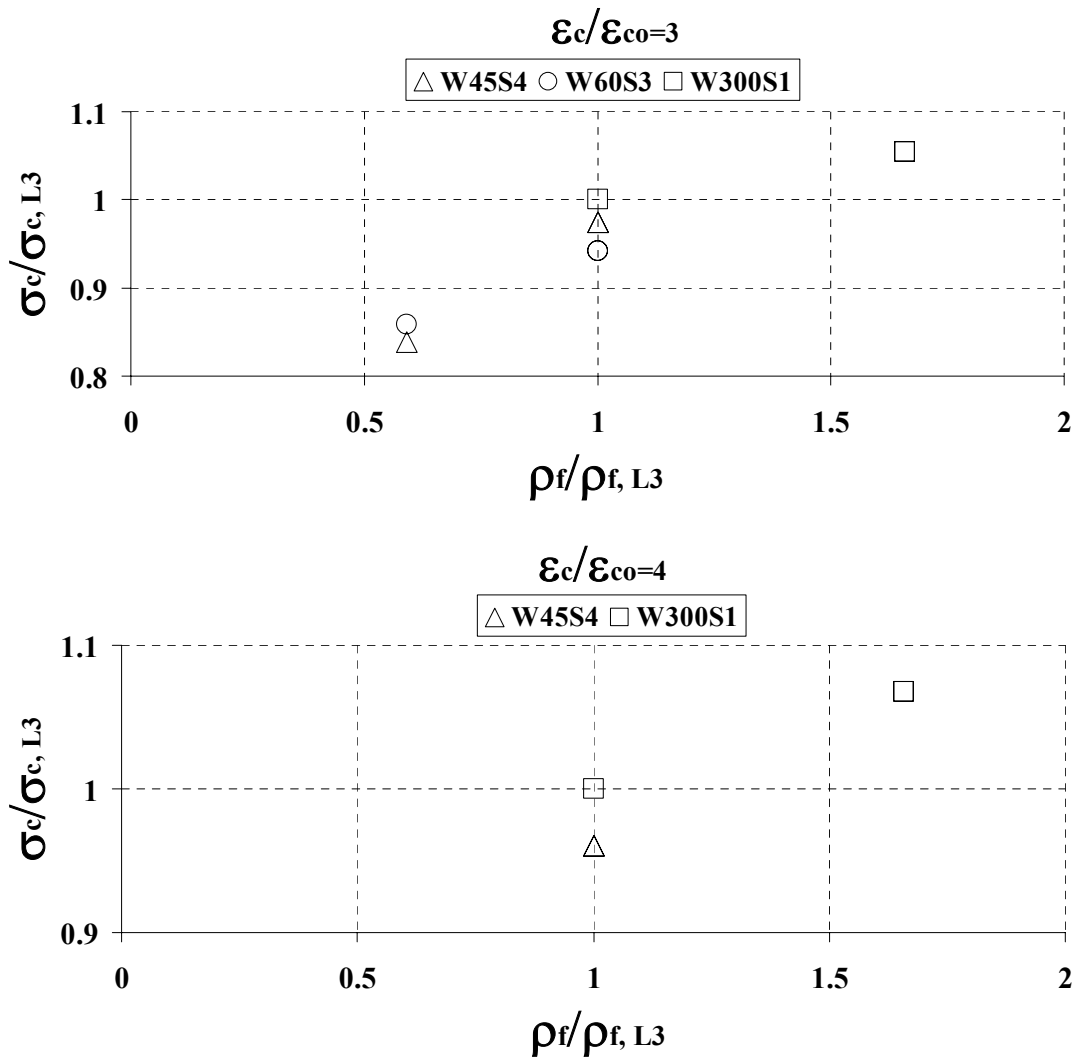


Figura 4.23 (cont.) – Relação entre  $\sigma_c/\sigma_{c,L3}$  e  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  nas séries de ensaios do grupo C23S200.

Da análise dos gráficos da Figura 4.23 verifica-se que:

- Para  $\epsilon_c/\epsilon_{co}=2, 3$  as séries W45S4L5 e W60S3L5 tiveram incrementos de capacidade de carga similares aos obtidos nos provetes totalmente confinados, enquanto nas séries W45S4L3 e W60S3L3 houve uma diminuição de cerca de 10%.
- Nas séries com arranjos discretos de faixas de CFRP, apenas a série W45S4L5 conseguiu atingir o nível de deformação  $\epsilon_c/\epsilon_{co}=4$ , tendo-se registado um aumento de carga similar ao obtido na série totalmente confinada com 3 camadas.

Na Figura 4.24 representa-se a relação entre  $\sigma_c/\sigma_{c,L5}$  e  $\rho_f/\rho_{f,L5}$  para  $\epsilon_c/\epsilon_{co}=2, 3$  e 4, em que o significado de  $\sigma_{c,L5}$  e de  $\rho_{f,L5}$  foi apresentado na secção 4.2.6.

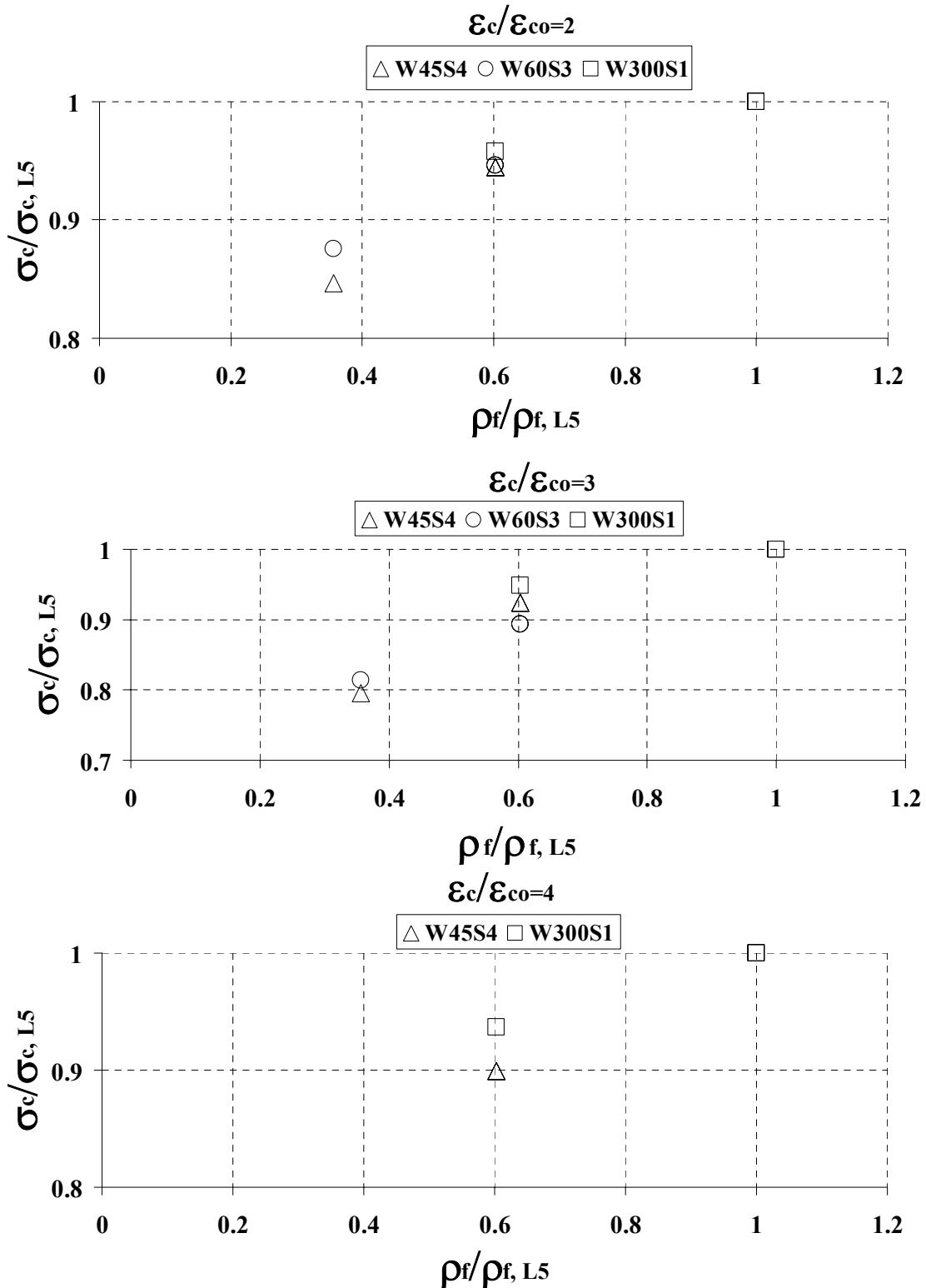


Figura 4.24 – Relação entre  $\sigma_c/\sigma_{c,L5}$  e  $\rho_f/\rho_{f,L5}$  nas séries de ensaios do grupo C23S200.

Da análise dos gráficos da Figura 4.24 verifica-se que:

- Para todos os níveis de deformação, os sistemas de confinamento parcial com 5 camadas permitiram níveis de incremento de carga similares aos registados no sistema totalmente confinado com 3 camadas;

- Para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}=2$  as séries W45S4L5 e W60S3L5 tiveram incrementos de capacidade de carga apenas 5% inferiores aos obtidos nos provetes totalmente confinados com 3 camadas;
- Para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}=3$  as séries W45S4L5 e W60S3L5 tiveram incrementos de capacidade de carga cerca de 5 a 10% inferiores aos obtidos nos provetes totalmente confinados com 5 camadas, W300S1L5, enquanto as séries W45S4L3 e W60S3L3 a capacidade de carga foi de aproximadamente 20% do valor registado em W300S1L5 (decréscimo de 20%).
- Para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}=4$  a série W45S4L5 permitiu um aumento de capacidade de carga similar ao registado na série de total confinamento com 3 camadas. Quando comparado com o aumento de capacidade de carga ocorrido na série de provetes totalmente confinados por 5 camadas (W300S1L5), o aumento de capacidade de carga na série W45S4L5 foi apenas 10% inferior.

#### 4.3.7 Índice de rentabilidade

Na Figura 4.25 apresenta-se a relação entre o índice de rentabilidades (IR) e  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  para os valores de  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  que se têm vindo a considerar. O significado de IR foi apresentado na secção 4.2.7.

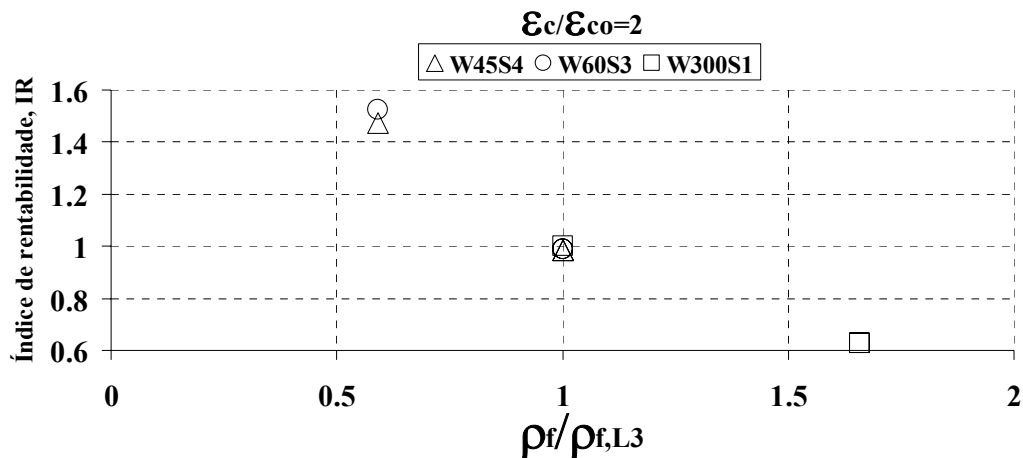


Figura 4.25 - Índice de rentabilidade (IR) versus  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  nas séries de ensaios do grupo C23S200 (cont.).

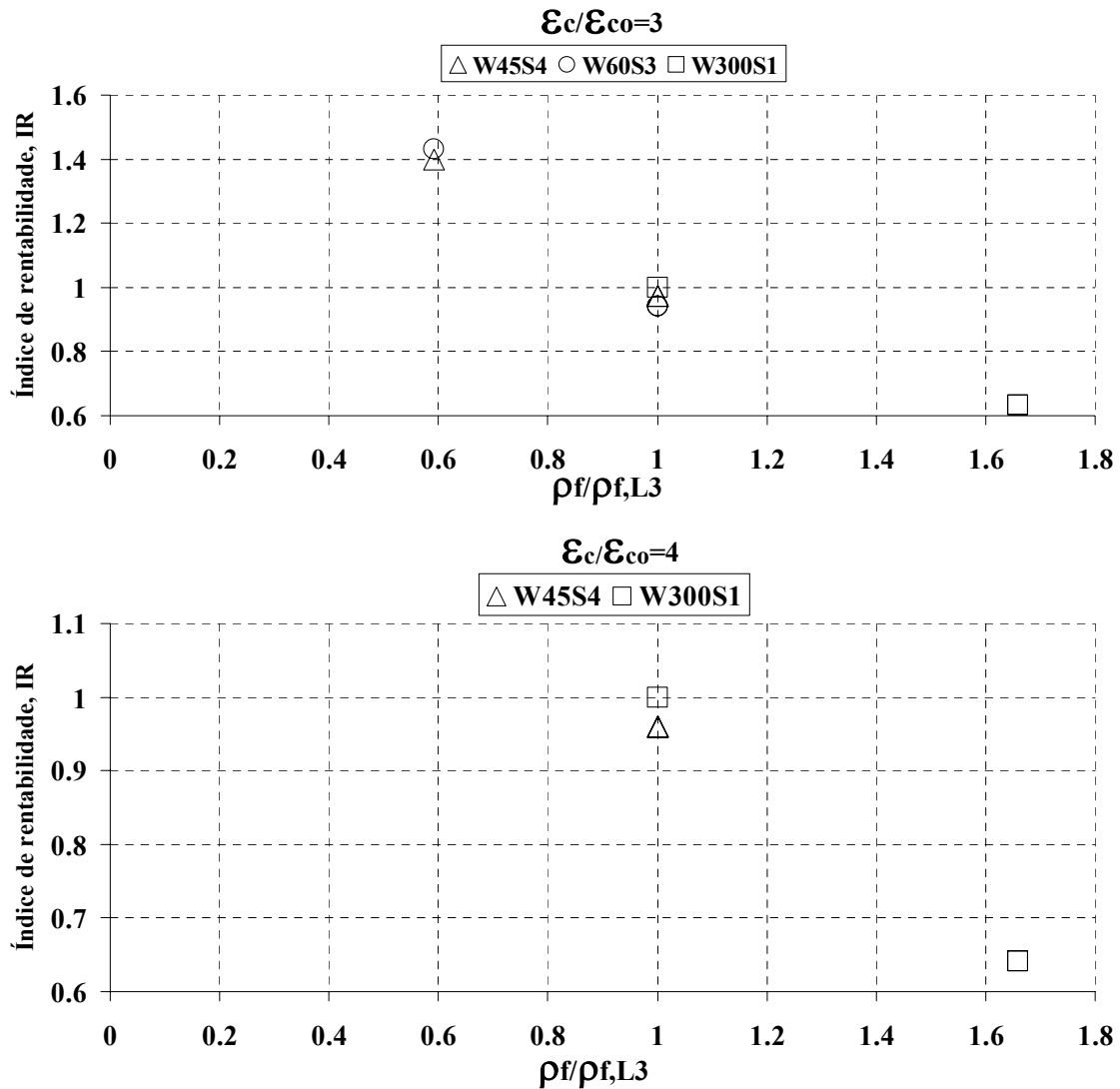


Figura 4.25 (cont.) – Índice de rentabilidade (IR) versus  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  nas séries de ensaios do grupo C23S200.

Da análise dos gráficos da Figura 4.25 observa-se que:

- Para os diferentes níveis de deformação a rentabilidade obtida para as séries W45S4 e W60S3 é semelhante;
- Para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co} = 2$  os níveis de rentabilidade das séries W45S4L5, W60S3L5 e W300S1L3 são iguais. Para níveis de deformação crescentes a rentabilidade da série W300S1L3 vai aumentando em relação à rentabilidade das outras duas séries;
- O IR das séries confinadas parcialmente com 3 camadas (W45S4L3 e W60S3L3) é aproximadamente 50% mais elevado que o IR registado nas séries confinadas parcialmente com 5 camadas (W45S4L5 e W60S3L5);
- O índice de rentabilidade baixa com o aumento dos níveis de deformação.

Na Figura 4.26 apresenta-se a relação entre IR e  $\rho_f/\rho_{f,L5}$ , para os valores  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$ , que se têm vindo a considerar.

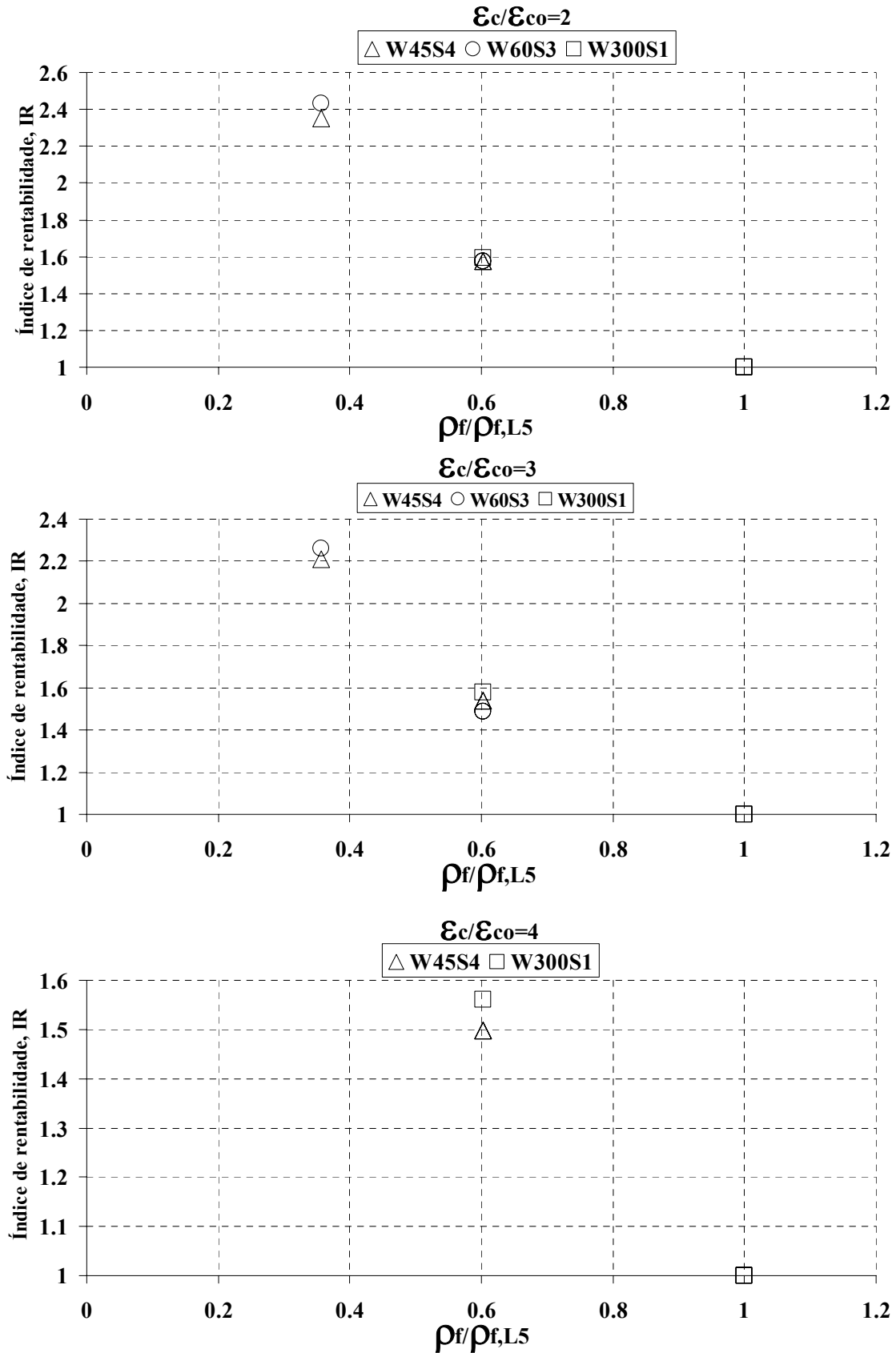


Figura 4.26 – Índice de rentabilidade (IR) versus  $\rho_f/\rho_{f,L5}$  nas séries de ensaios do grupo C23S300

Da análise dos gráficos da Figura 4.26 observa-se que:

- O comportamento obtido é semelhante ao registado nos provetes confinados com três camadas e apresentados na Figura 4.25. Apenas o índice de rentabilidade nos provetes confinados com 5 camadas é mais elevado;
- Para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}=2$  os níveis de rentabilidade das séries W45S4L5, W60S3L5 e W300S1L3 são iguais. Para níveis de deformação crescentes a rentabilidade da série W300S1L3 vai aumentando em relação à rentabilidade das outras duas séries;
- O IR das séries confinadas parcialmente com 3 camadas (W45S4L3 e W60S3L3) é aproximadamente 80% mais elevado que o IR registado nas séries confinadas parcialmente com 5 camadas (W45S4L5 e W60S3L5).

#### 4.4 Séries de ensaios do grupo C16S200

As séries do grupo C16S200 representam os ensaios realizados em provetes de betão com resistência 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 0.117 mm de espessura efectiva.

##### 4.4.1 Modos de rotura

Na Tabela 4.5 e na Figura 4.27 caracterizaram-se os modos de rotura observados nos provetes da série de ensaios do grupo C16S200.

Tabela 4.5 – Caracterização da rotura dos provetes da série de ensaios do grupo C16S200.

Betão confinado com <b>4</b> faixas de CFRP de <b>45mm</b> de largura	
3 camadas	Rotura muito violenta das duas faixas centrais. Betão muito danificado.
5 camadas	Rotura muito violenta de uma das faixas centrais. Provetes muito danificados no fim do ensaio.
Betão confinado com <b>3</b> faixas de CFRP de <b>60mm</b> de largura	
3 camadas	Rotura muito violenta da faixa central. Betão entre faixas muito danificado.
5 camadas	Rotura muito violenta da faixa central. Betão entre faixas muito danificado.
Betão totalmente confinado com CFRP	
3 camadas	Rotura muito violenta da manta. Betão muito danificado.
5 camadas	Rotura extremamente violenta da manta. Betão muito danificado.

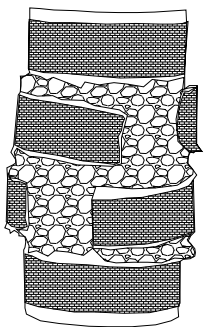
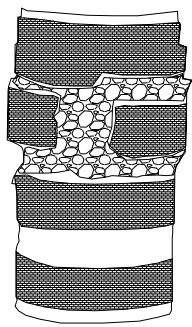
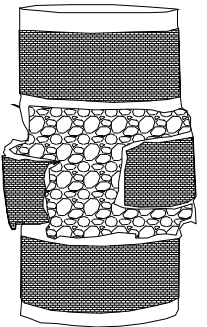
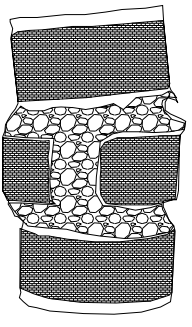
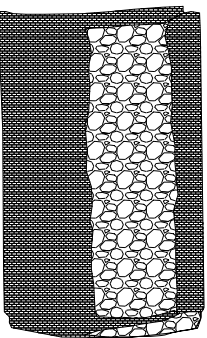
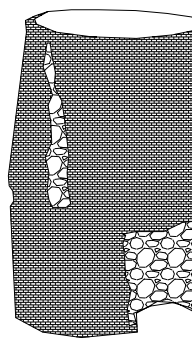
<b>Provetes confinados com 4 faixas de CFRP de 45mm. de largura</b>		
3 camadas	5 camadas	Observações
		Em ambas as séries com 3 e 5 camadas as faixas centrais romperam muito violentamente. O betão ficou muito danificado.
<b>Provetes confinado com 3 faixas de CFRP de 60mm de largura.</b>		
3 camadas	5 camadas	Observações
		Em ambas as séries com 3 e 5 camadas as faixas centrais romperam muito violentamente. O betão entre as faixas ficou muito danificado.
<b>Provetes totalmente confinados com mantas de CFRP</b>		
3 camadas	5 camadas	Observações
		O CFRP rompeu verticalmente. A rotura foi extremamente violenta. O betão ficou muito danificado e provete no fim do ensaio estava bastante destruído.

Figura 4.27 – Modos de rotura dos provetes do grupo C16S200

A rotura dos provetes do grupo C16S200 foi muito violenta, tal como já tinha acontecido nos provetes do grupo C23S200. Ambos os grupos estavam confinados com manta S&P C-240 de 200 gm/m<sup>2</sup>. O betão ficou muito danificado.

#### 4.4.2 Síntese dos resultados mais relevantes e curvas tensão-extensão

Na Tabela 4.6 apresentam-se os valores dos indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento do grupo de ensaios C16S200.

Tabela 4.6 - Indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento referentes ao grupo de ensaios C16S200

Designação do provete	S	Tipo betão	Tipo manta	L	$\rho_f$ [%]	$f_{cc}$ (MPa)	$f_{cc}/f_{co}$	$\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$	$\varepsilon_{fmax}/\varepsilon_{fu}$	$\varepsilon_{\pi}/\varepsilon_{\pi,r}$
Betão simples	-	C16/20	S&P C-240 (200gm/m <sup>2</sup> )	0		22.79( $f_{co}$ )	1.0	1.0		-
W45S4L3	4			3	0.26	37.85	1.66	5.70	0.482	1.00
									0.532	1.00
W45S4L5	4			5	0.44	47.69	2.09	7.20	0.444	0.74
										0.529
W60S3L3	3			3	0.26	37.42	1.64	5.46	0.424	1.00
				5	0.44	47.40	2.08	8.48	0.550	0.91
W300S1L3	1			3	0.44	55.66	2.44	8.92	0.610	1.00
W300S1L5				5	0.73	77.75	3.41	11.24	0.85	0.92

Na Figura 4.28 representa-se a relação entre a tensão e a extensão axial do provete bem como a extensão no CFRP das séries do grupo de ensaios S16S200.

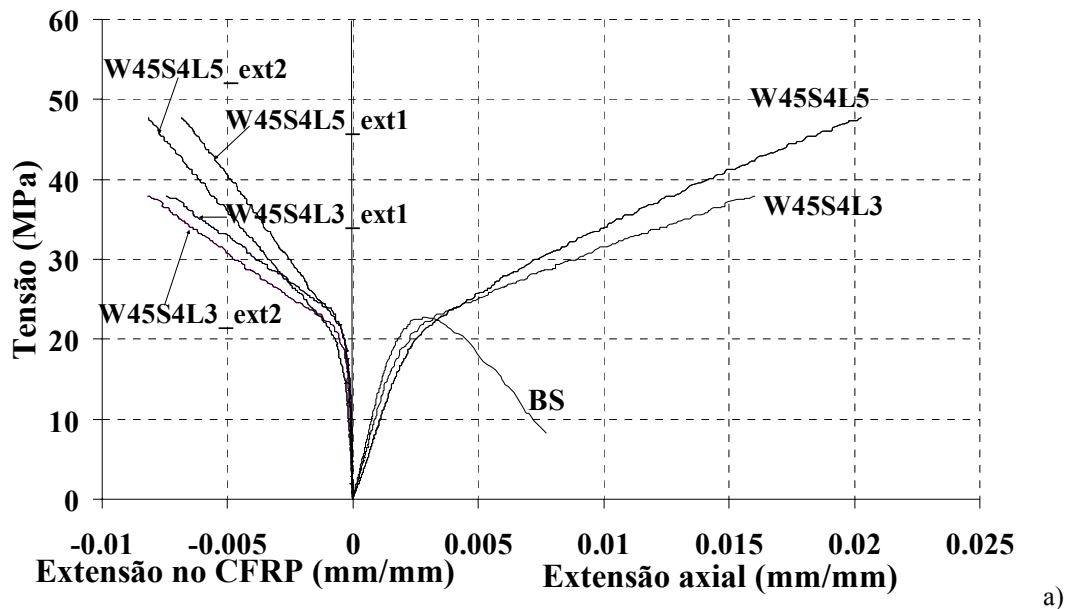


Figura 4.28 - Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries: a) W45S4; b) W60S3; c) W300S1 do grupo de ensaios C16S200 (cont.).

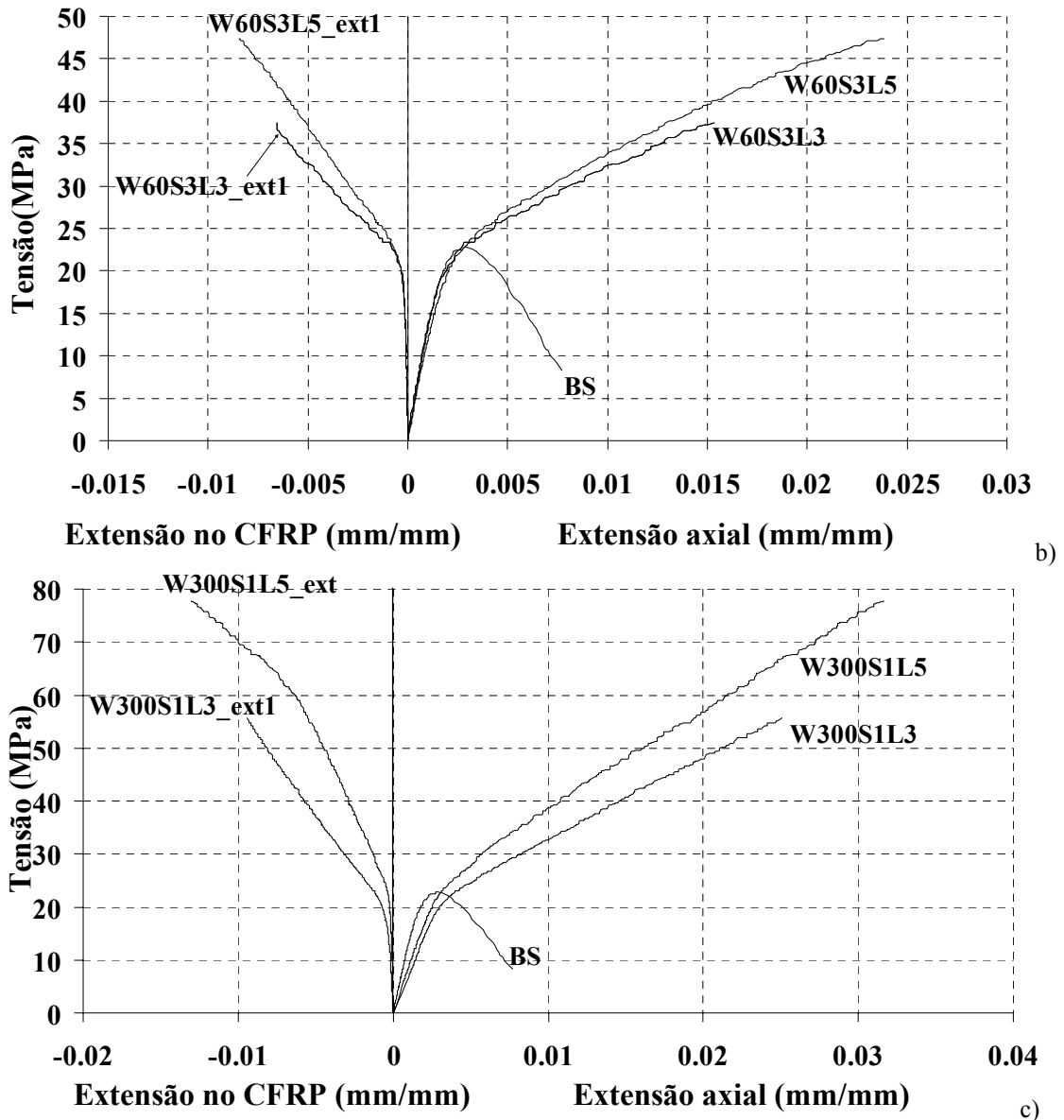


Figura 4.28 (cont.) - Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries: a) W45S4; b) W60S3; c) W300S1 do grupo C16S200.

Da análise dos valores incluídos na Tabela 4.6 e dos gráficos da Figura 4.28 podem-se extrair 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  $\varepsilon_c/\varepsilon_{c0}$  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,  $\varepsilon_{fl}/\varepsilon_{fl,r}$  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 e de absorção de energia foi maior na série W300S1 do que nas séries W45S4 e W60S3.

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

Na Figura 4.29 representam-se as curvas  $\sigma_c/f_{co}$  versus  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  para as séries do grupo C16S200. 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.

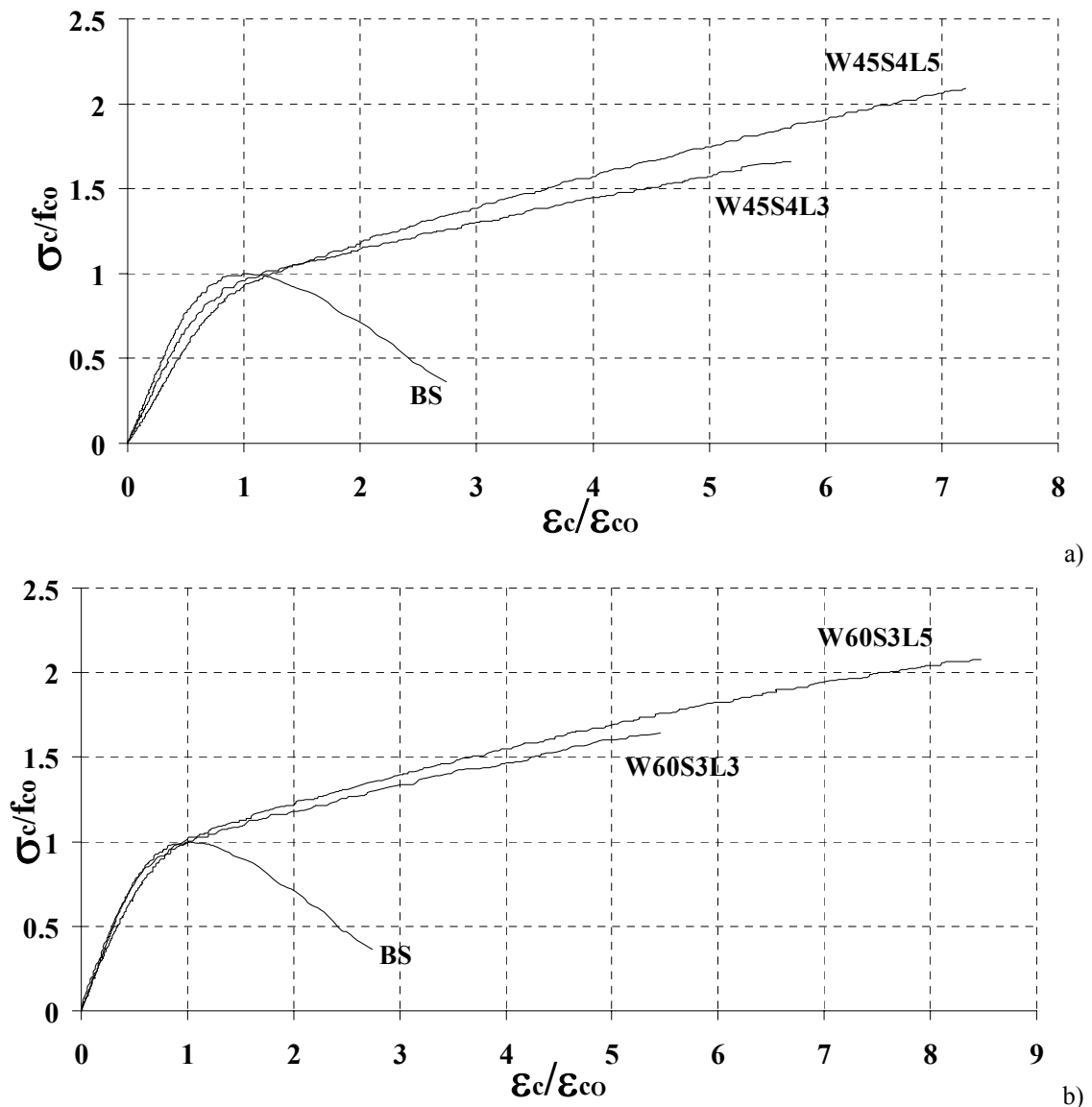


Figura 4.29 – Curvas  $\sigma_c/f_{co}$  versus  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  nas séries de ensaios do grupo C16S200 (cont.) .

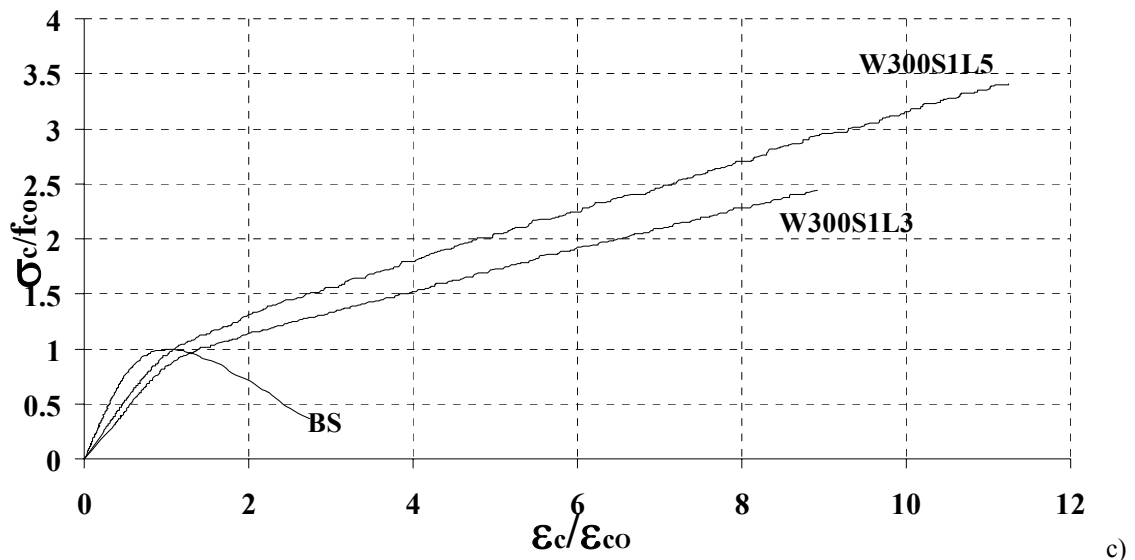


Figura 4.29 (cont.) – Curvas  $\sigma_c/f_{co}$  versus  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  nas séries de ensaios do grupo C16S200.

Neste grupo de ensaios as séries W45S4 e W60S3 tiveram resultados similares em termos de incremento da capacidade de carga. Nos provetes confinados com 5 camadas de CFRP a carga duplicou, enquanto com 3 camadas o incremento de carga foi 60% aproximadamente. Em termos de ductilidade, avaliada pelo índice  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$ , na série W45S4 foram registados valores de 5.7 e 7.2 nos provetes confinados com 3 e 5 camadas, respectivamente. Na série W60S3 com 3 e 5 camadas, foram obtidos valores de 5.5 e 8.5 para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$ , respectivamente.

Nas séries totalmente confinadas, W300S1, registaram-se incrementos de carga de 2.5 e 3.5 nos provetes com 3 e 5 camadas, enquanto que o aumento de ductilidade foi de 9 e 11 nos provetes com 3 e 5 camadas, respectivamente.

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

Na Figura 4.30 representa-se a relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e  $\rho_f$  para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}=2, 3, 4, 6$  e  $8$ , nas séries de ensaios do grupo C16S200.

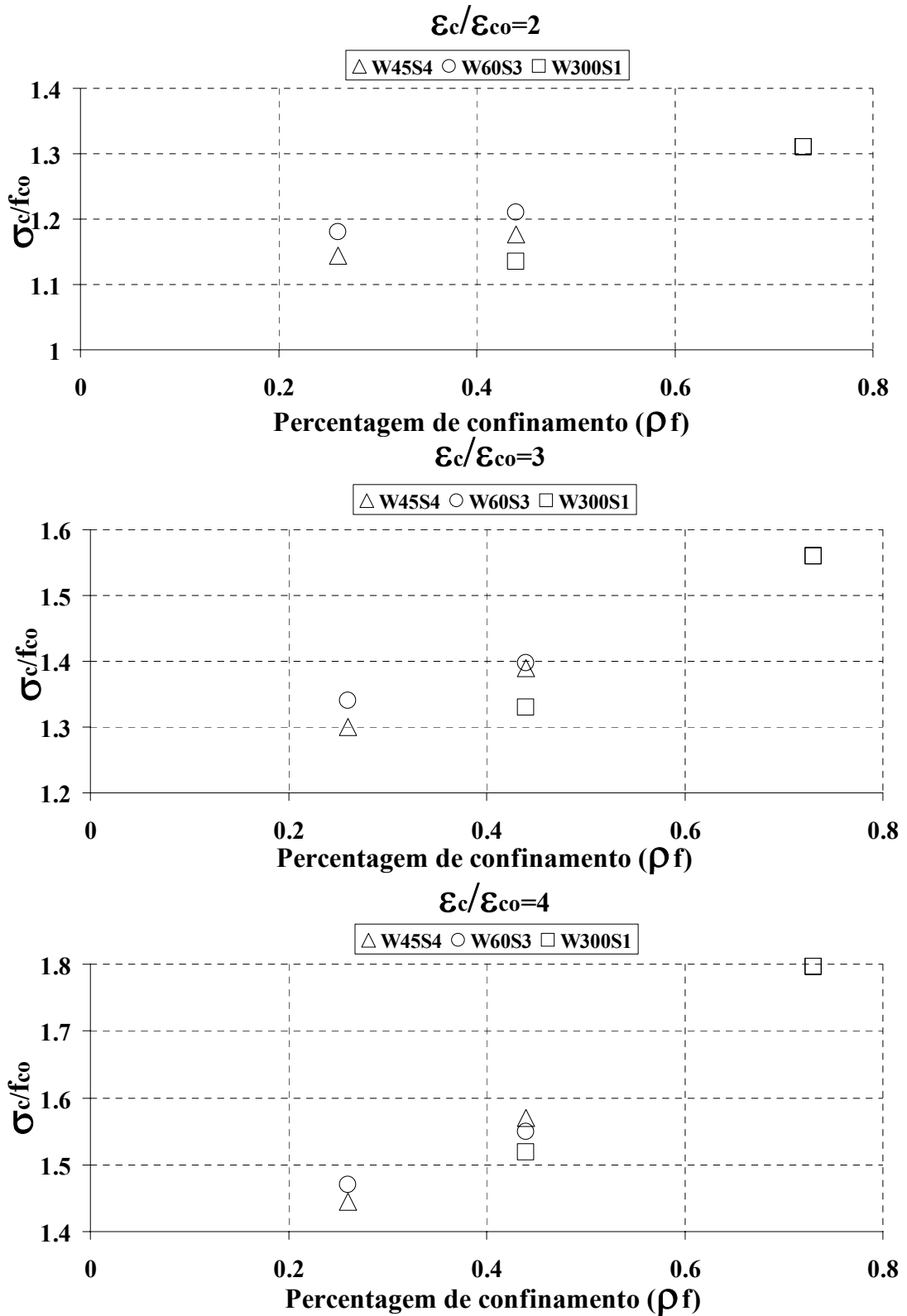


Figura 4.30 - Relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) nas séries de ensaios do grupo C16S200 (cont.).

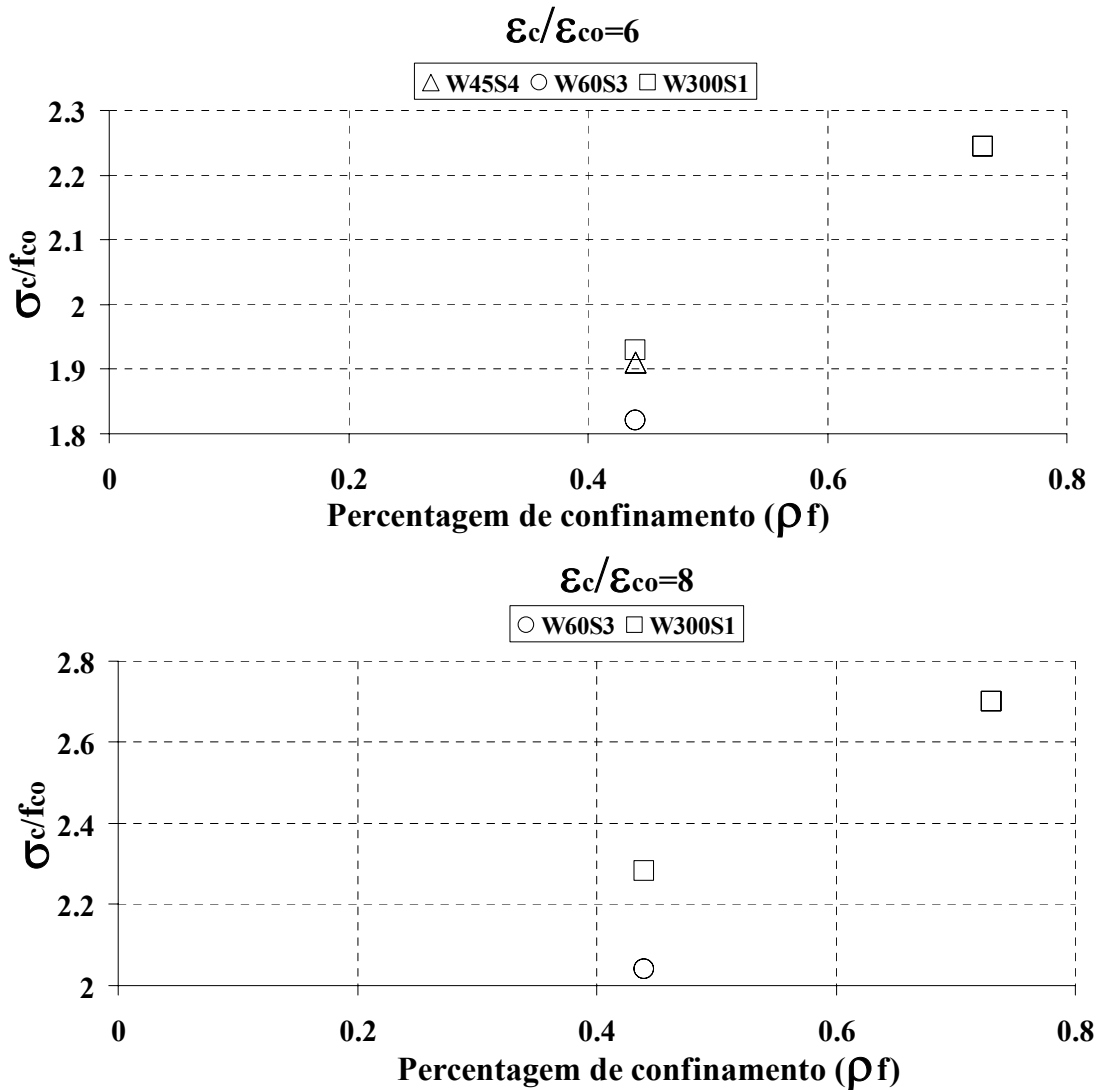


Figura 4.30 (cont.) – Relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) nas séries de ensaios do grupo C16S200.

Da análise dos gráficos da Figura 4.30 pode-se verificar que:

- A capacidade de carga aumenta com  $\rho_f$ ;
- Para  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  de 2, 3 e 4 e para a mesma percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ), a série W60S3 permitiu incrementos de carga ligeiramente maiores que os registados na série W45S4;
- A série W45S4 atingiu níveis de deformação 6 vezes superior ao registado no betão simples, enquanto a série W60S3 atingiu níveis de deformação 8 vezes superiores aos do betão simples, tal como nas séries W300S1.

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

Na Figura 4.31 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 8. O modo como  $\Delta U$  e  $U_c$  foram obtidos está descrito na secção 4.2.5.

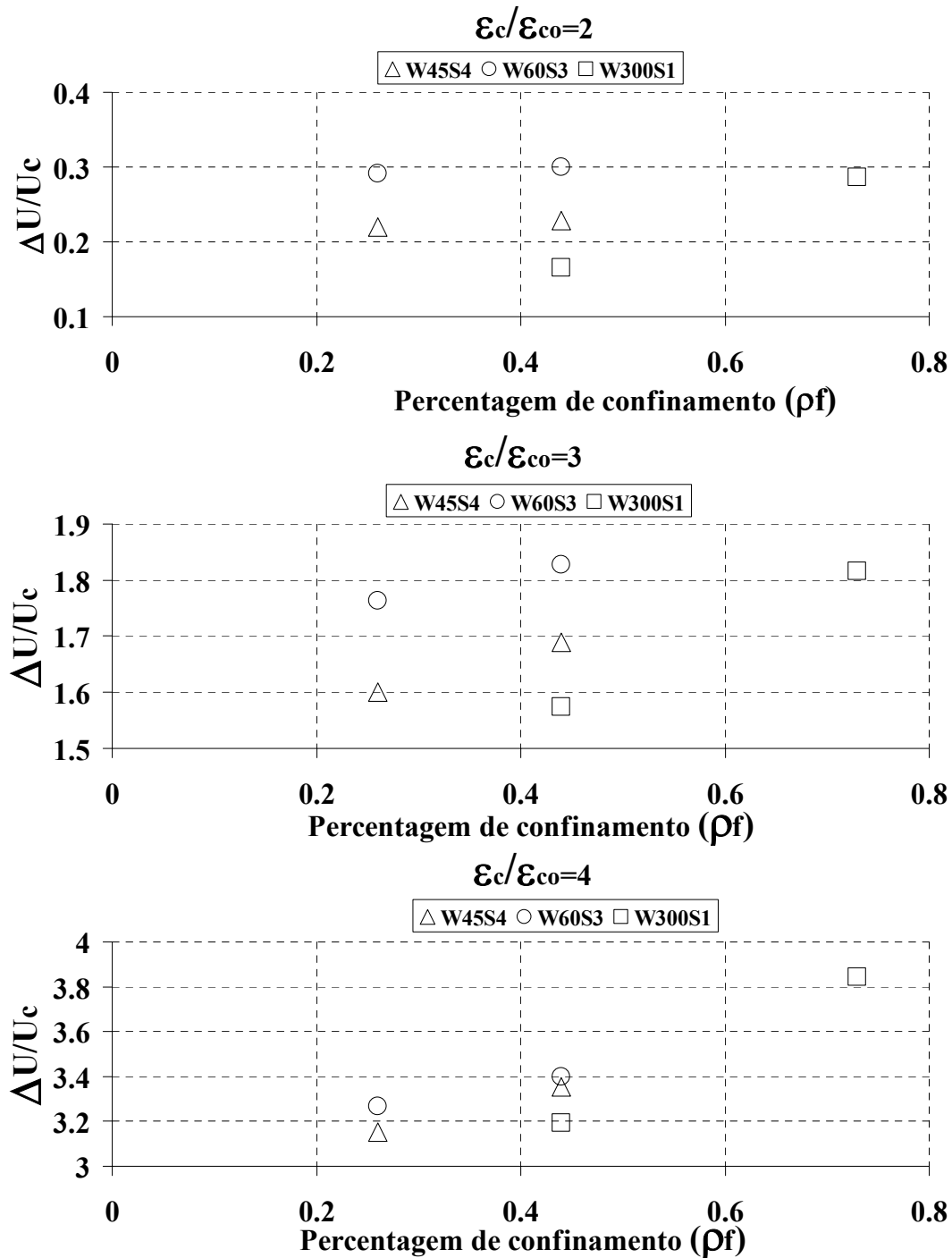


Figura 4.31 - Relação entre  $\Delta U/U_c$  e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) nas séries de ensaios do grupo C16S200 (cont.).

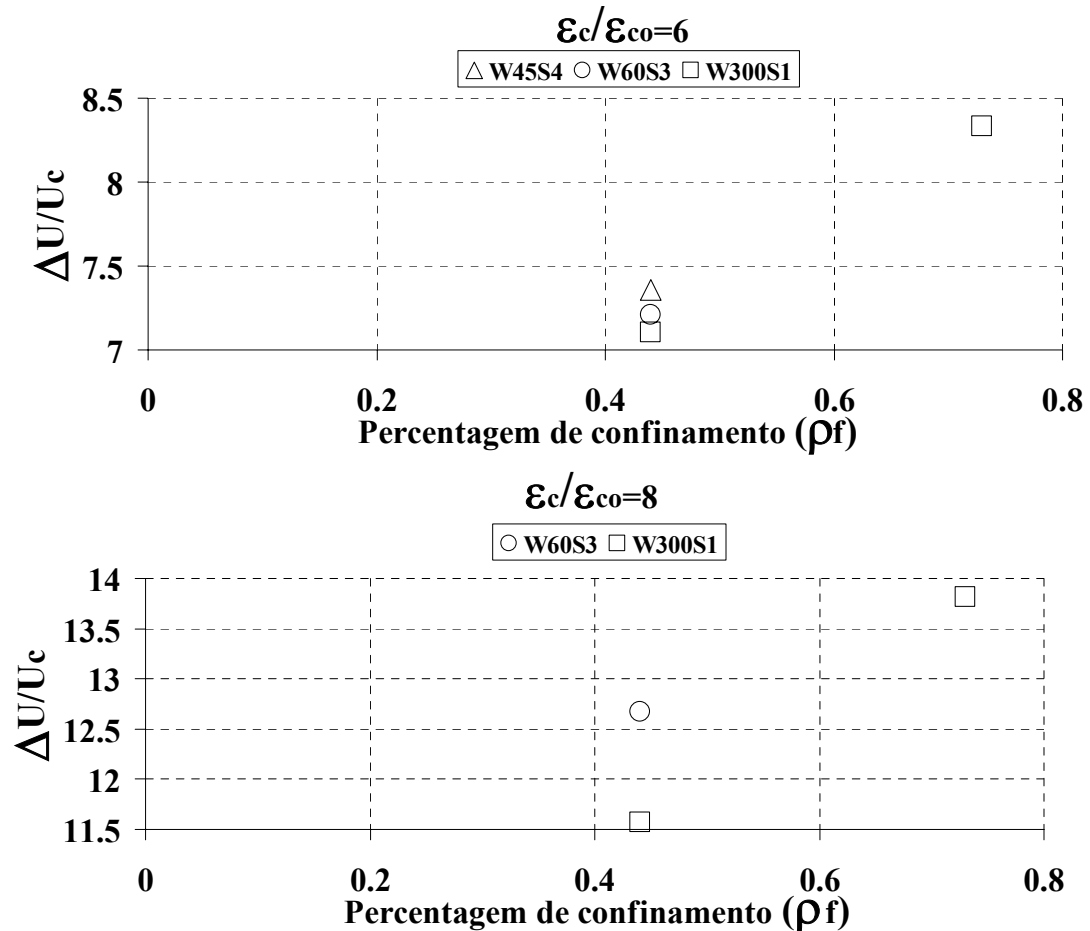


Figura 4.31 (cont.) – Relação entre  $\Delta U/U_c$  e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) nas séries de ensaios do grupo C16S200.

Da análise dos gráficos da Figura 4.31 verifica-se que:

- A capacidade de absorção de energia aumenta com  $\rho_f$ ;
- Dos três sistemas de confinamento com  $\rho_f = 0.44$ , o que apresentou menor  $\Delta U/U_c$ , para todos os níveis de deformação analisados, foi o sistema de total confinamento, W300S1. Este registo foi mais acentuado para  $\epsilon_c/\epsilon_{co}=2$ , tendo os valores de  $\Delta U/U_c$  nos três sistemas de confinamento se aproximado com o aumento de  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$ ;
- O incremento máximo de absorção de energia foi próximo de 14, para  $\epsilon_c/\epsilon_{co}=8$ , tendo sido registado na série W300S1L5. No entanto, para este nível de deformação, o sistema de confinamento W60S3L5 registou valores de  $\Delta U/U_c$  apenas ligeiramente inferior àquele valor.

#### 4.4.6 Gráficos $\sigma_c/\sigma_{c,L3,5}$ versus $\rho_f/\rho_{f,L3,5}$

Na Figura 4.32 representa-se a relação entre  $\sigma_c/\sigma_{c,L3}$  e  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  para  $\epsilon_c/\epsilon_{c0}$  de 2, 3, 4 e 6, em que o significado de  $\sigma_c/\sigma_{c,L3}$  e  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  foi apresentado na secção 4.2.6.

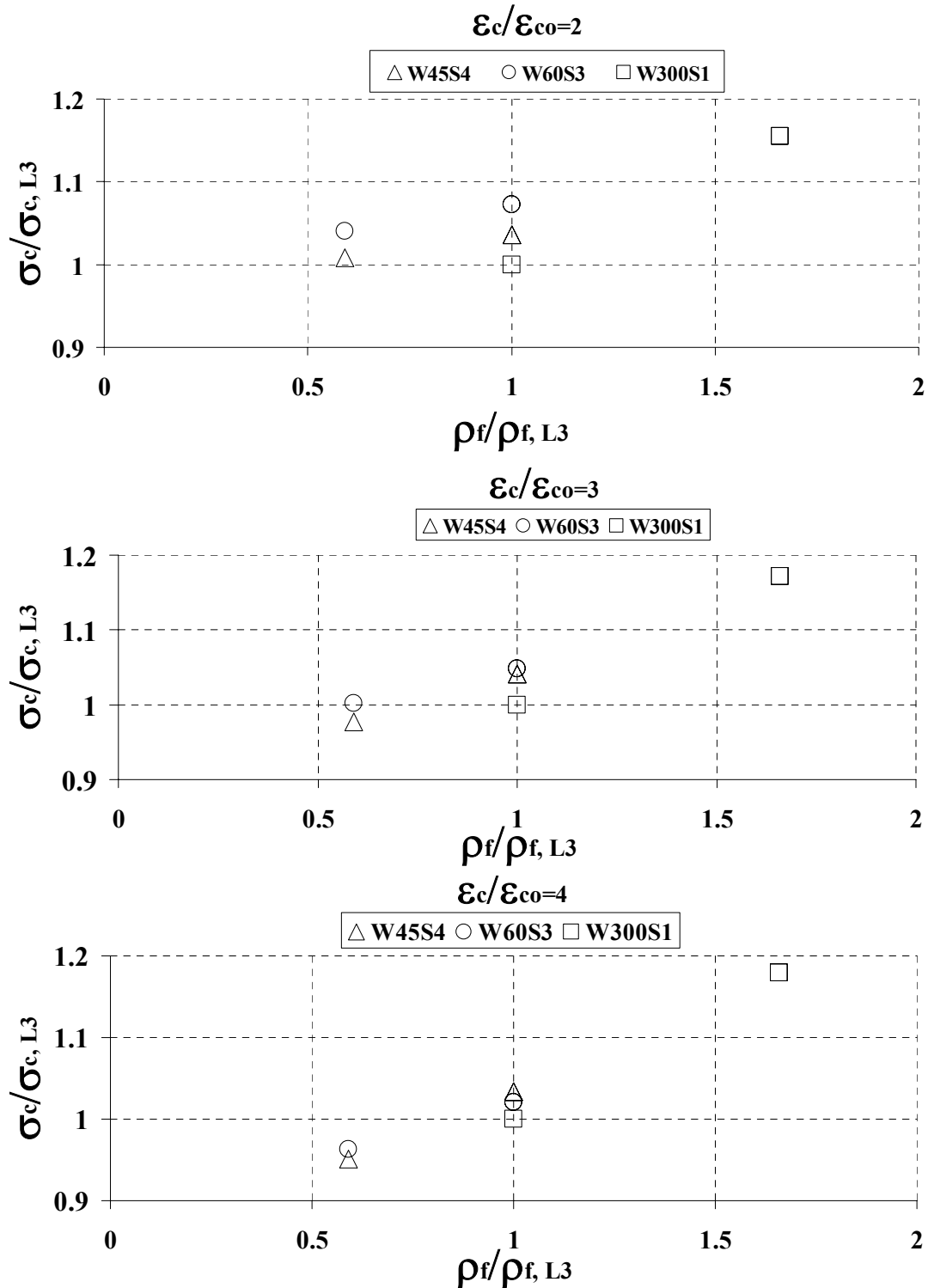


Figura 4.32 – Gráficos  $\sigma_c/\sigma_{c,L3}$  versus  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  nas séries de ensaios do grupo C16S200 (cont.).

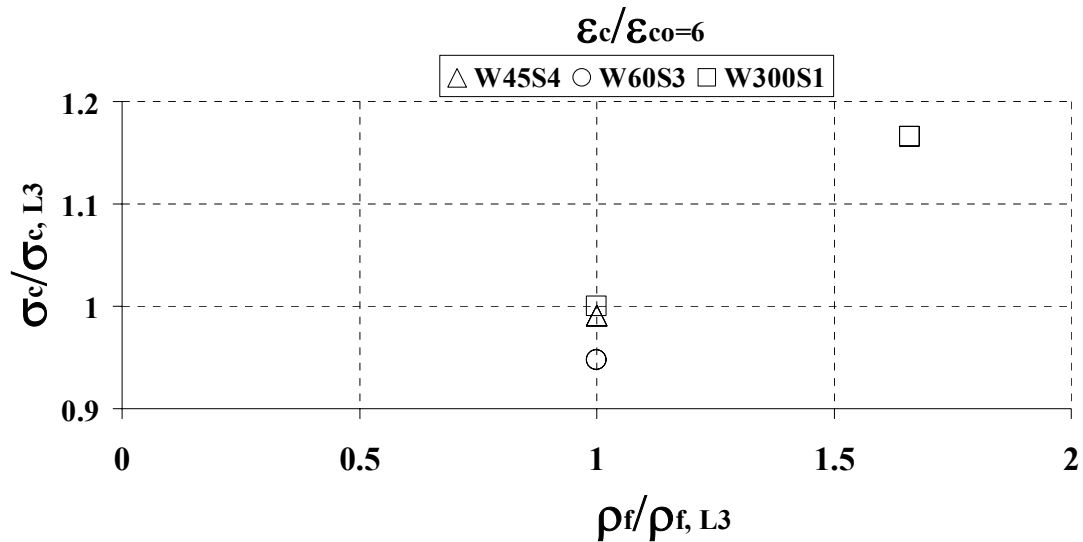


Figura 4.32 (cont.) – Gráficos  $\sigma_c/\sigma_{c,L3}$  versus  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  nas séries de ensaios do grupo C16S200.

Da análise dos gráficos da Figura 4.32 verifica-se que:

- Tal como nas anteriores séries  $\sigma_c/\sigma_{c,L3}$  aumentou com  $\rho_f/\rho_{f,L3}$ .
- Para todos os níveis de deformação analisados, as séries W45S4 e W60S3, com  $\rho_f/\rho_{f,L3}=1$  tiveram incrementos de capacidade de carga similares aos obtidos na série totalmente confinada com 3 camadas.

Na Figura 4.33 representa-se a relação entre  $\sigma_c/\sigma_{c,L5}$  e  $\rho_f/\rho_{f,L5}$  para  $\epsilon_c/\epsilon_{co}= 2, 3, 4, 6$  e  $8$ , em que o significado de  $\sigma_c/\sigma_{c,L5}$  e de  $\rho_f/\rho_{f,L5}$  foi apresentado na secção 4.2.6.

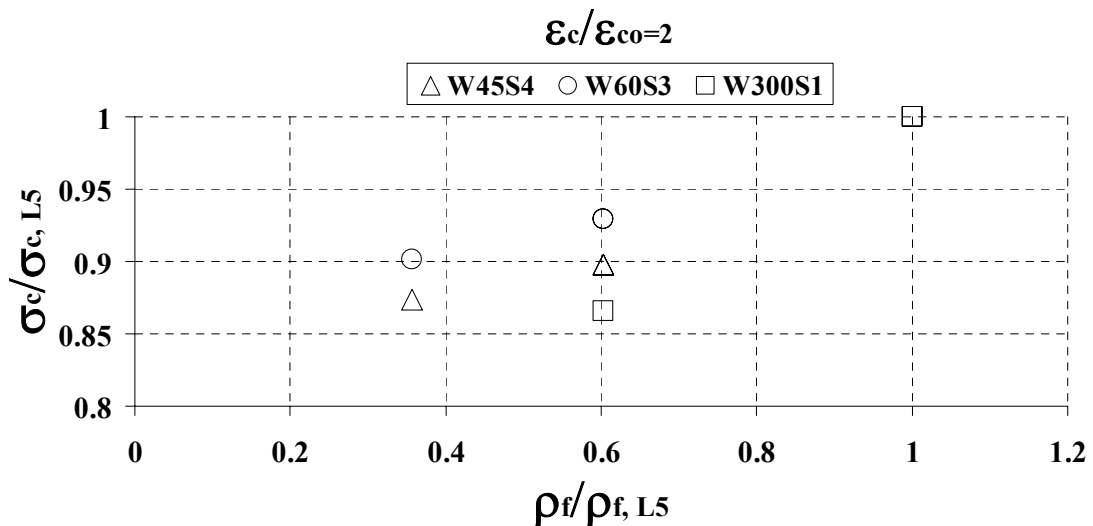


Figura 4.33 - Gráficos  $\sigma_c/\sigma_{c,L5}$  versus  $\rho_f/\rho_{f,L5}$  nas séries de ensaios do grupo C16S200 (cont.).

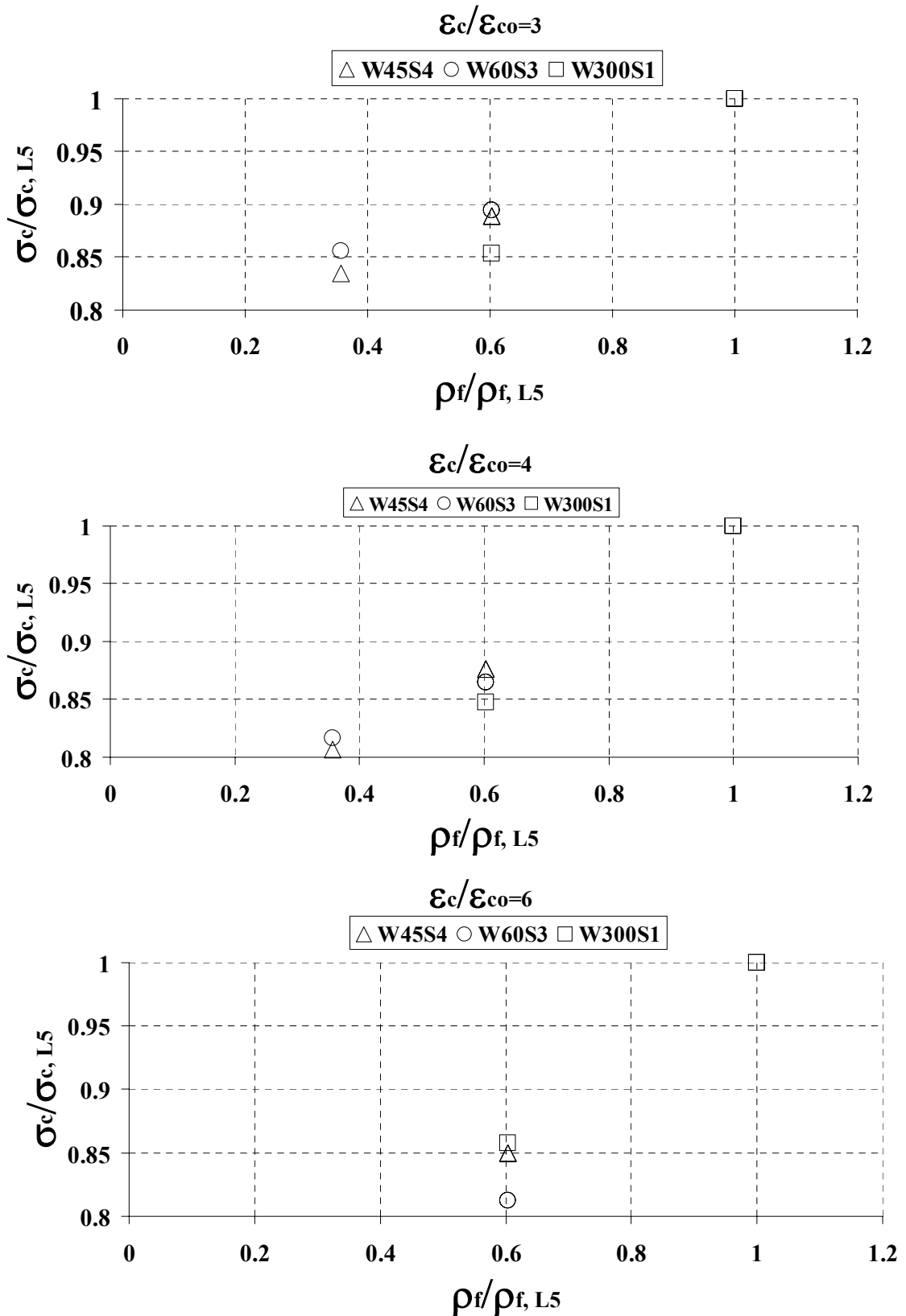


Figura 4.33 (cont.) - Gráficos  $\sigma_c/\sigma_{c,L5}$  versus  $\rho_f/\rho_{f,L5}$  nas séries de ensaios do grupo C16S200

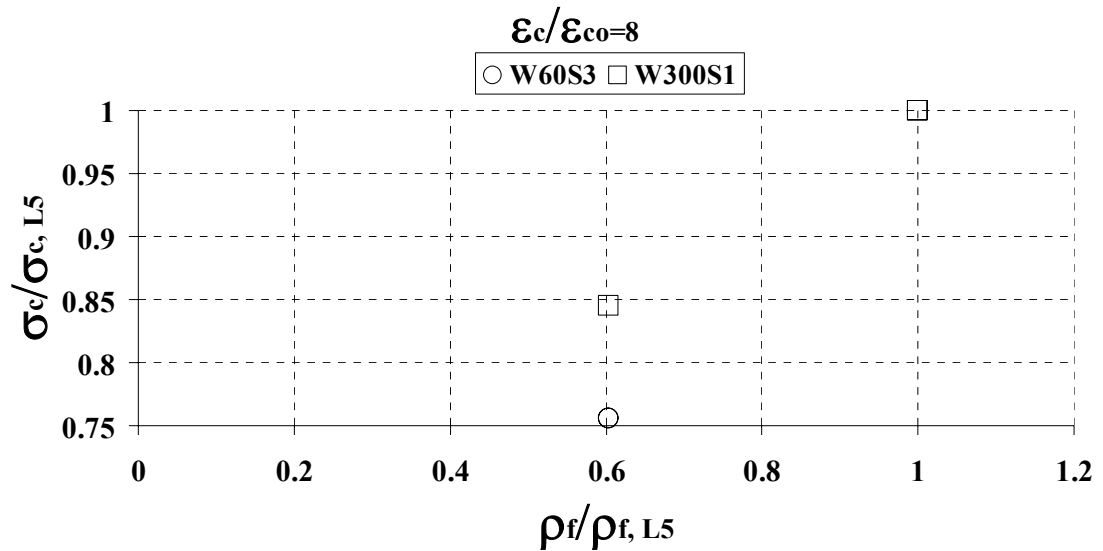


Figura 4.33 (cont.) – Relação entre  $\sigma_c/\sigma_{c,L5}$  versus  $\rho_f/\rho_{f,L5}$  nas séries de ensaios do grupo C16S200.

Da análise dos gráficos da Figura 4.33 verifica-se que:

- Para qualquer dos  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  analisados, as séries W45S4 e W60S3 com 3 camadas a tensão de rotura variou entre 80% e 90% da tensão de rotura da série W300S1 com 5 camadas. Nas séries W45S4 e W60S3 com 5 camadas essa percentagem aumentou ligeiramente para  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  até valor igual a 6.

#### 4.4.7 Índice de rentabilidade, IR

Na Figura 4.34 apresenta-se a relação entre o IR e  $\rho_f/\rho_{f,L3}$ , para os valores de  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  que se têm vindo a considerar. O significado de IR foi apresentado na secção 4.2.7.

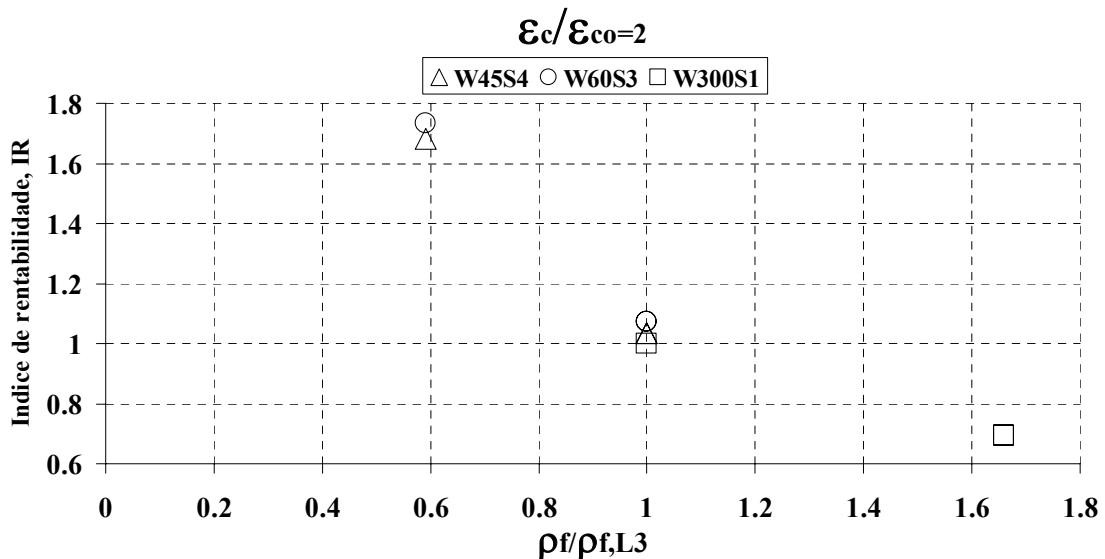


Figura 4.34 - Índice de rentabilidade (IR) versus  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  nas séries de ensaios do grupo C23S200 (cont.)

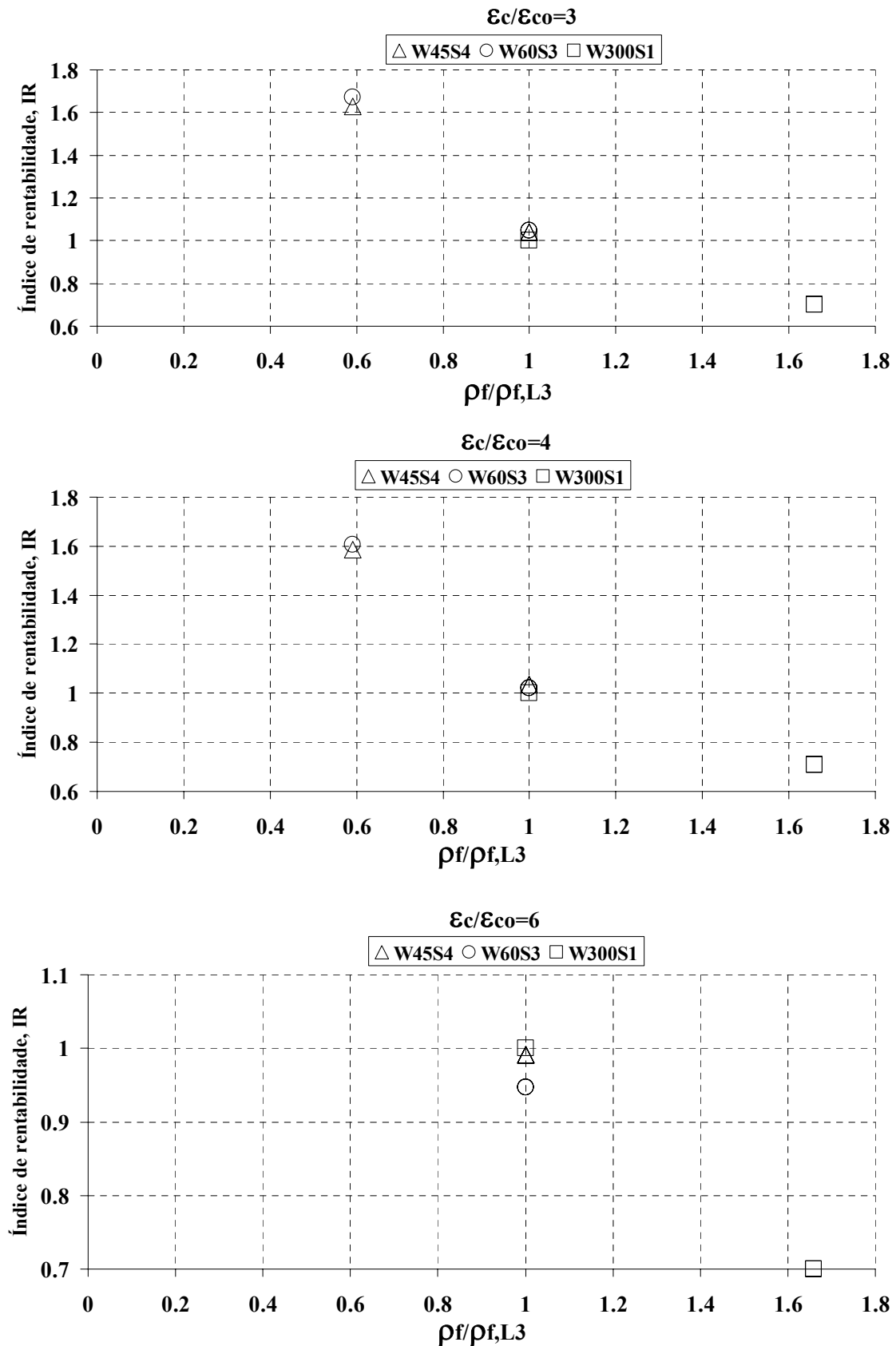


Figura 4.34 (cont.)– Índice de rentabilidade (IR) versus  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  nas séries de ensaios do grupo C23S200

Da análise dos gráficos da Figura 4.34 observa-se que:

- Para os diferentes níveis de deformação a rentabilidade obtida para as séries W45S4 e W60S3 é semelhante;
- Para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  de 2, 3 e 4 os níveis de rentabilidade das séries W45S4L5, W60S3L5 e W300S1L3 são semelhantes. Para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}=6$  a série W60S3L5 tem uma rentabilidade 5% inferior à das outras duas séries.
- O IR das séries confinadas parcialmente com 3 camadas (W45S4L3 e W60S3L3) é aproximadamente 60% mais elevado que o IR registado nas séries confinadas parcialmente com 5 camadas (W45S4L5 e W60S3L5);
- O índice de rentabilidade baixa com o aumento dos níveis de deformação.

Na Figura 4.35 apresenta-se a relação entre o IR e  $\rho_f/\rho_{f,L5}$ , para valores de  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  que se têm vindo a considerar. O significado de IR foi apresentado na secção 4.2.7.

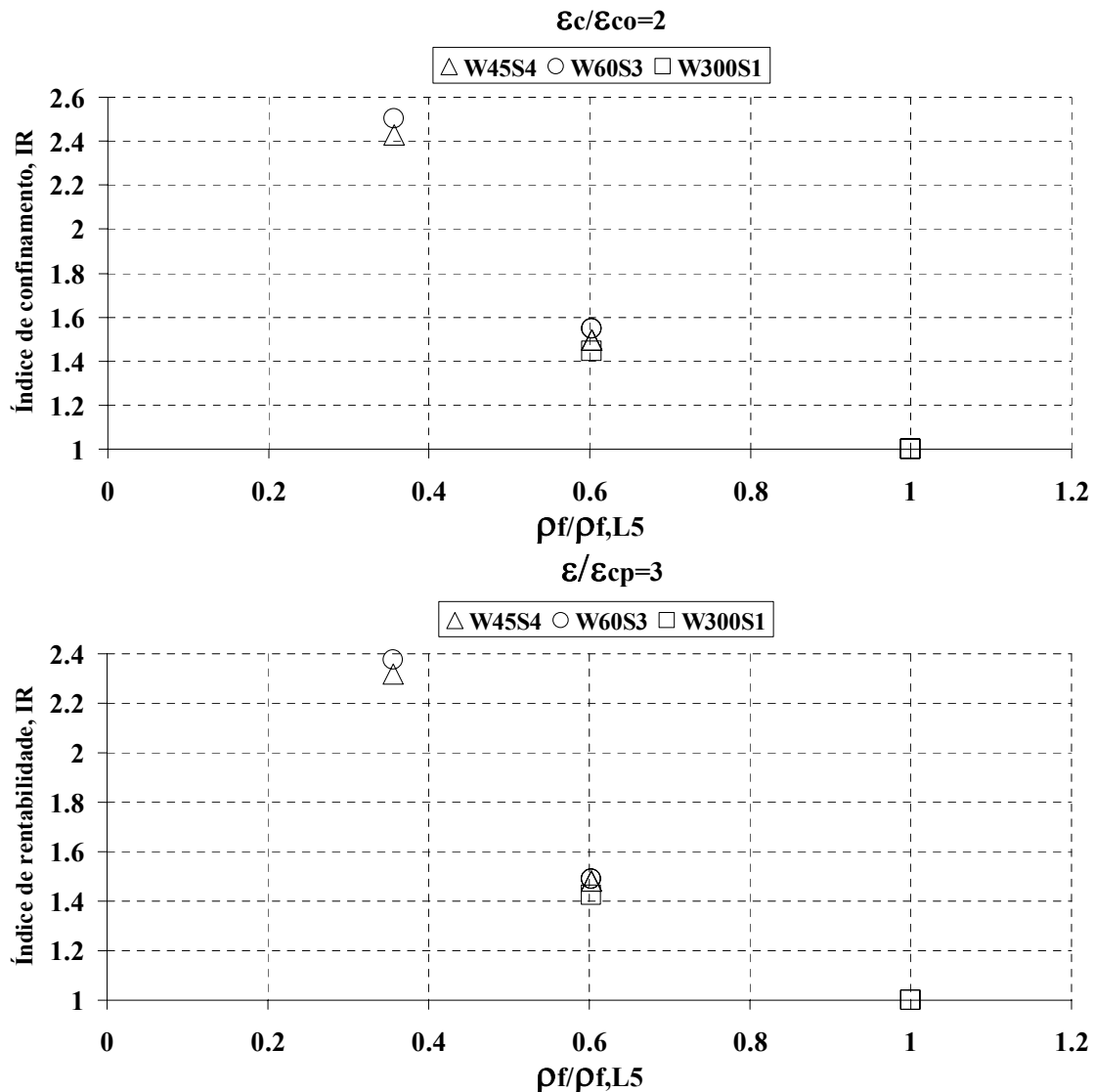


Figura 4.35 - Índice de rentabilidade (IR) versus  $\rho_f/\rho_{f,L5}$  nas séries de ensaios do grupo C23S300 (cont.).

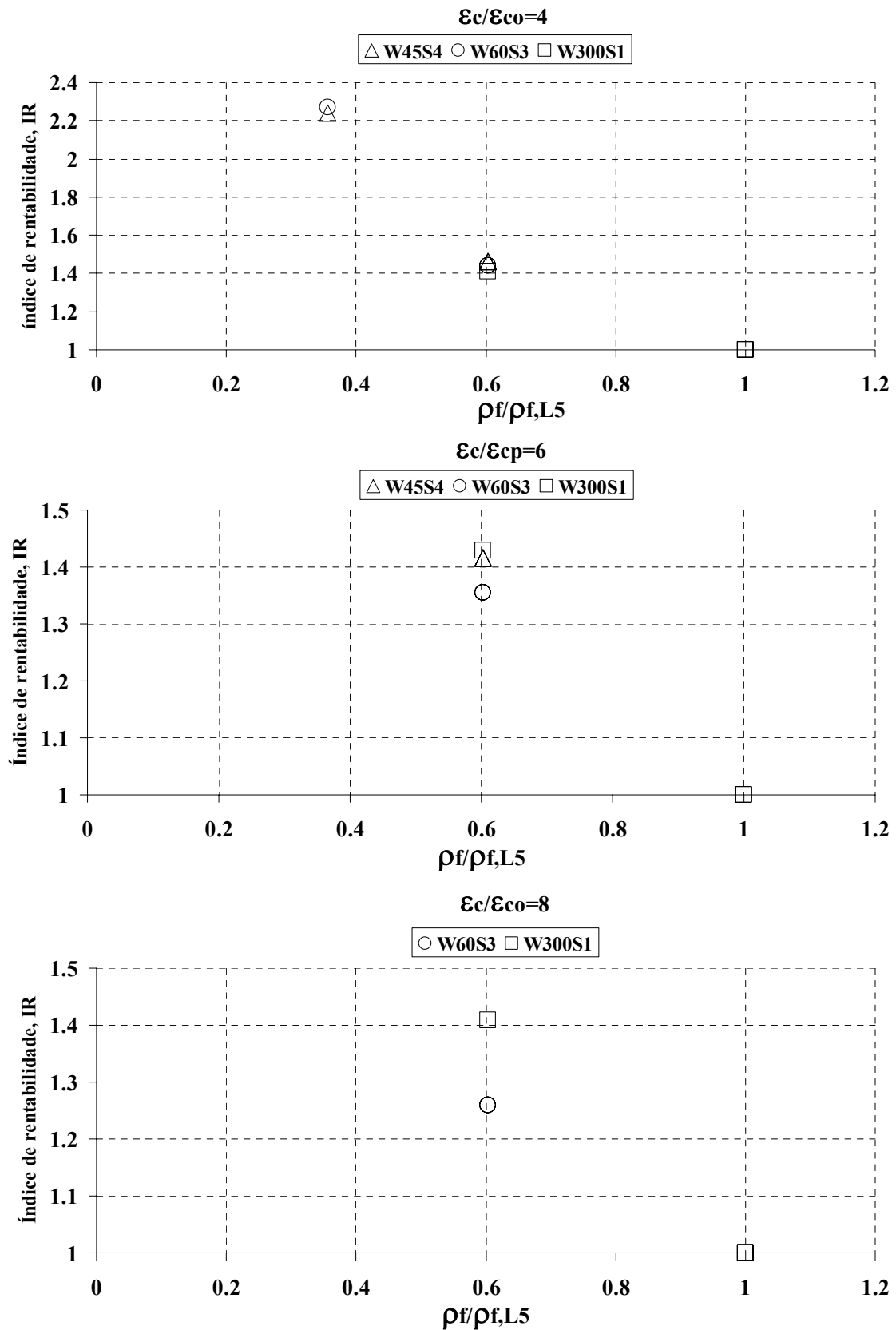


Figura 4.35 (cont.) – Índice de rentabilidade (IR) versus  $\rho_f/\rho_{f,L5}$  nas séries de ensaios do grupo C23S300

Da análise dos gráficos da Figura 4.35 observa-se que:

- O comportamento obtido é semelhante ao registado nos provetes confinados com três camadas e apresentados na Figura 4.34. Apenas o índice de rentabilidade nos provetes confinados com 5 camadas é mais elevado;
- Para  $\varepsilon/\varepsilon_{cp}=4$  os níveis de rentabilidade das séries W45S4L5, W60S3L5 e W300S1L3 são iguais.
- O IR das séries confinadas parcialmente com 3 camadas (W45S4L3 e W60S3L3) é aproximadamente 80% mais elevado que o IR registado nas séries confinadas parcialmente com 5 camadas (W45S4L5 e W60S3L5);

#### 4.5 Séries de ensaios do grupo C16S300

As séries do grupo C16S300 representam os ensaios realizados em provetes de betão com resistência 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  $300 \text{ g/m}^2$  e 0.176 mm de espessura efectiva.

##### 4.5.1 Modos de rotura

Na Tabela 4.7 e na Figura 4.36 caracterizam-se os modos de rotura observados nos provetes da série de ensaios do grupo C16S300.

Tabela 4.7 – Caracterização da rotura dos provetes da série de ensaios do grupo C16S300.

Betão confinado com <b>4</b> faixas de CFRP de <b>45mm</b> de largura	
3 camadas	Rotura violenta das duas faixas centrais. Betão muito danificado.
5 camadas	Não houve rotura das faixas. Provetes danificados.
Betão confinado com <b>3</b> faixas de CFRP de <b>60mm</b> de largura	
3 camadas	Rotura muito violenta da faixa central. Betão entre faixas muito danificado.
5 camadas	Não houve rotura das faixas. Provetes danificados.
Betão totalmente confinado com CFRP	
3 camadas	Não houve rotura da manta.
5 camadas	Não houve rotura da manta.

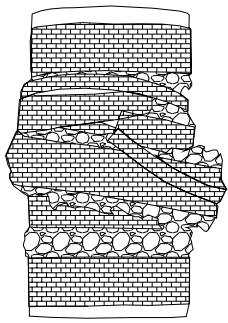
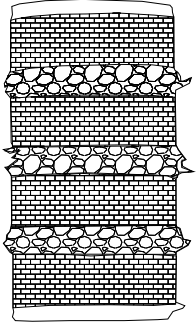
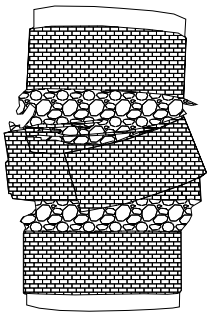
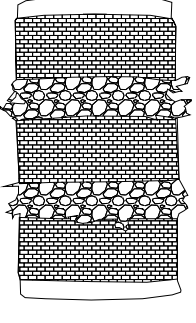
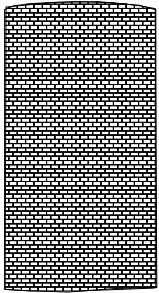
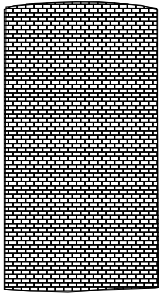
Provetes confinados com 4 faixas de CFRP de 45mm de largura		
3 camadas	5 camadas	Observações
		Apenas houve rotura das faixas nos provetes reforçados com 3 camadas de CFRP. O betão entre faixas ficou muito danificado. Os provetes reforçados com 3 camadas de CFRP, no fim do ensaio, apresentavam-se muito destruídos, o que não aconteceu nos provetes reforçados com 5 camadas de CFRP.
Provetes confinados com 3 faixas de CFRP de 60mm de largura		
3 camadas	5 camadas	Observações
		Comportamento similar ao registado nos provetes reforçados com faixas de 45mm. Rotura da faixa central nos provetes reforçados com 3 camadas de CFRP. O betão entre faixas ficou muito danificado. Os provetes reforçados com 3 camadas de CFRP, no fim do ensaio, apresentavam-se muito destruídos.
Provetes totalmente confinados com manta CFRP		
3 camadas	5 camadas	Observações
		Não se verificou a rotura do CFRP em nenhuma das séries de ensaios. Os provetes no fim do ensaio estavam, aparentemente, intactos.

Figura 4.36 – Modos de rotura dos provetes do grupo C16S300

Os provetes deste grupo de ensaios tiveram modos de rotura similares aos registados nos provetes do grupo de ensaios C23S300. Os provetes de ambos os grupos foram confinados com manta S&P C-240 de  $300 \text{ gm/m}^2$ . As faixas de CFRP dos provetes reforçados com 5 camadas não rebentaram.

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,  $e = 0.117 \text{ mm}$ ) tiveram roturas mais violentas e o betão ficou mais danificado que os provetes reforçados com manta CF130 S&P 240 ( $e = 0.176 \text{ mm}$ ).

#### 4.5.2 Síntese dos resultados mais relevantes e curvas tensão-extensão

Na Tabela 4.8 apresentam-se os valores dos indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento do grupo de séries de ensaios C16S300.

Tabela 4.8 - Indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento referentes ao grupo de ensaios C16S300

Designação do provete	S	Tipo betão	Tipo manta	L	$\rho_f$ [%]	$f_{cc}$ (MPa)	$f_{cc}/f_{co}$	$\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$	$\epsilon_{fmax}/\epsilon_{fu}$	$\epsilon_{fl}/\epsilon_{fl,r}$
Betão simples	-	C16/20	S&P C-240 (300gm/m <sup>2</sup> )	0		17.75 ( $f_{co}$ )	1.0	1.0		
W45S4L3	4			3	0.40	56.24	3.17	12.21	-	-
W45S4L5				5	0.67	70.25	3.96	16.0	0.516	-
W60S3L3	3			3	0.40	46.52	2.62	12.15	0.700	1.00
W60S3L5				5	0.67	62.41	3.52	20.08	0.590	0.59
W300S1L3	1			3	0.67	75.07	4.23	12.26	0.540	1.00
W300S1L5				5	1.11	116.88	6.58	16.54	0.661	1.02

Na Figura 4.37 representa-se a relação entre a tensão e a extensão axial do provete bem como a extensão no CFRP das séries do grupo de ensaios C16S300.

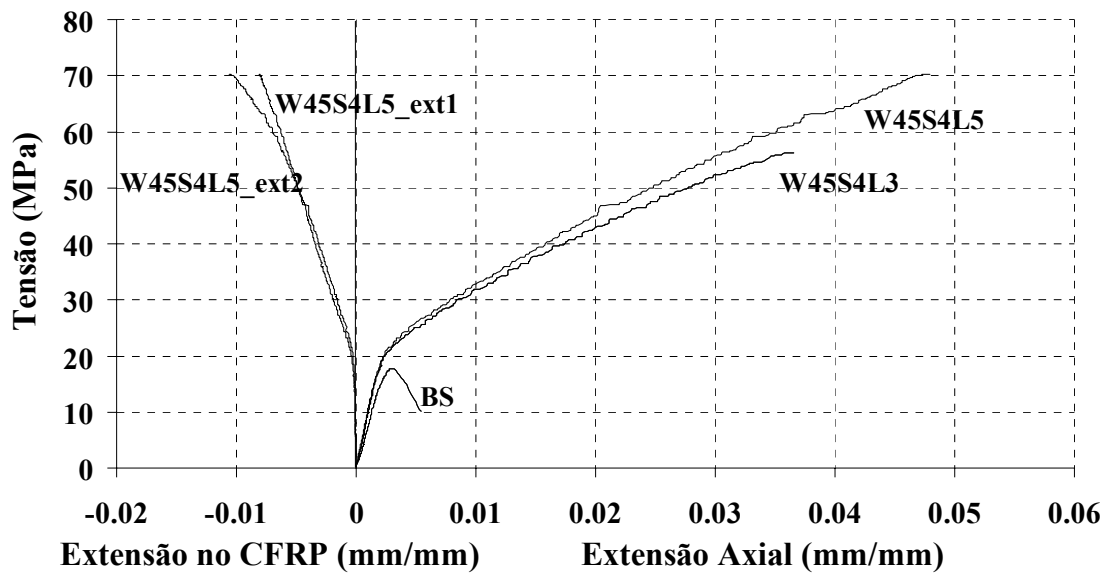


Figura 4.37 - Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries: a) W45S4; b) W60S3; c) W300S1 do grupo C16S300 (cont.).

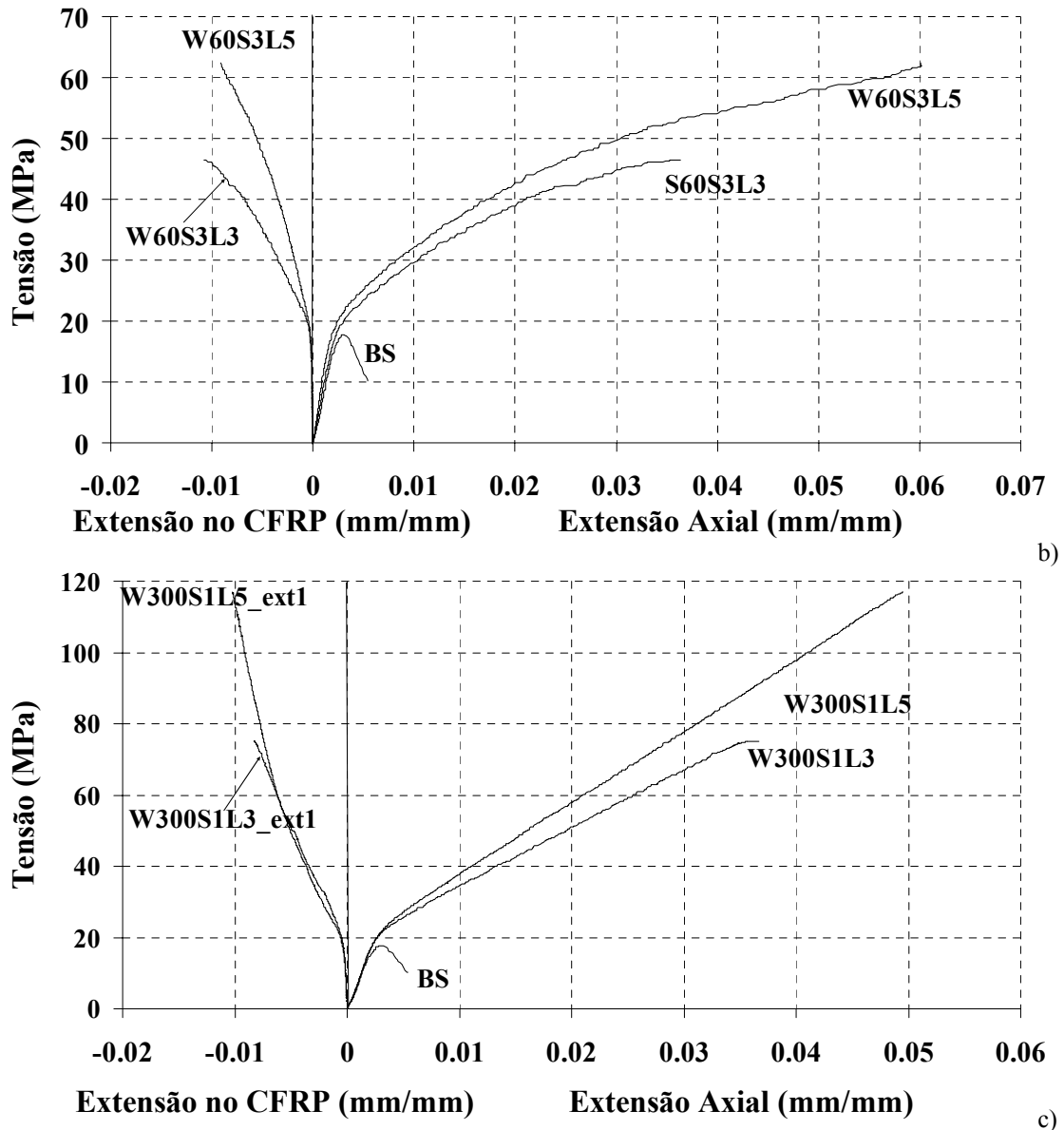


Figura 4.37 (cont.) - Curvas tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries: a) W45S4; b) W60S3; c) W300S1 do grupo C16S300.

Da análise dos valores incluídos na Tabela 4.8 e das curvas dos gráficos da Figura 4.37 podem-se extrair 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 ( $\epsilon_{fmax}$ ) variou entre 54% e 70% da sua extensão de rotura.
- Quanto ao parâmetro  $\epsilon_{fl}/\epsilon_{fl,r}$ , nesta série não se verificou a tendência observada nas duas anteriores, dado que na série W60S3 aquele parâmetro diminuiu com o

aumento de  $\rho_f$ , mas 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.

#### 4.5.3 Curvas $\sigma_c/f_{c0}$ versus $\epsilon_c/\epsilon_{c0}$

Na Figura 4.38 representam-se as curvas  $\sigma_c/f_c$  versus  $\epsilon_c/\epsilon_{c0}$  para as séries do grupo C16S300. Estes gráficos evidenciam o incremento da capacidade de carga proporcionado pelos sistemas de confinamento aplicados.

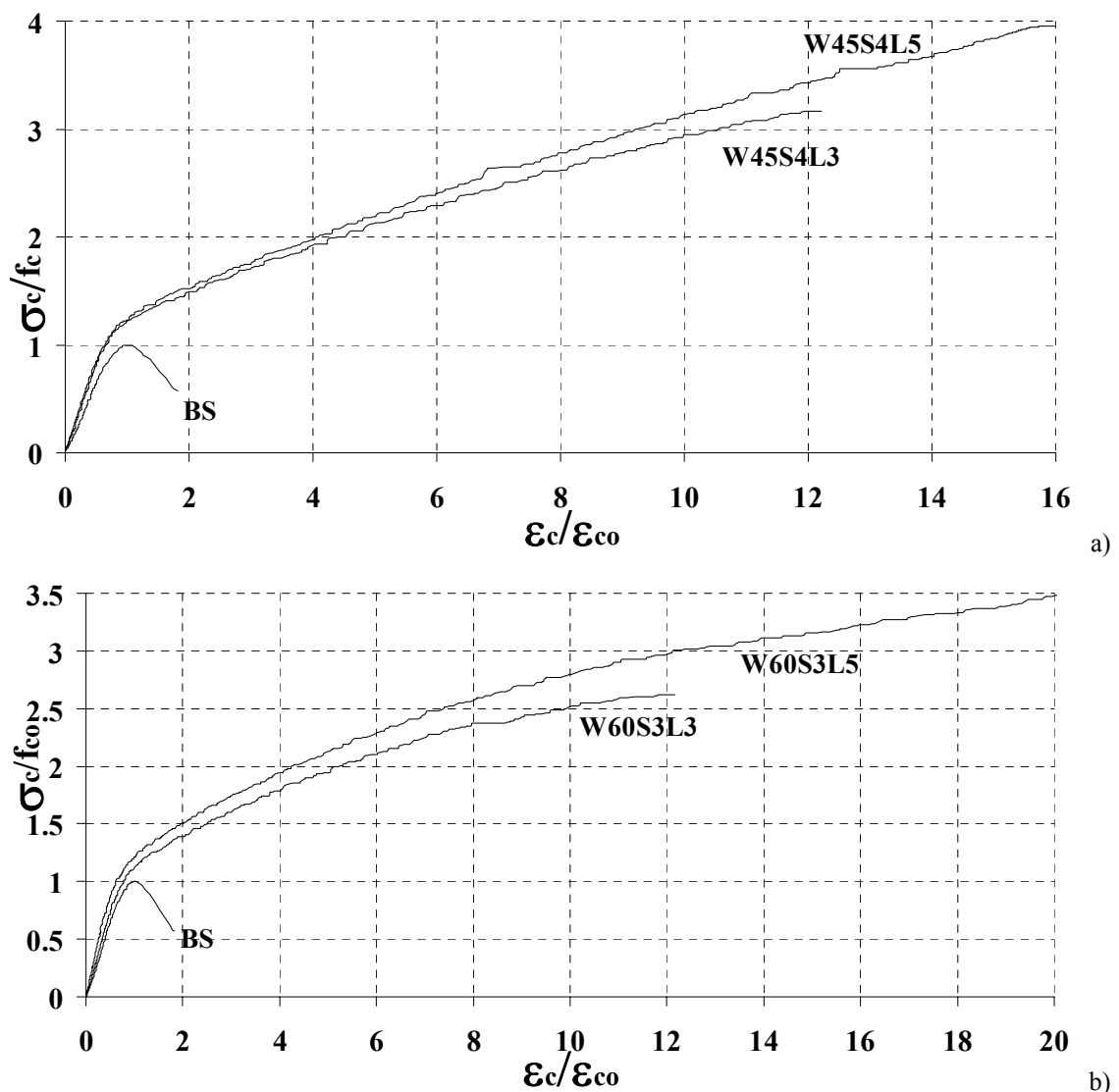


Figura 4.38 – Curvas  $\sigma_c/f_{c0}$  versus  $\epsilon_c/\epsilon_{c0}$  nas séries de ensaios do grupo C16S300 (cont.).

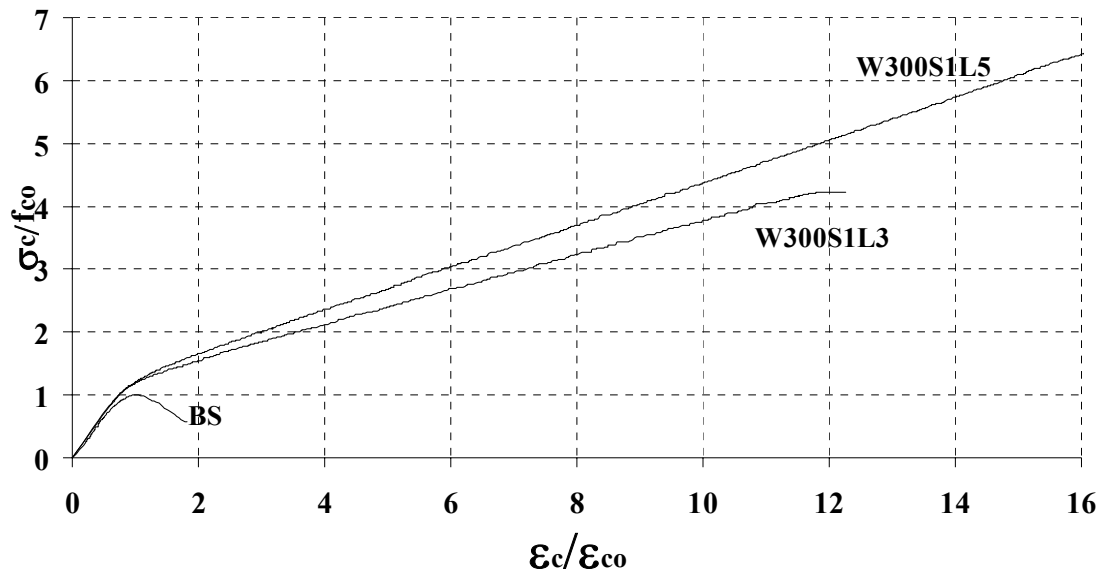


Figura 4.38 (cont.) – Curvas  $\sigma_c/f_{c0}$  versus  $\epsilon_c/\epsilon_{c0}$  nas séries de ensaios do grupo C16S300.

c)

As séries de provetes do grupo C16S300 foram as que registaram maiores valores em termos de aumento de capacidade de carga e de ductilidade. Nas séries confinadas com quatro faixas de 45 mm de largura a capacidade de carga aumentou 3 a 4 vezes os valores registados na série não confinada. Em termos de  $\epsilon_c/\epsilon_{c0}$  o aumento foi de 12 e 16 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 2.5 e 3.5, respectivamente, enquanto em termos de  $\epsilon_c/\epsilon_{c0}$  foi 12 e 20 nas séries W60S3L3 e W60S3L5.

Nos provetes totalmente confinados com 3 e 5 camadas o aumento em termos de capacidade de carga foi 4 e 6.5, enquanto que em termos de  $\epsilon_c/\epsilon_{c0}$  foi 12 e 16, respectivamente.

#### 4.5.4 Relação entre $\sigma_c/f_c$ e a percentagem de reforço ( $\rho_f$ )

Na Figura 4.39 representa-se a relação entre  $\sigma_c/f_{c0}$  e  $\rho_f$  para  $\epsilon_c/\epsilon_{c0}$  de 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 14 e 16.

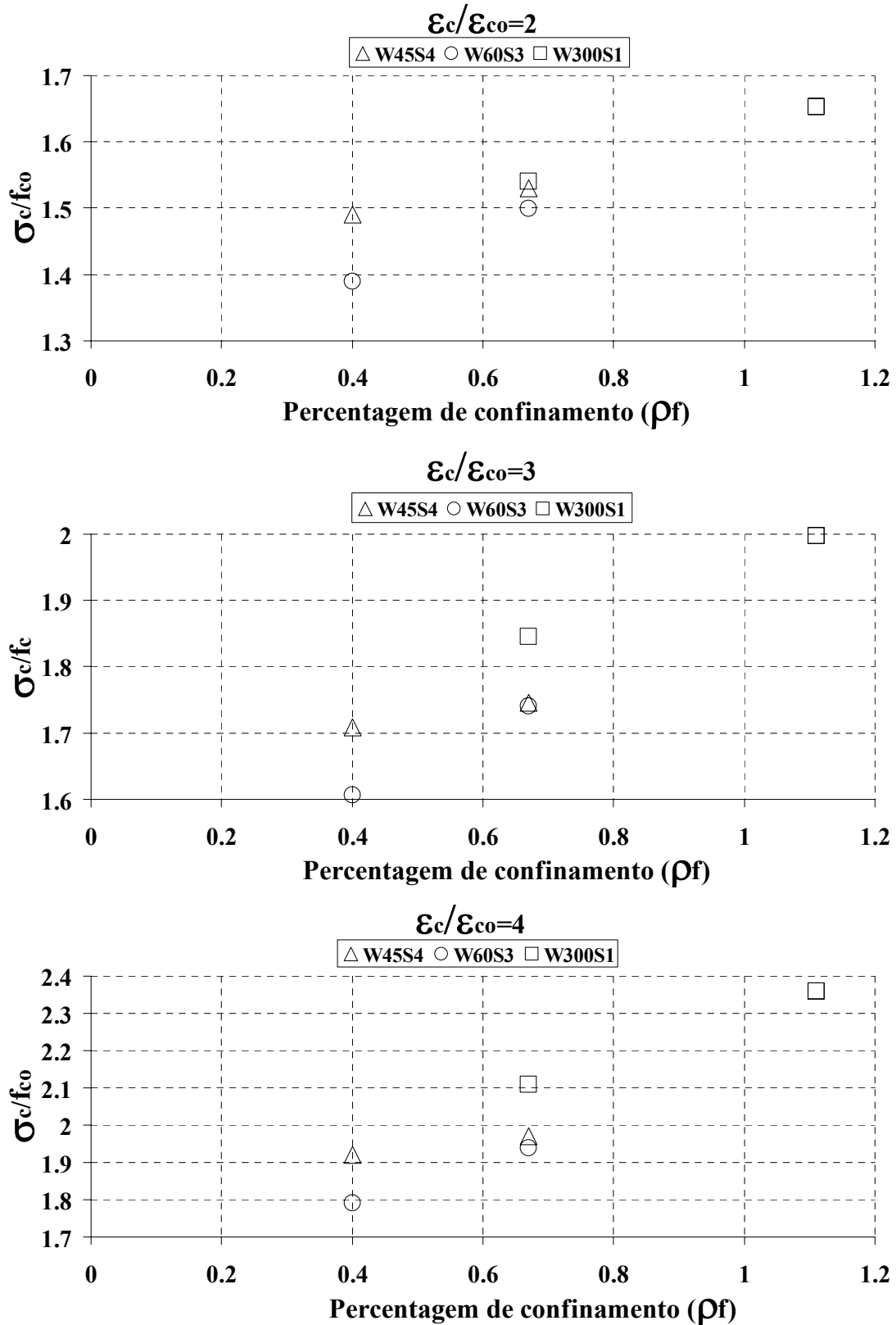


Figura 4.39 - Relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) nas séries de ensaios do grupo C16S300 (cont.) .

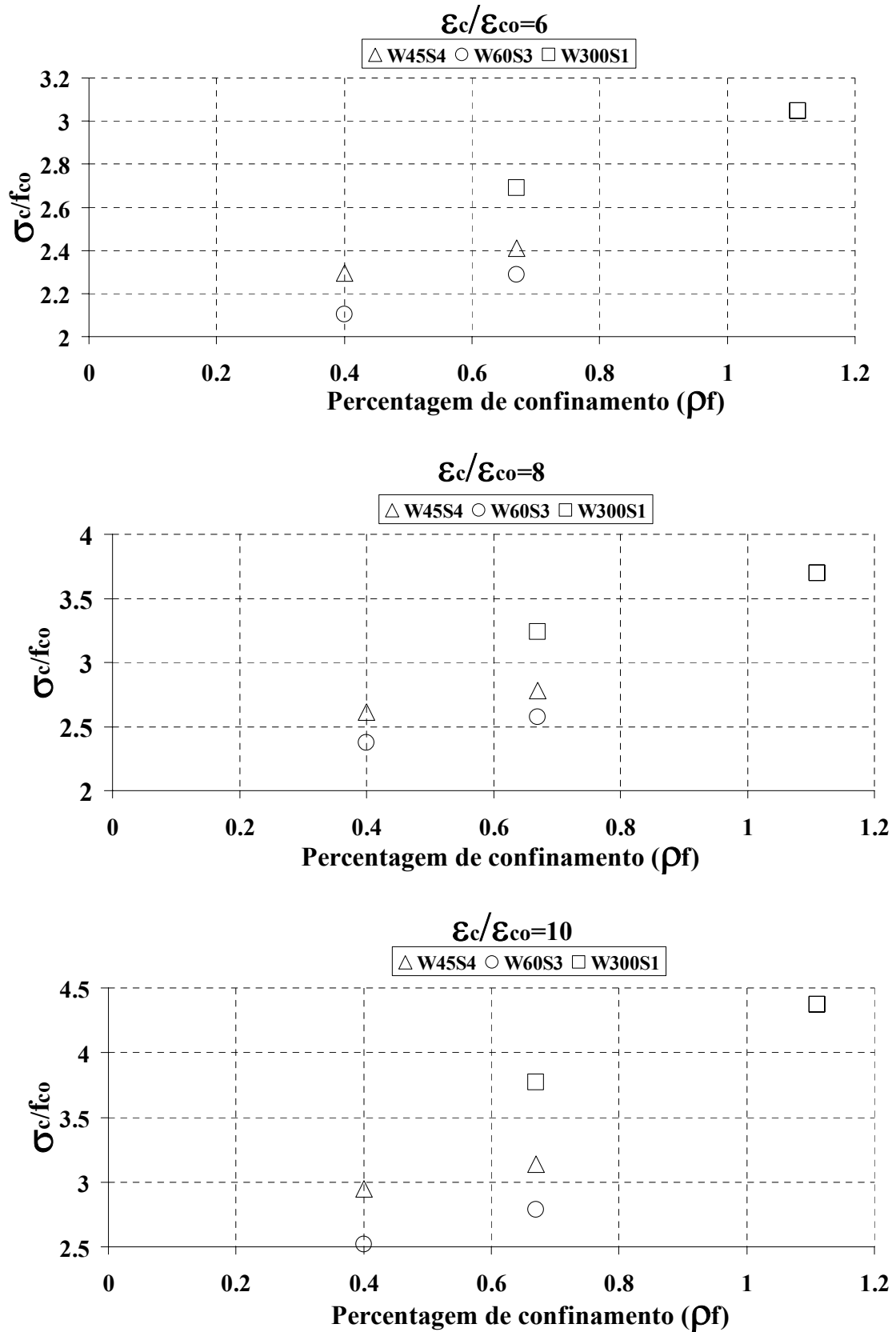


Figura 4.39 (cont.) - Relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) nas séries de ensaios do grupo C16S300.

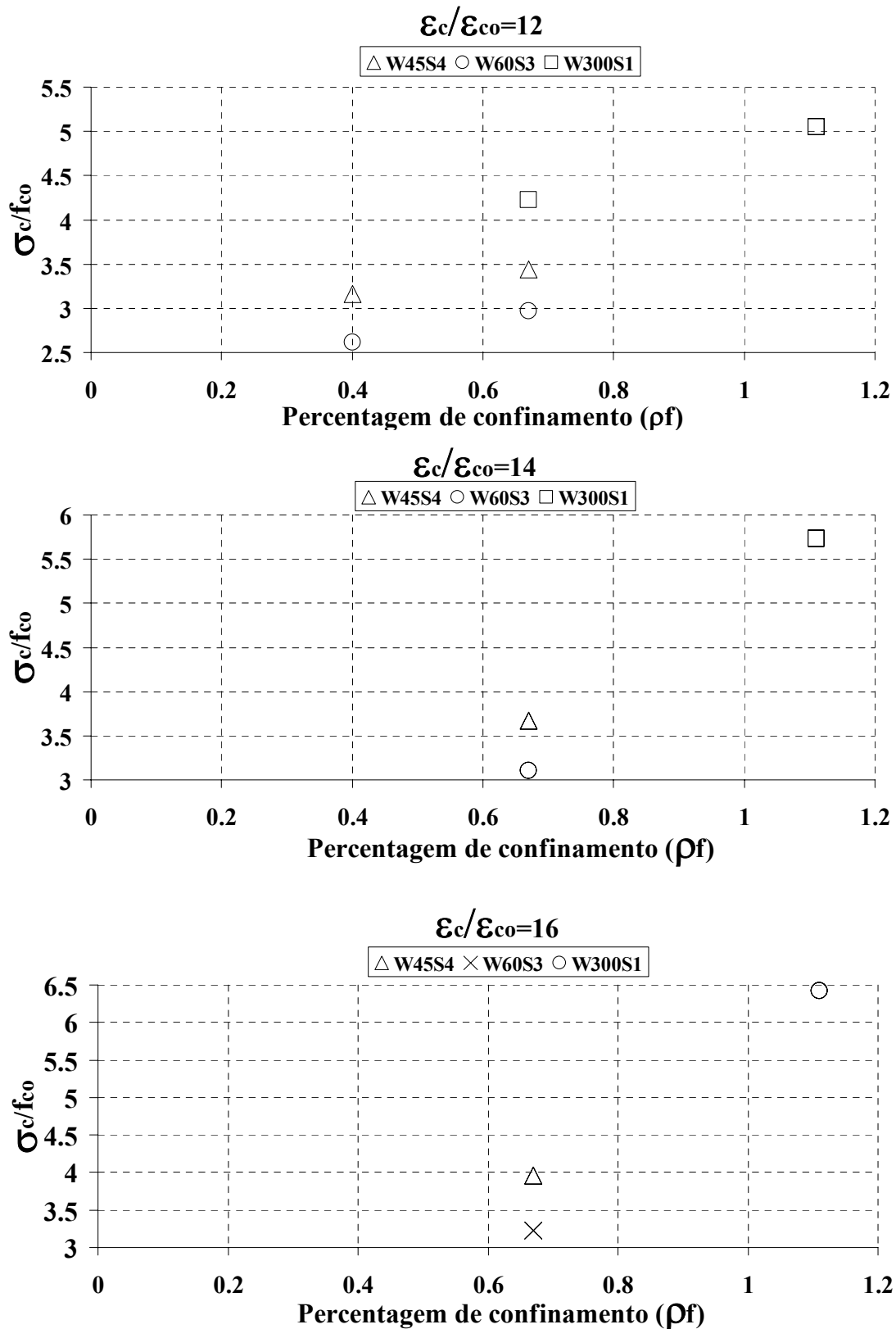


Figura 4.39 (cont.) – Relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) nas séries de ensaios do grupo C16S300.

Da análise dos gráficos da Figura 4.39 verifica-se que:

- A capacidade de carga aumentou com ( $\rho_f$ ).

- Para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}=2$  os níveis de incremento de capacidade de carga, para as séries W45S4 e W60S3, foram de aproximadamente 1.5 vezes.
- As séries W45S4 e W60S3 atingiram valores de aumento de capacidade de carga da ordem de 4 vezes, enquanto nas séries W300S1 foi alcançado um aumento próximo de 6 vezes.
- Para a mesma percentagem de confinamento, a série W45S4 teve maior capacidade de carga que a série W60S3, para todos os níveis de deformação.

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

Na Figura 4.40 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, 10, 12 e 14. O modo como  $\Delta U$  e  $U_c$  foram obtidos está descrito na secção 4.2.5.

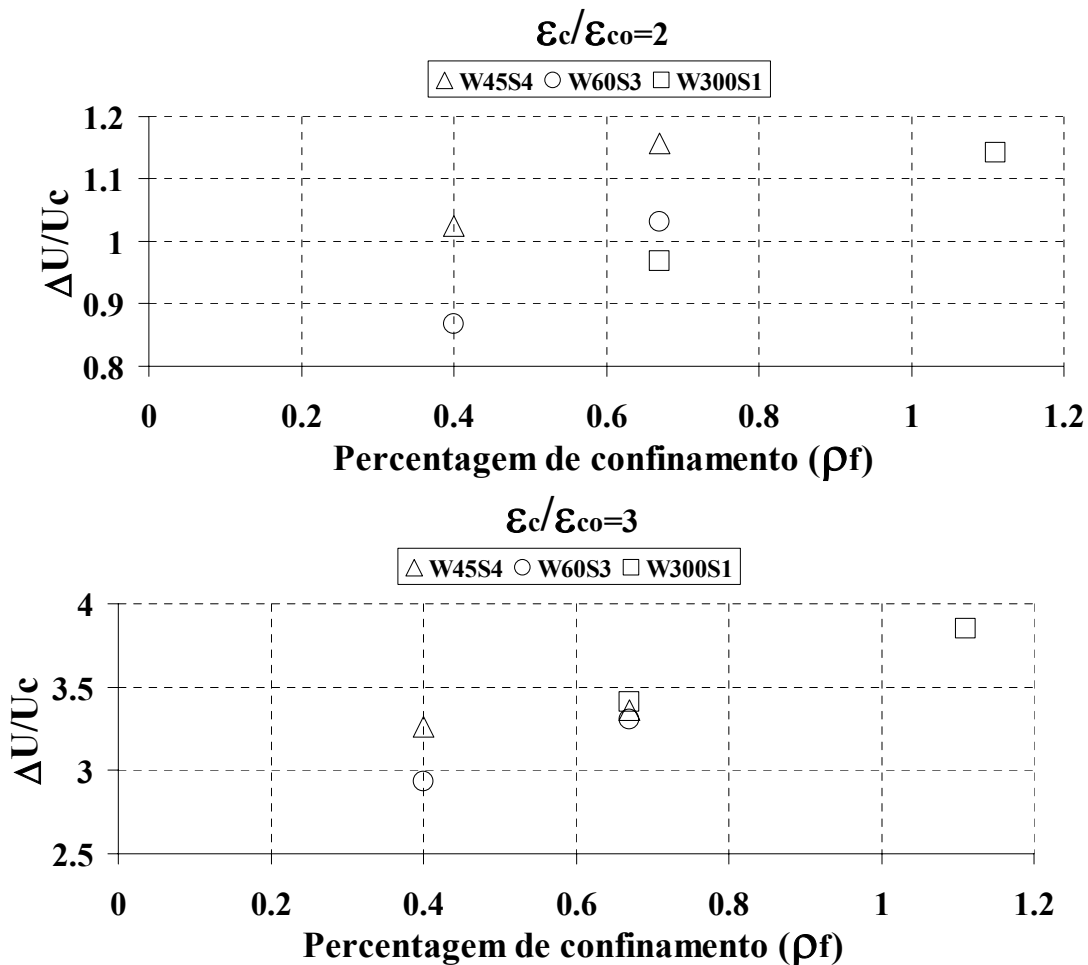


Figura 4.40 - Relação entre  $\Delta U/U_c$  e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) nas séries de ensaios do grupo C16S300 (cont.).

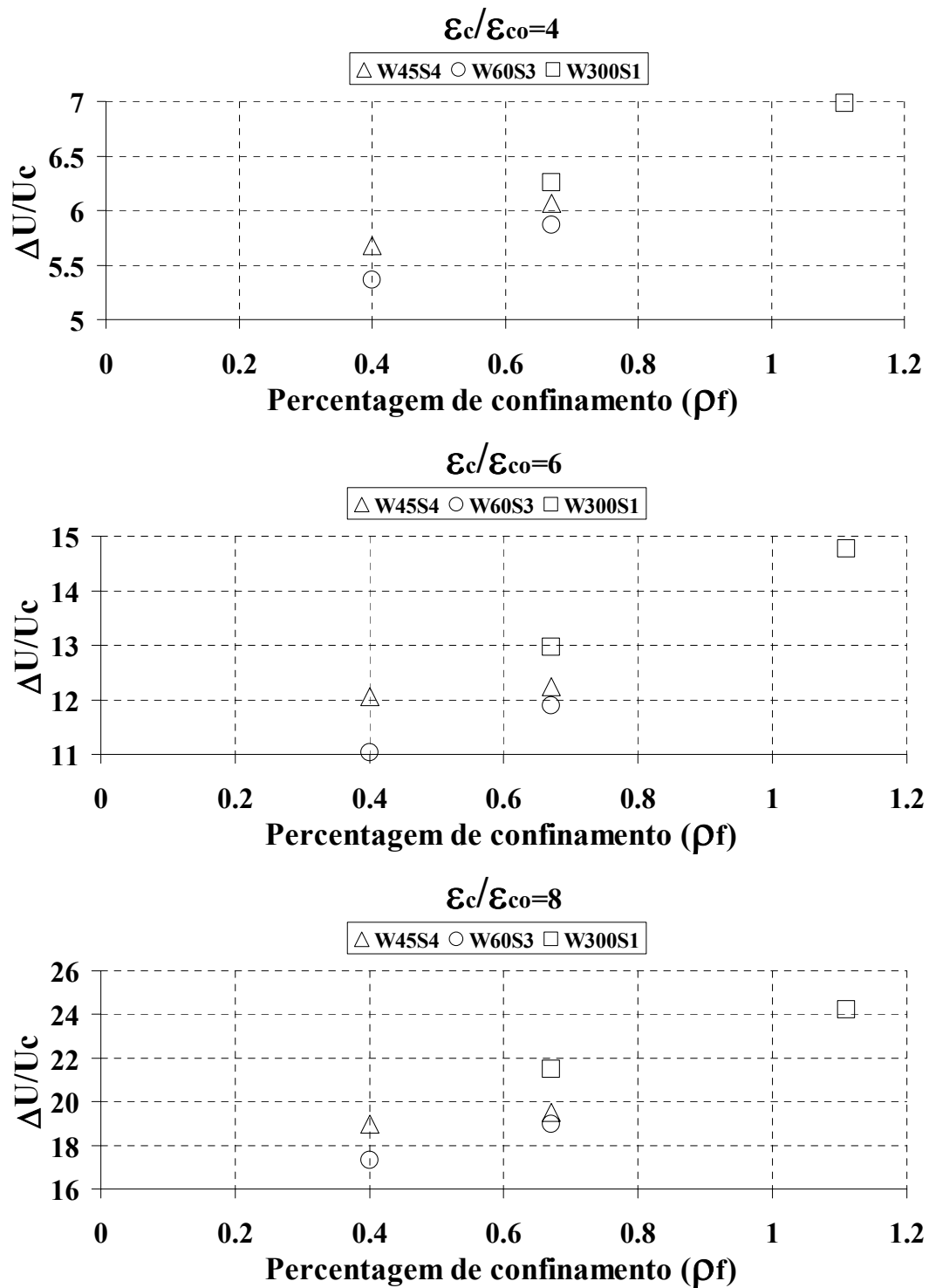


Figura 4.40 (cont.) - Relação entre  $\Delta U/U_c$  e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) nas séries de ensaios do grupo C16S300.

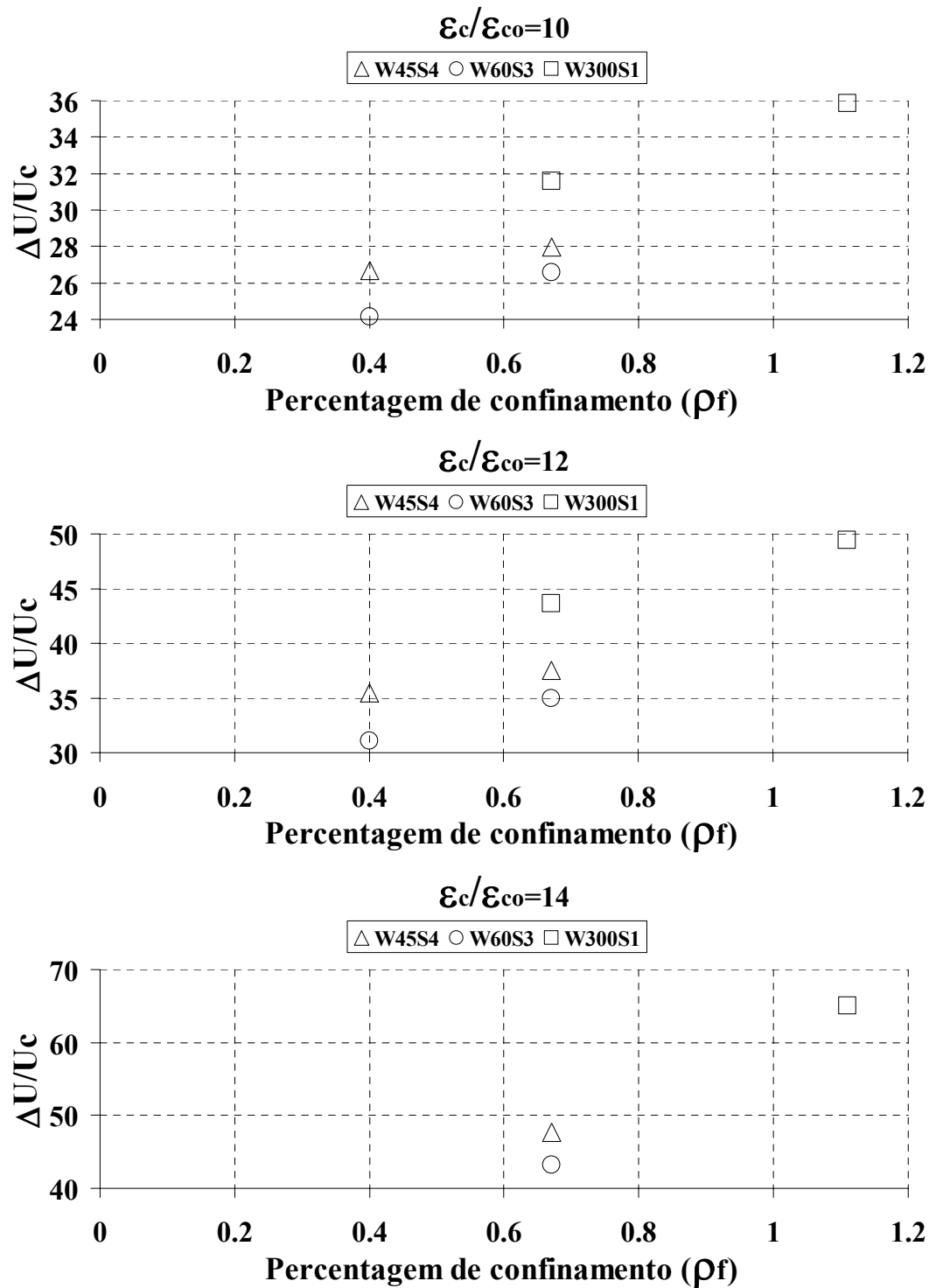


Figura 4.40 (cont.) – Relação entre  $\Delta U/U_c$  e a percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) nas séries de ensaios do grupo C16S300.

Da análise dos gráficos apresentados na Figura 4.40 verifica-se que:

- A capacidade de absorção de energia aumentou com  $\rho_f$ ;
- Para  $\epsilon_c/\epsilon_{co}=2$   $\Delta U/U_c$  foi ligeiramente superior ao valor unitário, enquanto para  $\epsilon_c/\epsilon_{co}=14$ ,  $\Delta U/U_c$  foi cerca de 60;

- Nas séries W45S4 e W60S3, de igual  $\rho_f$ , a primeira foi mais efectiva em termos de capacidade de absorção de energia;
- De entre as séries de igual  $\rho_f$ , a W300S1 foi a mais efectiva em termos de aumento de capacidade de absorção de energia do provete;

#### 4.5.6 Gráficos $\sigma/\sigma_{conf,L3,L5}$ versus $\rho/\rho_{conf,L3,L5}$

Na Figura 4.41 representa-se a relação entre  $\sigma_c/\sigma_{c,L3}$  e  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  para  $\epsilon_c/\epsilon_{c0}$  de 2, 3, 4, 6, 8, 10 e 12, em que o significado de  $\sigma_{c,L3}$  e  $\rho_{f,L3}$  foi apresentado na secção 4.2.6

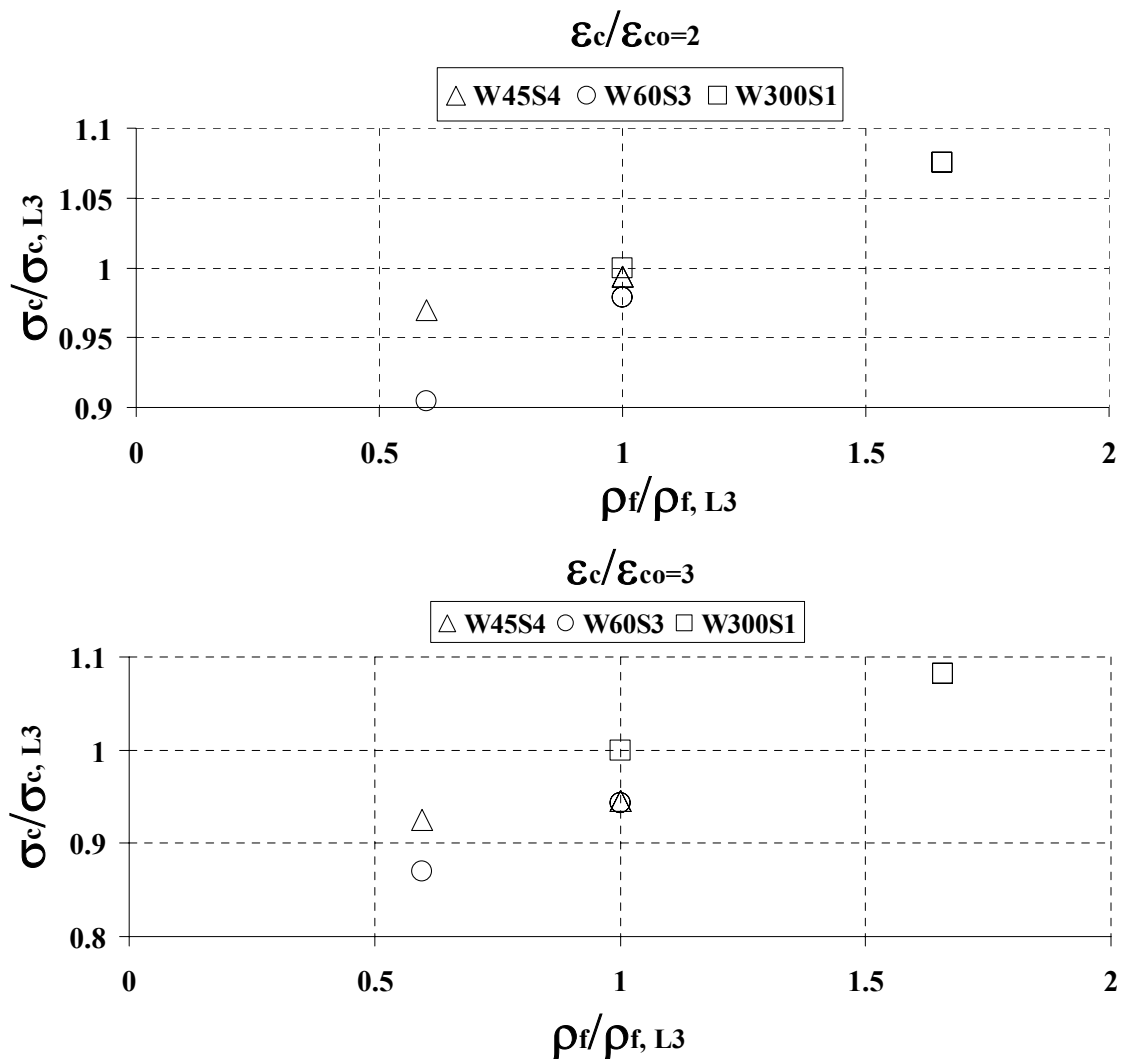


Figura 4.41 - Relação entre  $\sigma_c/\sigma_{c,L3}$  e  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  nas séries de ensaios do grupo C16S300 (cont.).

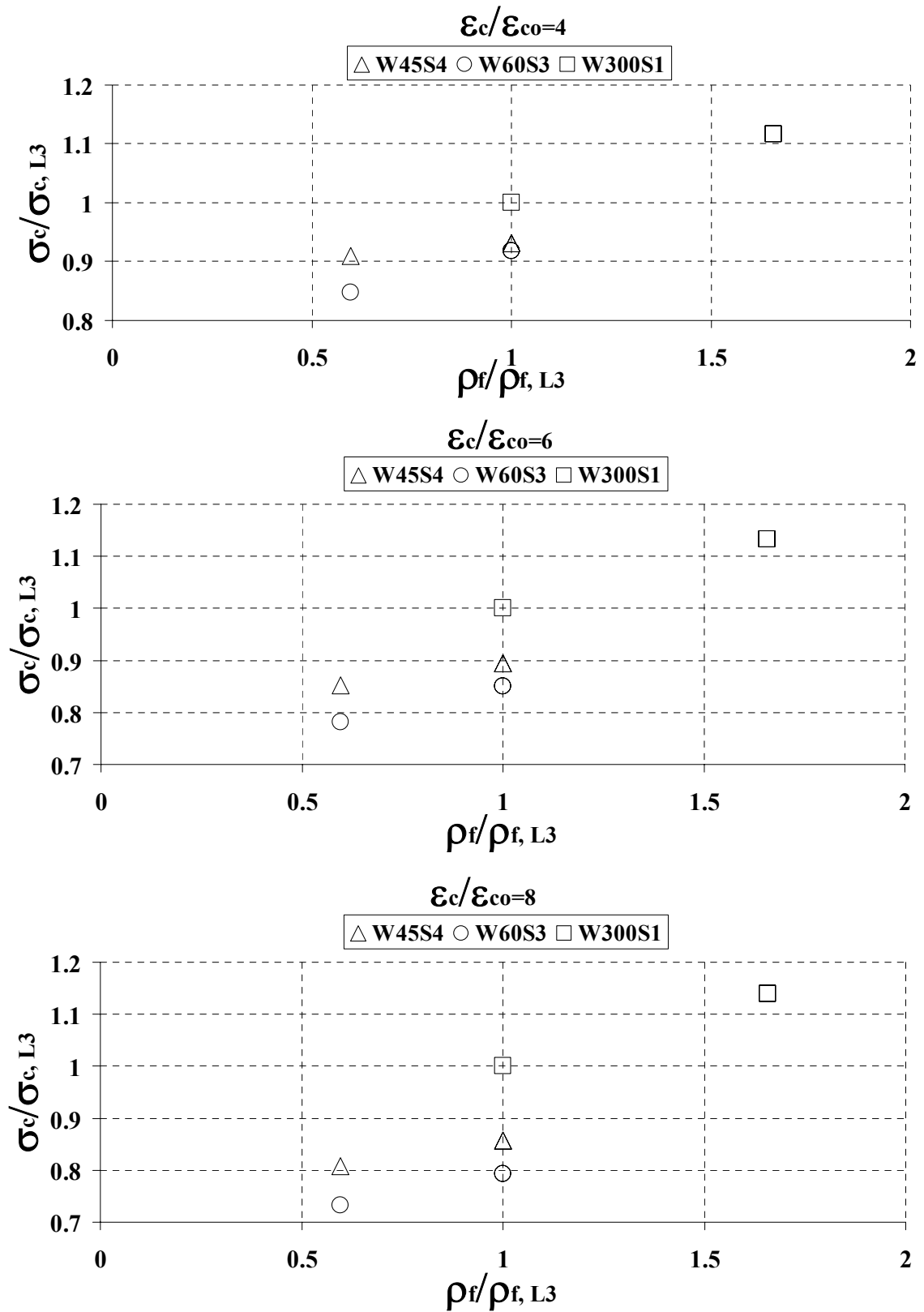


Figura 4.41 (cont.) - Relação entre  $\sigma_c/\sigma_{c,L3}$  e  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  nas séries de ensaios do grupo C16S300.

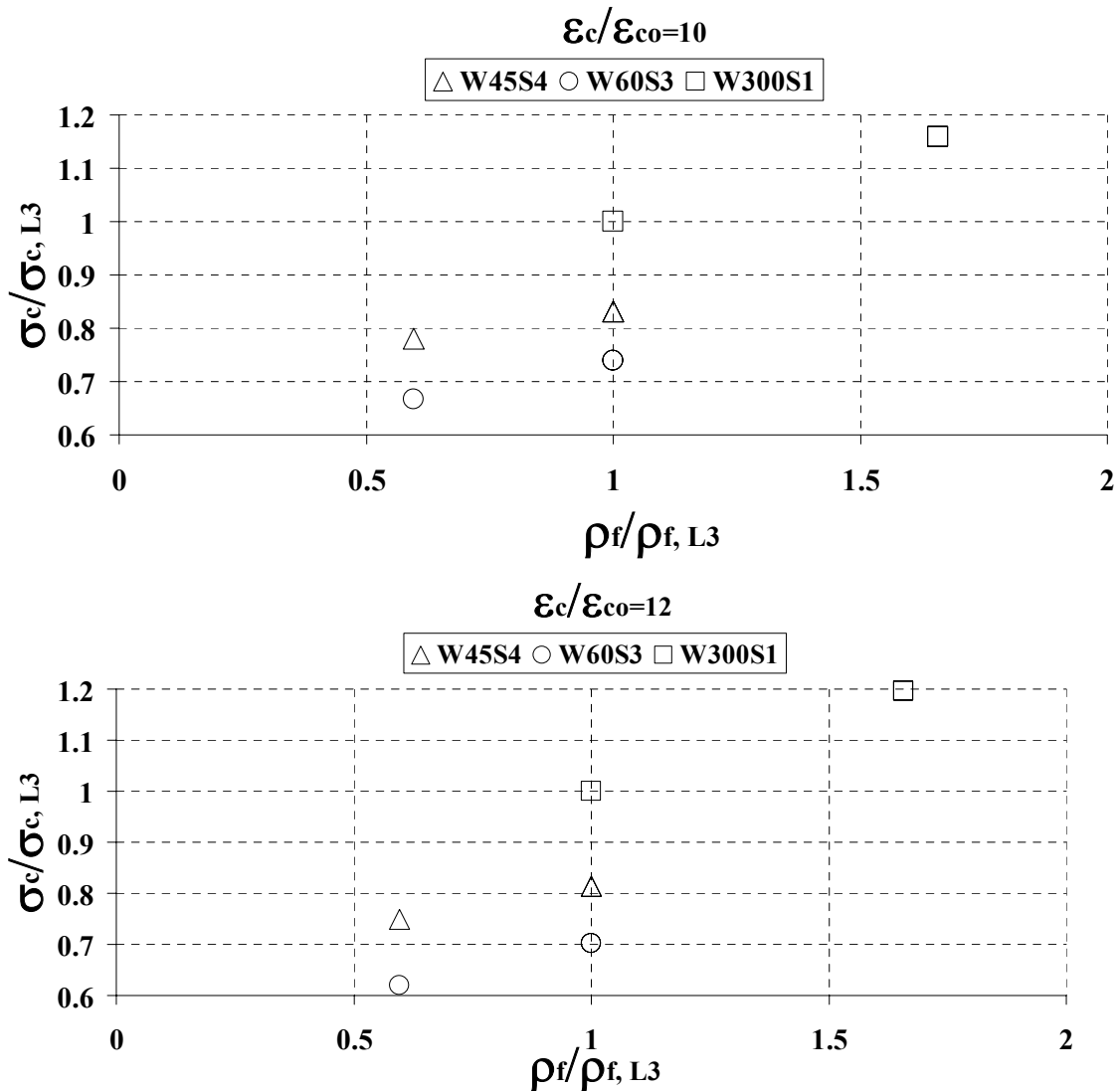


Figura 4.41 (cont.) – Relação entre  $\sigma_c/\sigma_{c,L3}$  e  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  nas séries de ensaios do grupo C16S300.

Da análise dos gráficos da Figura 4.41 verifica-se que:

- Tal como nas séries anteriores  $\sigma_c/\sigma_{c,L3}$  aumentou com  $\rho_f/\rho_{f,L3}$ .
- Para  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  de 2, 3, 4 as séries W45S4L5 e W60S3L5 tiveram incrementos de capacidade de carga semelhantes aos obtidos nos provetes totalmente confinados com 3 camadas, enquanto em relação à série W300S1L5 esses incrementos foram cerca de 10% inferiores. No caso das séries W45S4L3 e W60S3L3 os valores de  $\sigma_c/\sigma_{c,L3}$  foram 10% inferiores ao da série W300S1L3 e 20% inferiores ao da série W300S1L5.
- Para  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  de 6 e 8, as séries W45S4 e W60S3 tiveram resultados similares. Os valores destas séries foram 20% e 30% inferiores aos registados nas séries totalmente confinadas com 3 e 5 camadas, respectivamente.

- Para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{c0}$  de 10 e 12 o  $\sigma_c/\sigma_{c,L3}$  da série W45S4L3 foi cerca de 30% inferior ao da série W300S1L3 e 50% inferior ao da série W300S1L5. Por sua vez, o valor de  $\sigma_c/\sigma_{c,L3}$  da série W45S4L5 foi cerca de 20% inferior ao da série W300S1L3 e 40% inferior ao da série W300S1L5. Na série W60S3L3 foi registado um valor 35% inferior ao da série W300S1L3 e 55% inferior ao da série W300S1L5. Finalmente, na série W60S2L5 obteve-se um valor 30% inferior ao registado na série W300S1L3 e 50% inferior ao da série W300S1L5.
- Para todos os níveis de deformação analisados, as séries W45S4 apresentaram maiores incrementos de carga que os registados nas séries W60S3.

Na Figura 4.42 representa-se a relação entre  $\sigma_c/\sigma_{conf,L5}$  e  $\rho_f/\rho_{f,L5}$  para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{c0}$  de 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 14 e 16.

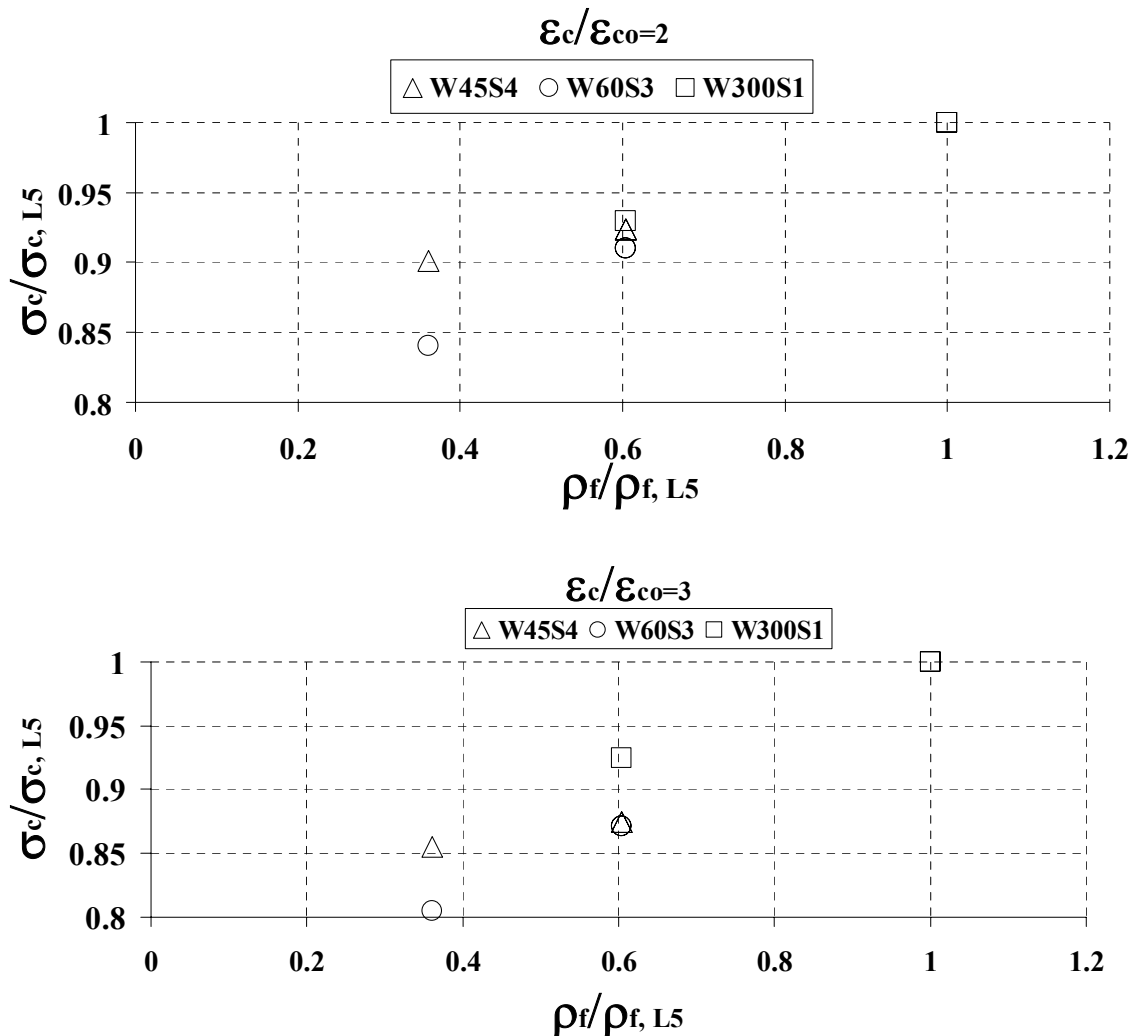


Figura 4.42 – Relação entre  $\sigma_c/\sigma_{c,L5}$  e  $\rho_f/\rho_{f,L5}$  nas séries de ensaios do grupo S16S300 (cont.).

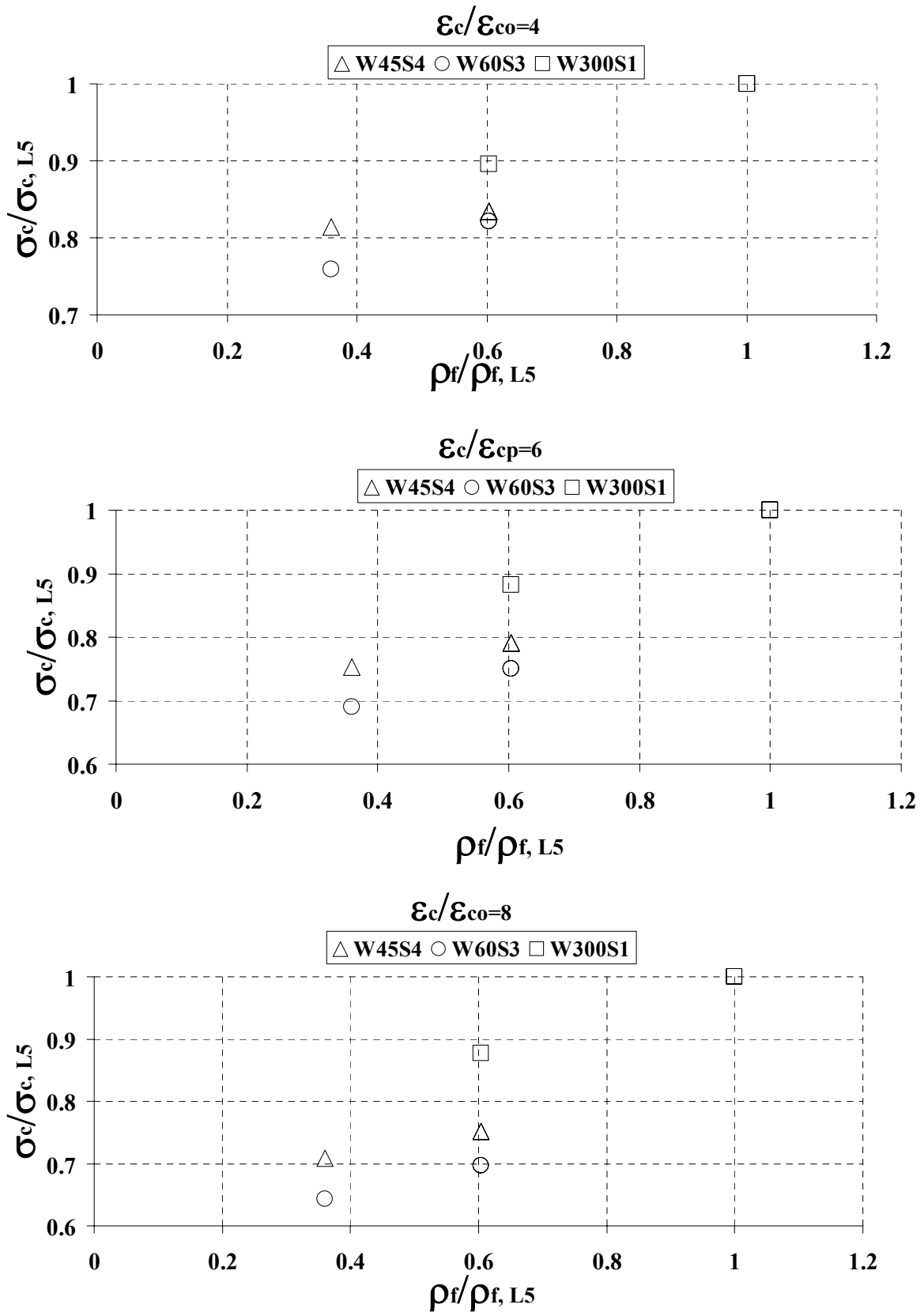


Figura 4.42 (cont.) – Relação entre  $\sigma_c/\sigma_{c,L5}$  e  $\rho_f/\rho_{f,L5}$  nas séries de ensaios do grupo S16S300.

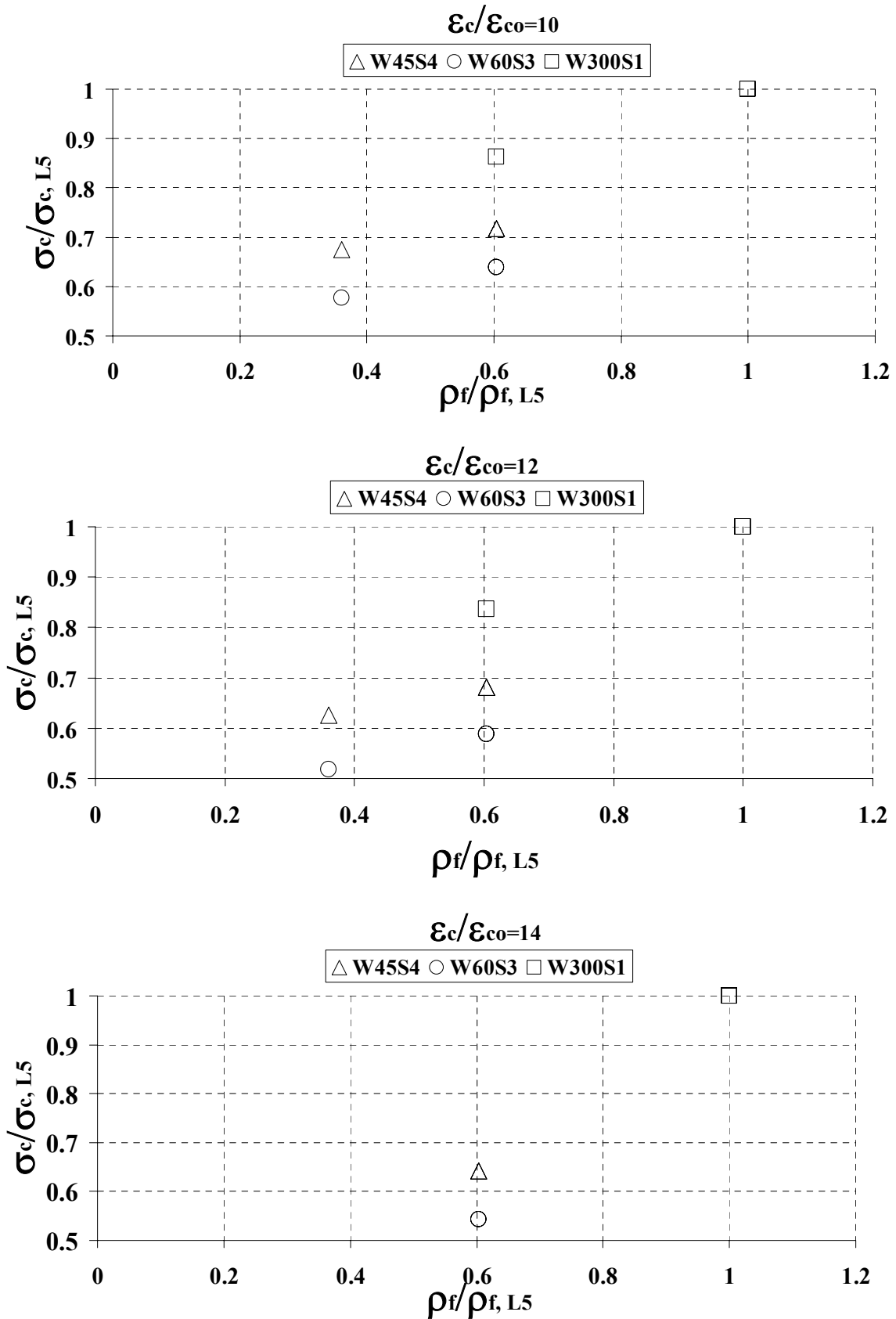


Figura 4.42 (cont.) – Relação entre  $\sigma_c/\sigma_{c,L5}$  e  $\rho_f/\rho_{f,L5}$  nas séries de ensaios do grupo S16S300.

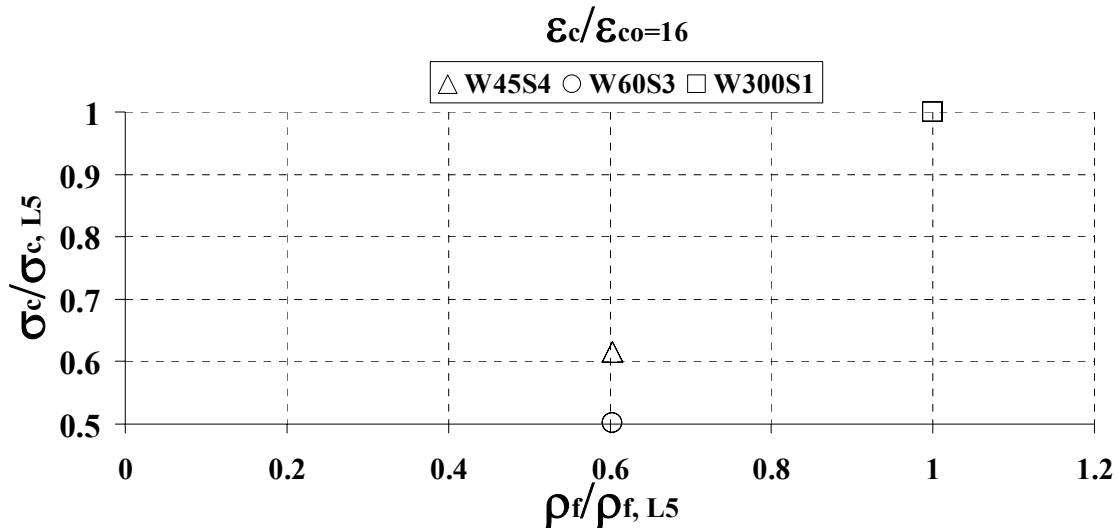


Figura 4.42 (cont.) – Relação entre  $\sigma_c/\sigma_{c,L5}$  e  $\rho_f/\rho_{f,L5}$  nas séries de ensaios do grupo S16S300.

Da análise dos gráficos da Figura 4.42 verifica-se que:

- Para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{c0}$  de 2, 3, 4 as séries W45S4L5 e W60S3L5 tiveram incrementos de capacidade de carga semelhantes aos obtidos nas séries totalmente confinadas com 3 camadas e 10% a 20% inferiores aos obtidos nas séries W300S1L5. No caso das séries W45S4L3 e W60S3L3 os valores  $\sigma_c/\sigma_{c,L5}$  foram 10% a 20% inferiores ao da série W300S1L3 e 20% a 30% inferiores ao da série W300S1L5.
- Para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{c0}$  de 6 e 8, as séries W45S4L3 e W60S3L3 tiveram resultados similares de  $\sigma_c/\sigma_{c,L5}$ , 15% a 20% inferiores ao da série totalmente confinada com 3 camadas e 35% inferiores ao da série totalmente confinada com 5 camadas. As séries W45S4L5 e W60S3L5 tiveram valores de  $\sigma_c/\sigma_{c,L5}$  10% a 15% inferiores ao da série totalmente confinados com 3 camadas e 20% a 25% inferiores ao da série de provetes totalmente confinados com 5 camadas.
- Para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{c0}$  de 10 e 12 as séries W45S4L3 e W60S3L3 tiveram resultados similares, 20% a 30% inferiores ao da série de provetes totalmente confinados com 3 camadas e 40% inferiores ao da série de provetes totalmente confinados com 5 camadas. As séries W45S4L5 e W60S3L5 tiveram valores de  $\sigma_c/\sigma_{c,L5}$  20% a 25% inferiores ao da série de provetes totalmente reforçados com 3 camadas e 40% a 45% inferiores ao da série de provetes totalmente confinados com 5 camadas.
- Dos sistemas de confinamento discreto, apenas as séries W45S4L5 e W60S3L5 alcançaram níveis de deformação 16 vezes superiores aos registados nos

correspondentes provetes não confinados. Para  $\epsilon_c/\epsilon_{c0}$  de 14 e 16 os valores de  $\sigma_c/\sigma_{c,L5}$  das séries W45S4L5 e W60S3L5 foram cerca de 50% a 60% dos valores registados nas séries de provetes totalmente confinados com 5 camadas.

- Para todos os níveis de deformação analisados as séries W45S4 apresentaram maiores incrementos de carga que os registados nas séries W60S3.

#### 4.5.7 Índice de rentabilidade

Na Figura 4.43 apresenta-se a relação entre o índice de rentabilidades (IR) e  $\rho_f/\rho_{f,L3}$ , para os níveis de extensão,  $\epsilon_c/\epsilon_{c0}$ , que se têm vindo a considerar. O significado de IR foi apresentado na secção 4.2.7.

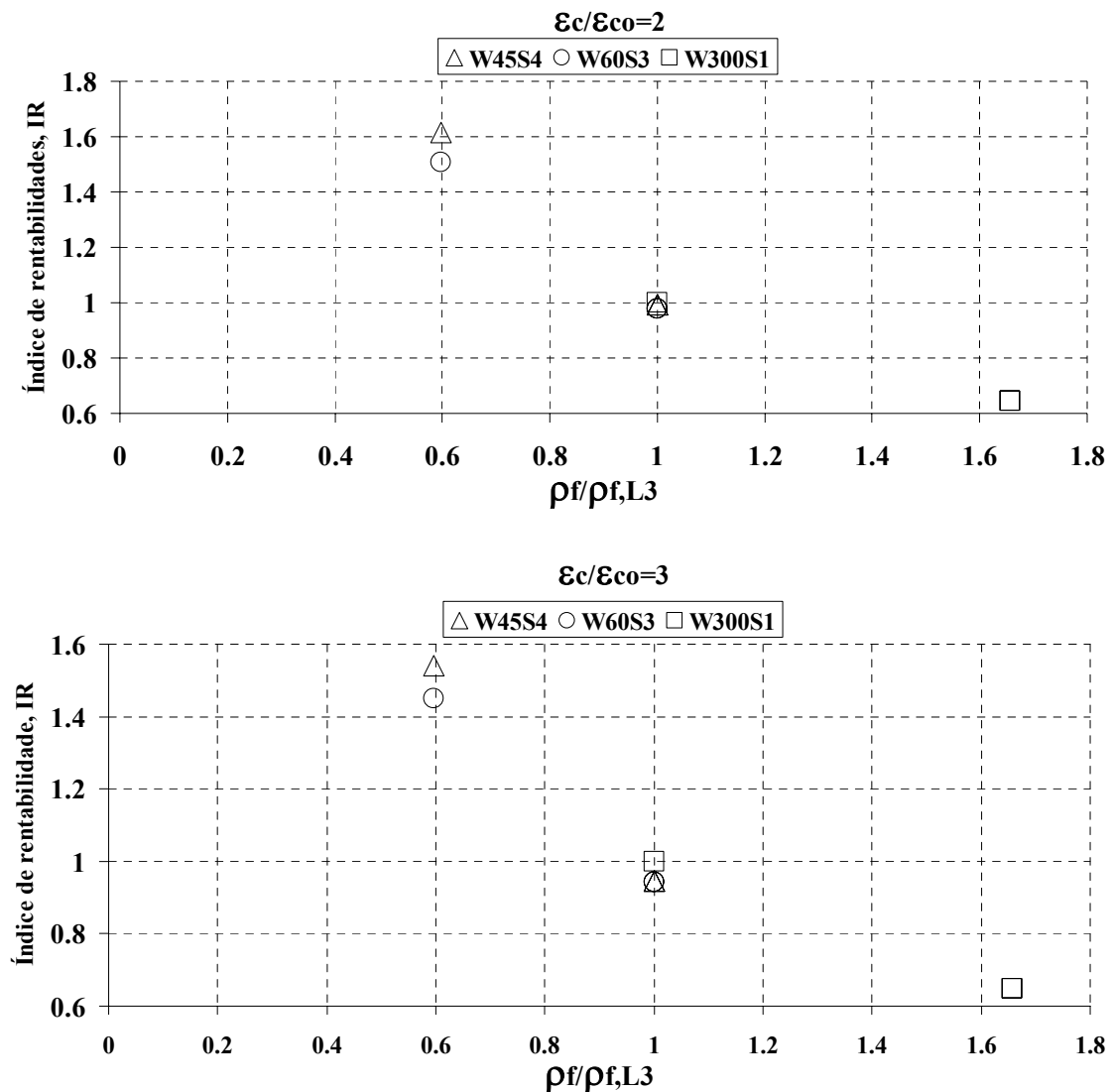


Figura 4.43 – Índice de rentabilidade (IR) versus  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  nas séries de ensaios do grupo C16S300 (cont.)

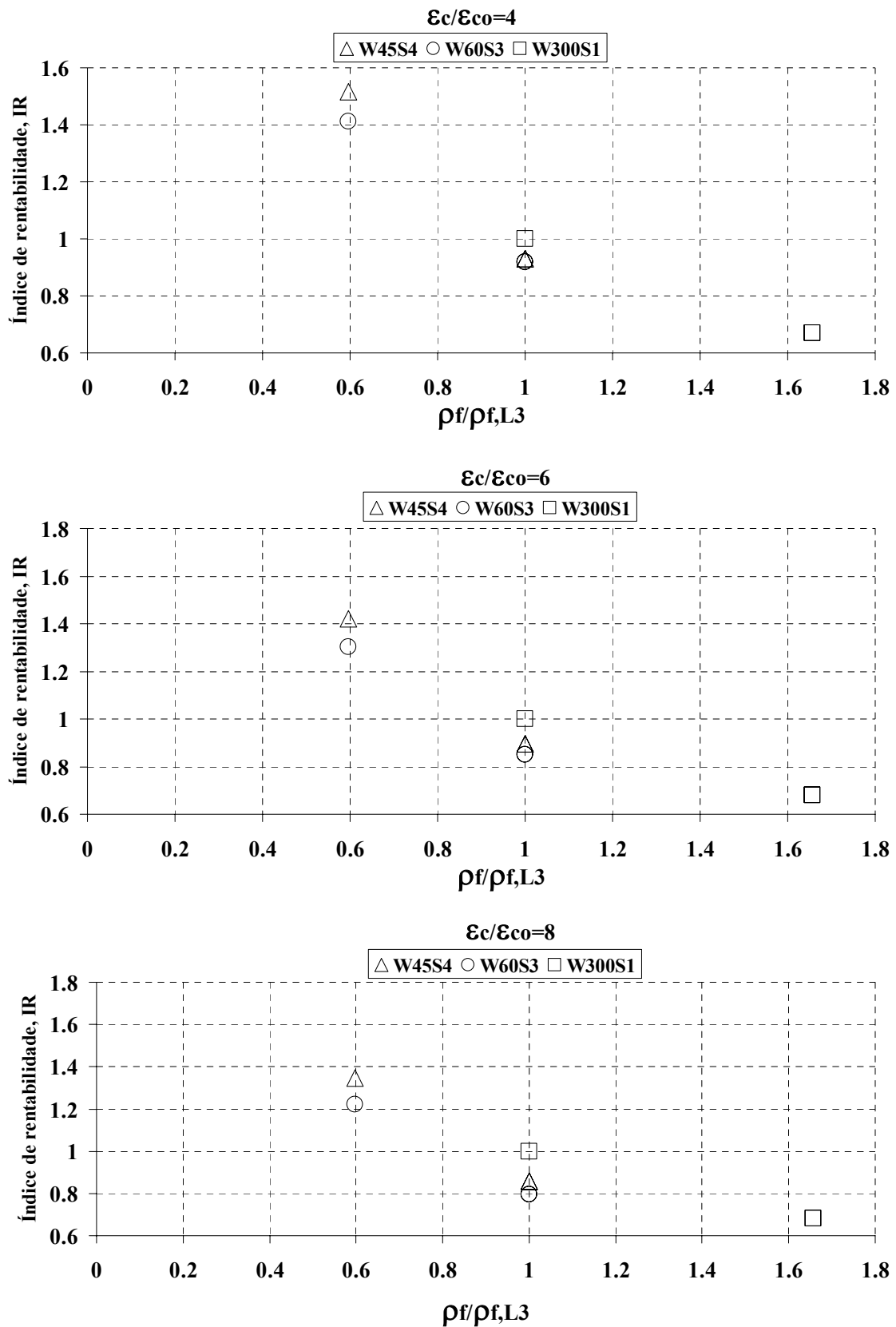


Figura 4.43 (cont.) – Índice de rentabilidade (IR) versus  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  nas séries de ensaios do grupo C16S300

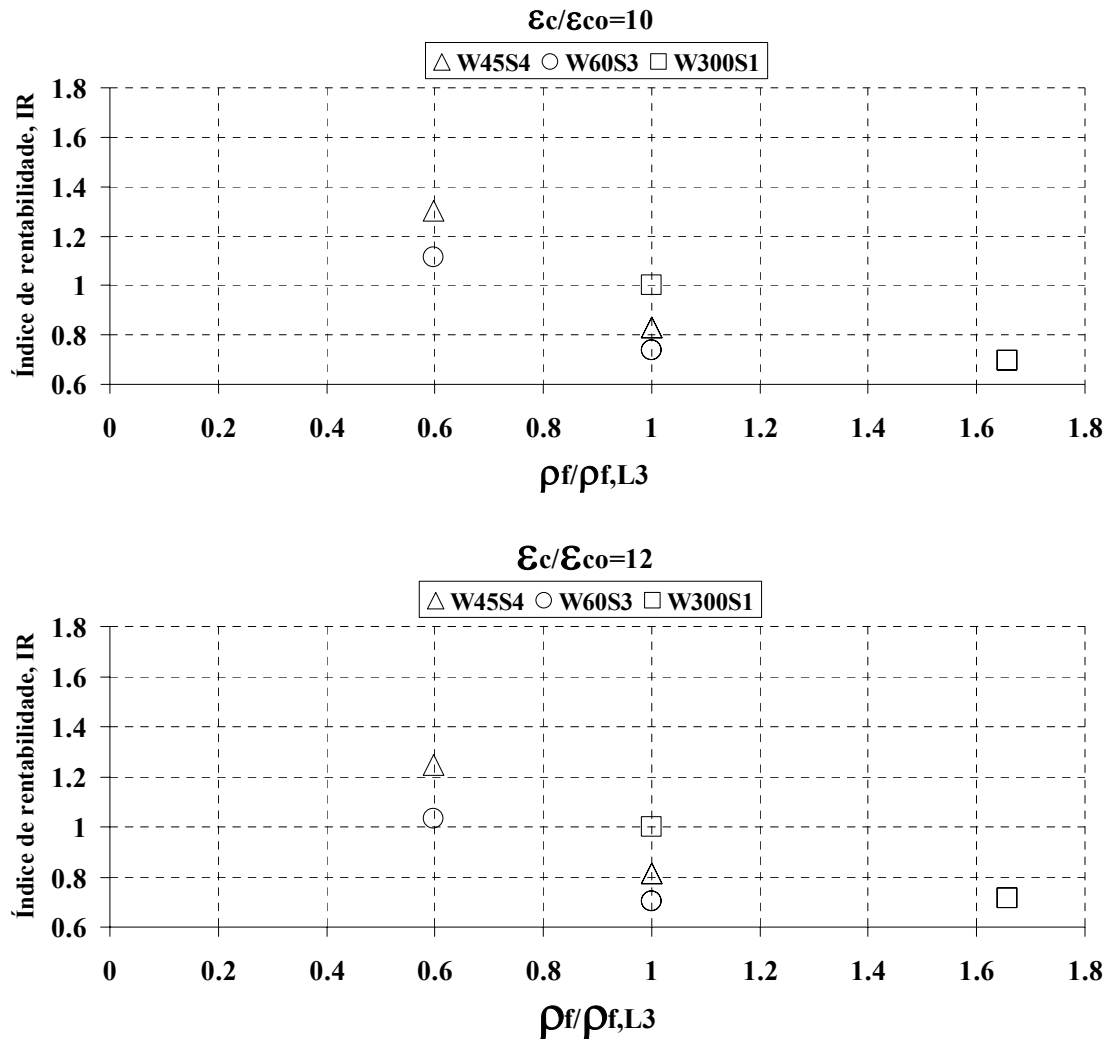


Figura 4.43 (cont.) – Índice de rentabilidade (IR) versus  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  nas séries de ensaios do grupo C16S300

Da análise dos gráficos da Figura 4.43 observa-se que:

- Para os diferentes níveis de deformação a rentabilidade obtida na série W45S4 foi ligeiramente superior à obtida na série W60S3.
- Para  $\epsilon_c/\epsilon_{co}=2$  os níveis de rentabilidade das séries W45S4L5, W60S3L5 e W300S1L3 foram iguais. Com o aumento da deformação o IR da série W300S1L3 foi aumentando em relação ao das outras duas séries. O IR da série W5S4L5 foi superior ao da série W60S3L5. Essa superioridade acentua-se a partir de  $\epsilon_c/\epsilon_{co} = 6$ . Para  $\epsilon_c/\epsilon_{co}=12$  o IR das séries W300S1L3, W45S4L5 e W60S3L5 foi de 1.0, 0.8 e 0.7, respectivamente.
- O IR das séries confinadas parcialmente com 3 camadas, W45S4L3 e W60S3L3 foi aproximadamente 60% e 50%, respectivamente, do IR registado nas séries confinadas parcialmente com 5 camadas, W45S4L5 e W60S3L5. Esta diferença diminuiu com o aumento dos níveis de deformação.

- O índice de rentabilidade diminui com o aumento dos níveis de deformação.

Na Figura 4.44 apresenta-se a relação entre o índice de rentabilidades IR e  $\rho_f/\rho_{f,L5}$ , para os valores de  $\varepsilon_c/\varepsilon_{c0}$ , que se têm vindo a considerar.

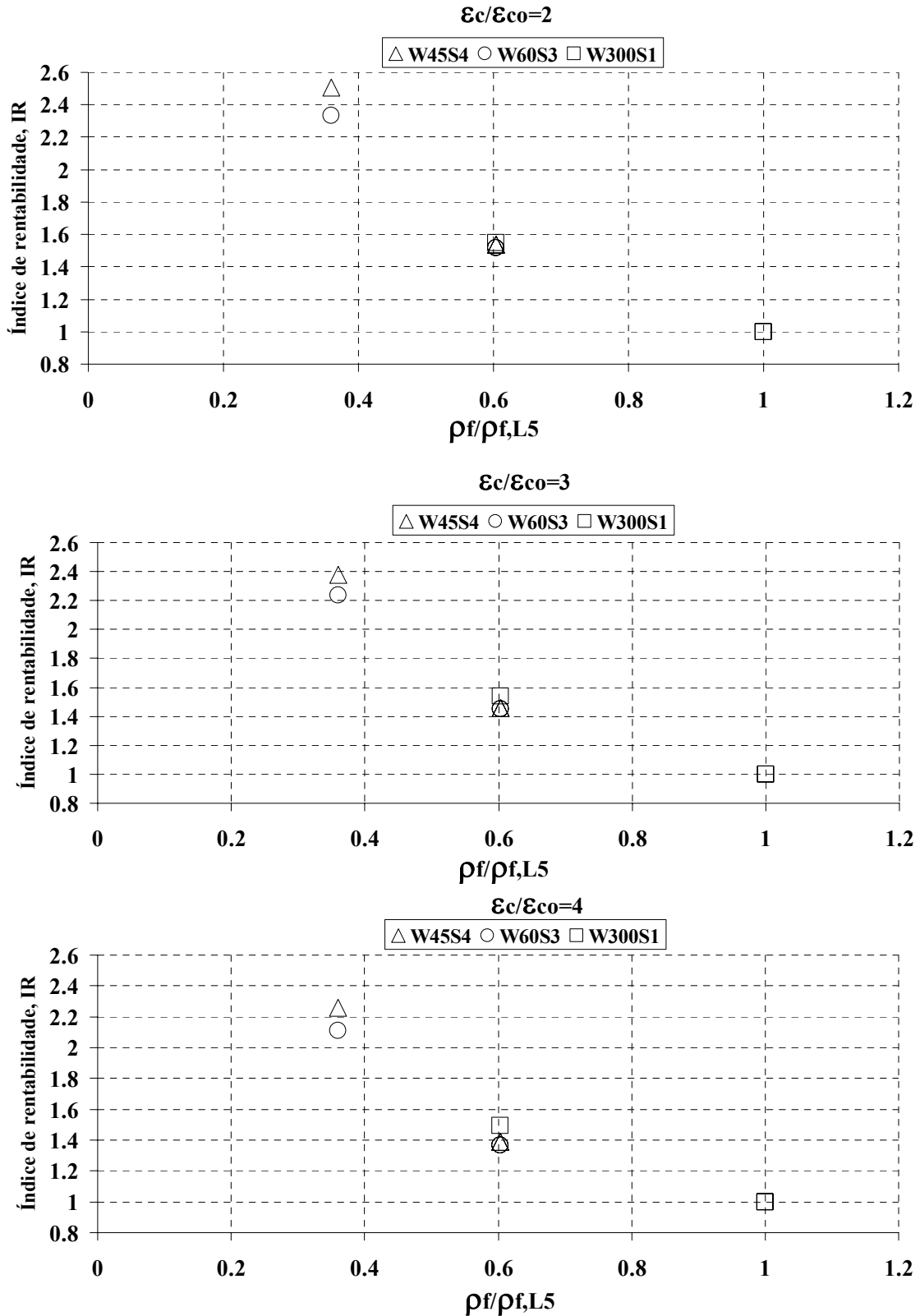


Figura 4.44 – Índice de rentabilidade (IR) versus  $\rho_f/\rho_{f,L5}$  nas séries de ensaios do grupo C16S300 (cont.).

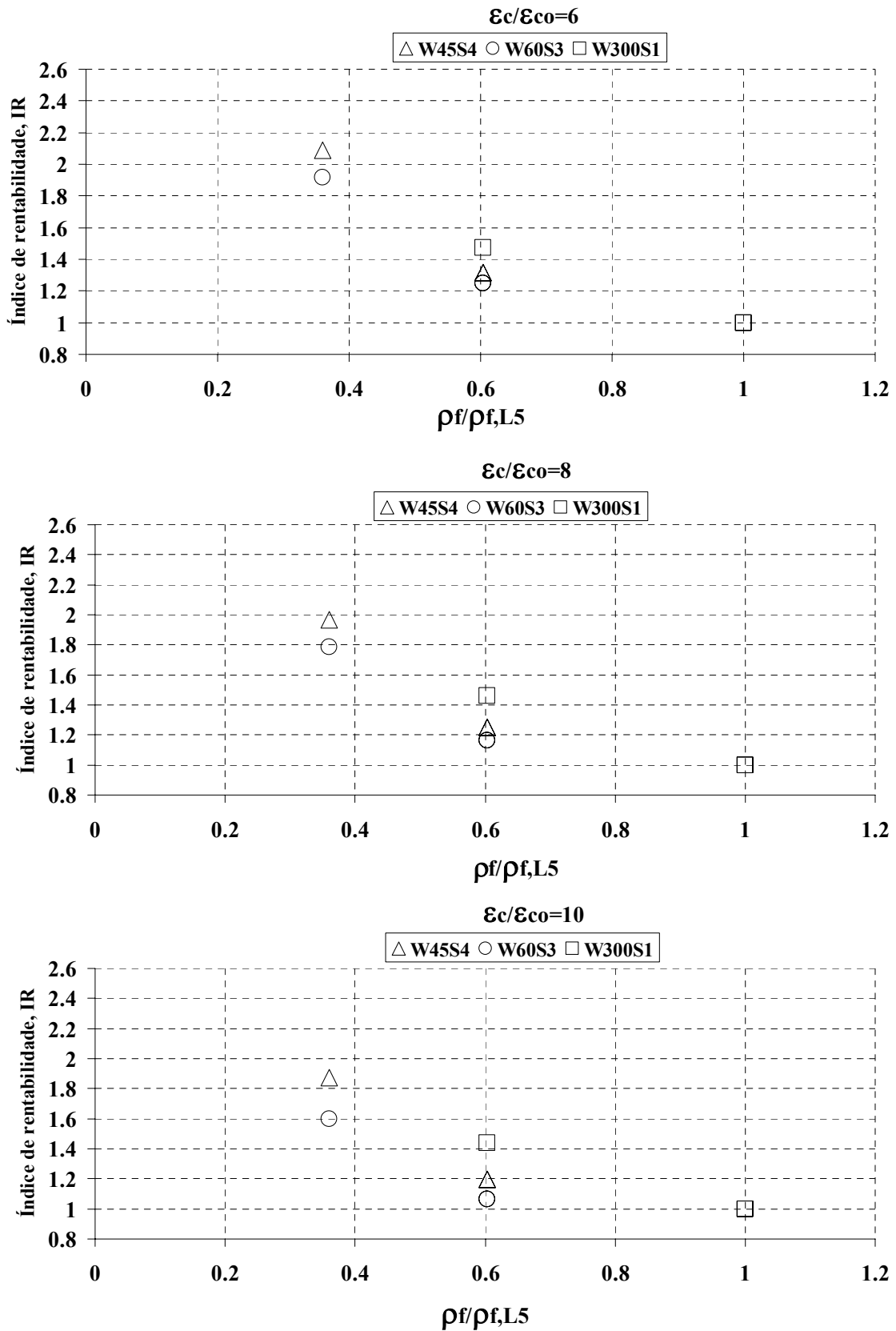


Figura 4.44 (cont.) – Índice de rentabilidade (IR) versus  $\rho_f/\rho_{f,L5}$  nas séries de ensaios do grupo C16S300

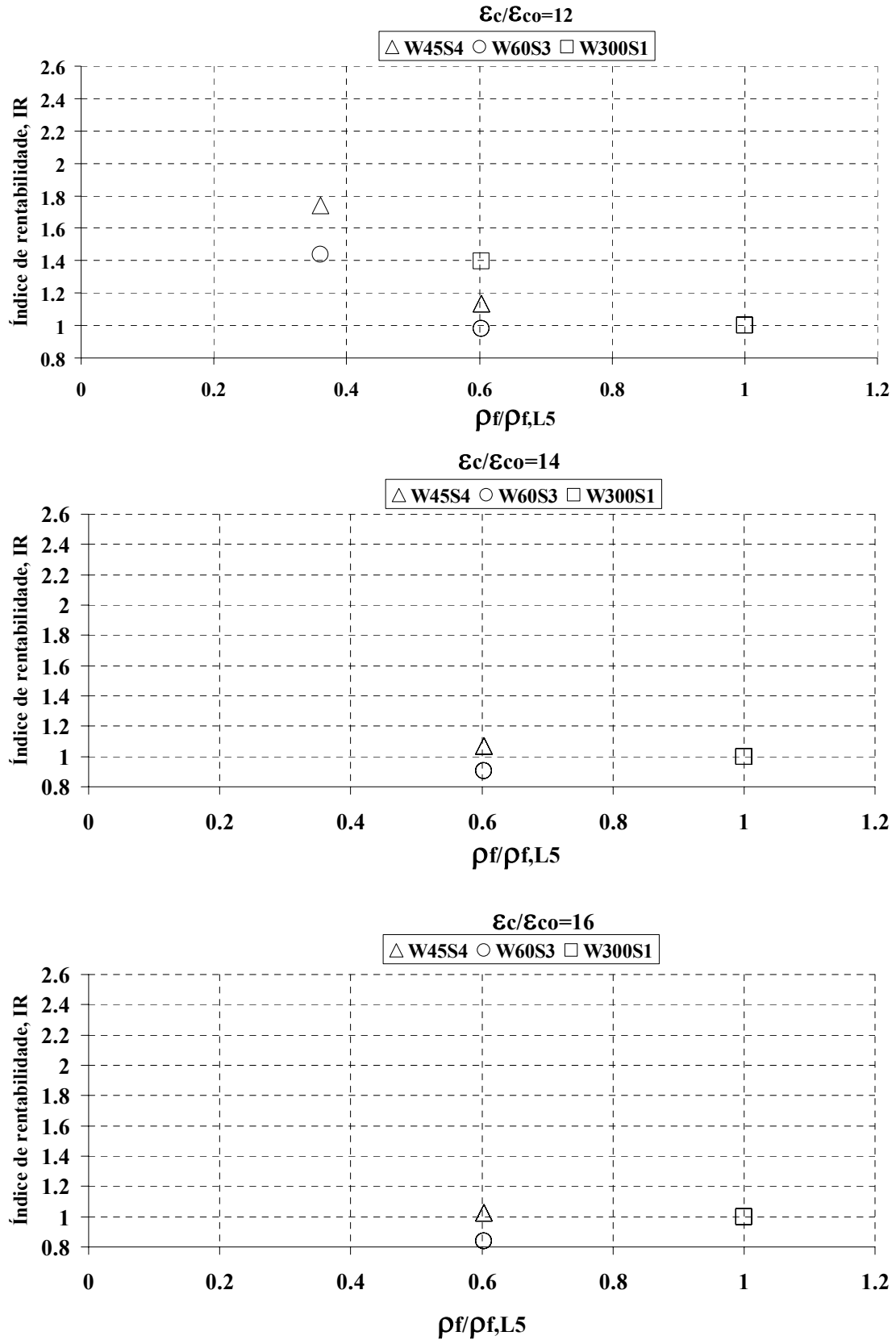


Figura 4.44 (cont.) – Índice de rentabilidade (IR) versus  $\rho_f/\rho_{f,L5}$  nas séries de ensaios do grupo C16S300

Da análise dos gráficos da Figura 4.44 observa-se que:

- Para os diferentes níveis de deformação a rentabilidade obtida na série W45S4 foi ligeiramente superior à obtida na série W60S3. Esta diferença acentuou-se à medida que o nível de deformação aumentou.
- O IR das séries confinadas parcialmente com 3 camadas, W45S4L3 e W60S3L3 foi aproximadamente 100% e 90%, respectivamente, do IR registado nas séries confinadas parcialmente com 5 camadas, W45S4L5 e W60S3L5. Esta diferença diminuiu com o aumento dos níveis de deformação.
- Para  $\epsilon_c/\epsilon_{co}=2$  os níveis de rentabilidade das séries W45S4L5, W60S3L5 e W300S1L3 foram iguais. Com o aumento da deformação, o IR da série W300S1L3 foi aumentando em relação ao das outras duas séries. O IR da série W45S4L5 foi superior ao da série W60S3L5. Essa superioridade acentua-se a partir de  $\epsilon_c/\epsilon_{co}=6$ . Para a máxima deformação alcançada ( $\epsilon_c/\epsilon_{co}=12$ ), o IR das séries W300S1L3, W45S4L5 e W60S3L5 foi de 1.4, 1.13 e 0.97, respectivamente.
- O índice de rentabilidade diminuiu com o aumento dos níveis de deformação.

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

No programa experimental do presente trabalho pretendeu-se avaliar a influência do tipo de betão no nível de confinamento alcançado. Foram consideradas duas classes de betão, 16 MPa e 28 MPa, de resistência à compressão aos 28 dias. Para avaliar-se a influência do tipo de betão na eficácia do confinamento, os resultados obtidos em séries com o mesmo tipo de manta mas com betão de distinta classe de resistência serão comparadas, ou seja, serão comparados os resultados das séries C23S300 e C16S300 e das séries C23S200 e C16S200.

##### **4.6.1 Séries confinadas com manta CF130 S&P 240 de 300 g/m<sup>2</sup>**

Na Figura 4.45 apresenta-se a relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e  $\rho_f$  para  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  de 2, 3, 4, 6 e 8 referentes aos grupos de ensaios C16S300 e C23S300, ou seja, comparam-se os resultados obtidos nas séries de provetes confinados com manta CF130 S&P 240 de 300 g/m<sup>2</sup>.

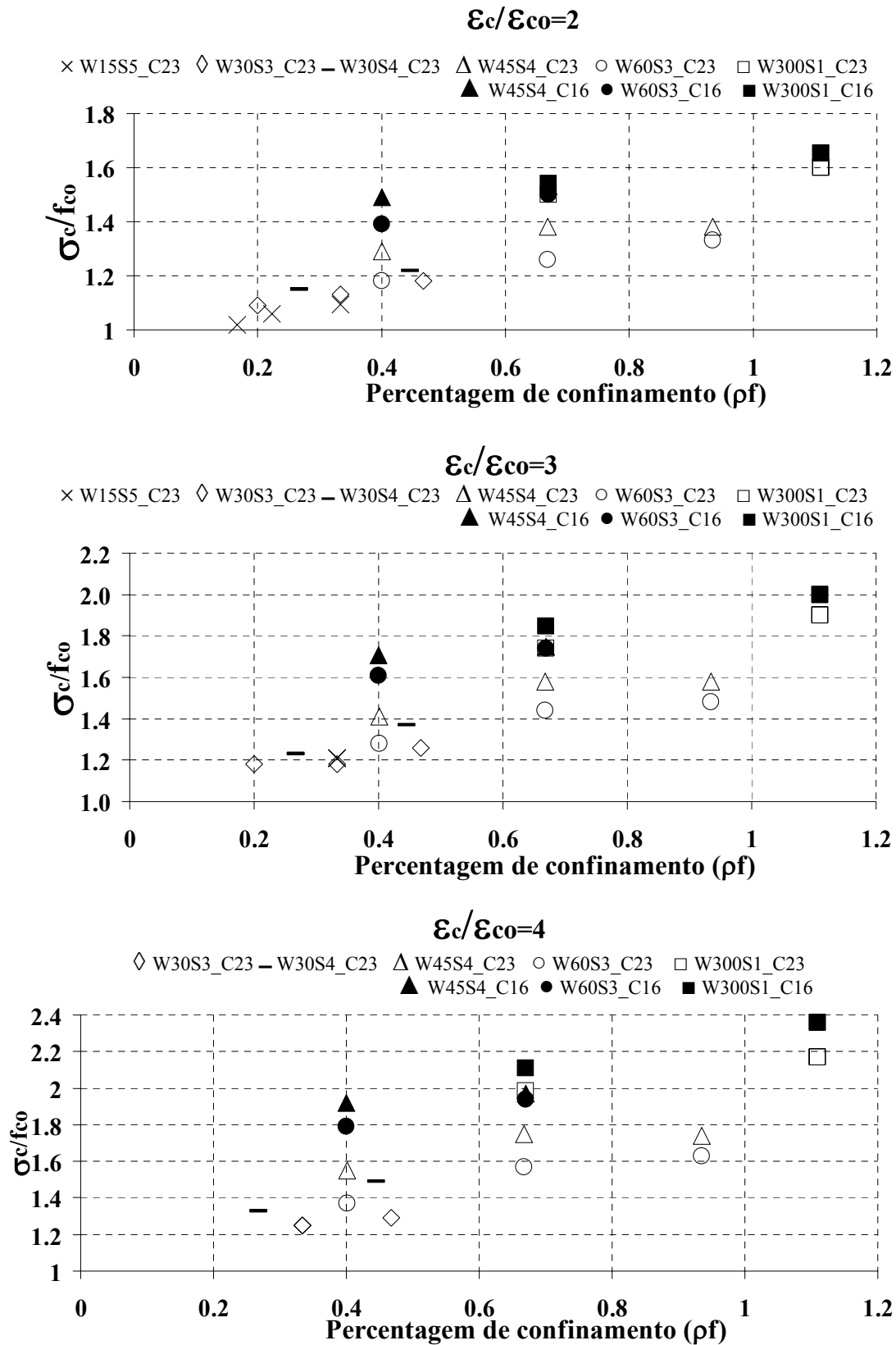


Figura 4.45 – Relação entre  $\sigma_c/f_c$  e  $\rho_f$  referente aos grupos de ensaios C23S300 e C16S300 (cont.).

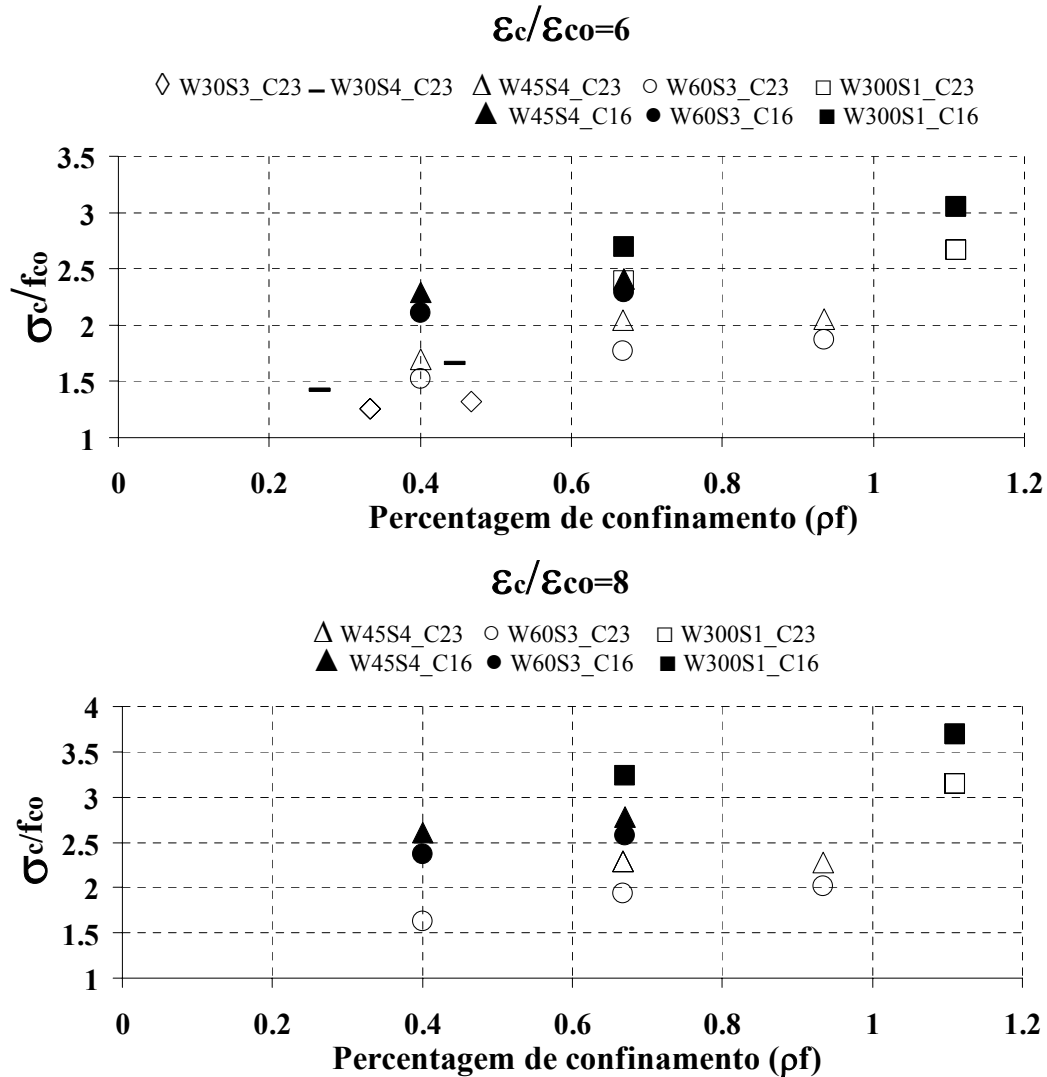


Figura 4.45 (cont.) – Relação entre  $\sigma_c/f_c$  e  $\rho_f$  referente aos grupos de ensaios C23S300 e C16S300.

Da análise da Figura 4.45 verifica-se que:

- Para  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  de 2, 3, 4, 6 e 8 os provetes de betão de menor resistência à compressão (16 MPa) alcançaram maiores valores de  $\sigma_c/f_{co}$ . Assim, o confinamento foi mais efectivo nos provetes de betão de menor resistência.
- 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. Esta diferença foi mais significativa nas séries de provetes de maior resistência. Quanto maior for a resistência do betão maior é a influência do espaço livre de betão entre faixas (volume do betão não confinado).
- Para os níveis de extensão axial analisados verifica-se que nos provetes parcialmente confinados com 5 camadas e constituídos pelo betão de resistência

à compressão de 16 MPa foram alcançados valores de capacidade de carga iguais aos registados nos provetes totalmente reforçados com 3 camadas e constituídos pelo betão de resistência à compressão de 23 MPa.

Na Figura 4.46 apresenta-se a relação entre  $\Delta U/U_c$  e  $\rho_f$  para  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  de 2, 3, 4, 6 e 8 referentes às séries de ensaios dos grupos C16S300 e C23S300, ou seja, comparam-se os resultados dos grupos de ensaios confinados com manta CF130 S&P 240 de 300 g/m<sup>2</sup>.

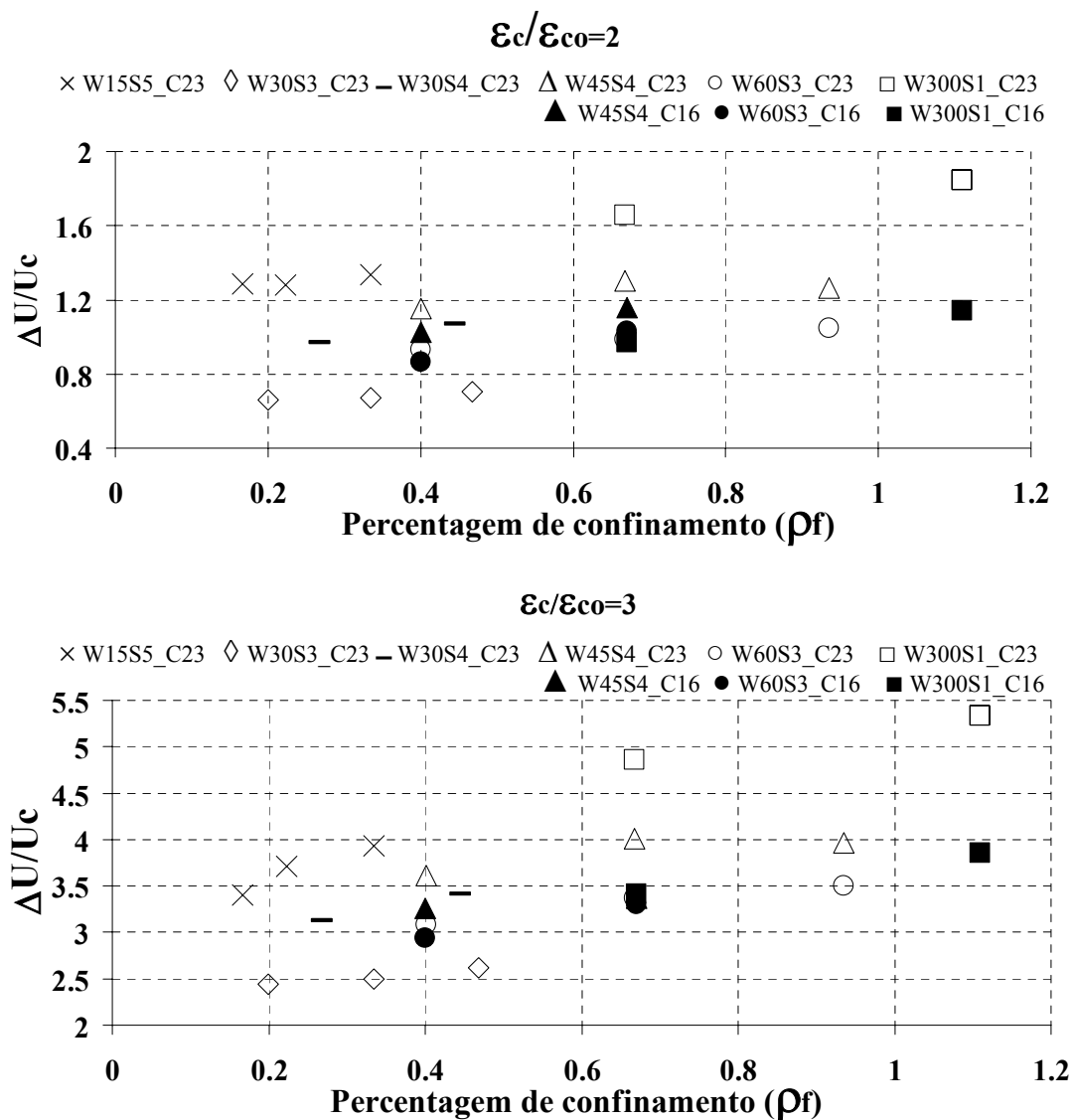


Figura 4.46 – Relação entre  $\Delta U/U_c$  e  $\rho_f$  referente aos grupos de ensaios C23S300 e C16S300 (cont.).

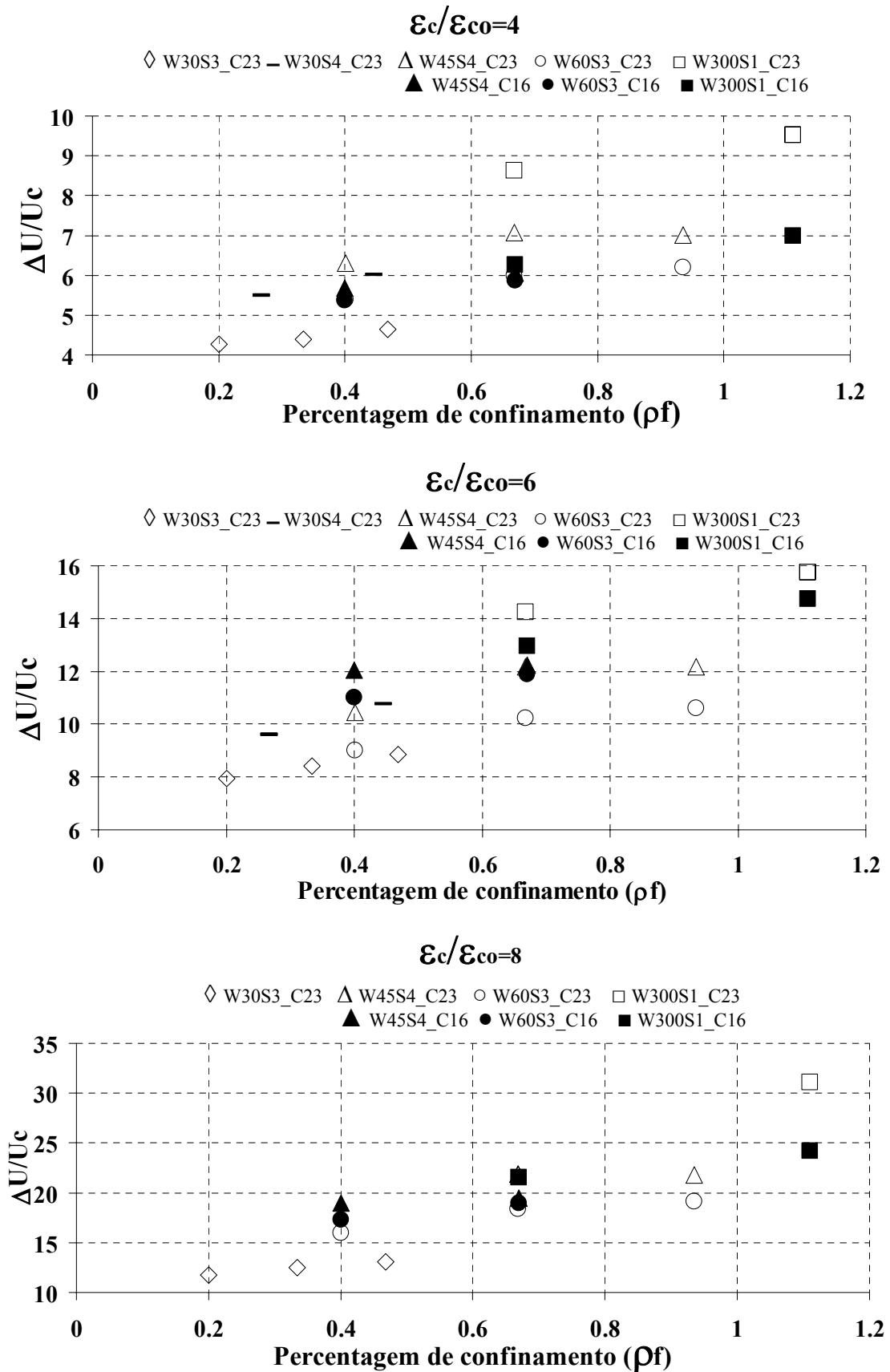


Figura 4.46 (cont.) – Relação entre  $\Delta U/U_c$  e  $\rho_f$  referentes aos grupos de ensaios C23S300 e C16S300.

Da análise da Figura 4.46 verifica-se que:

- Para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  de 2, 3, 4, 6 e 8 e para as séries de igual percentagem de confinamento as séries W45S4 tiveram maior capacidade de absorção de energia que as séries W60S3. Esta diferença foi mais pronunciada nos provetes de maior resistência (23 MPa).
- Para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  de 2, 3 e 4 e para as séries de igual percentagem de confinamento, como é o caso das séries W45S4 e W60S3, a capacidade de absorção de energia foi mais elevada nas séries formadas por provetes de betão de maior resistência (23 MPa).
- Para todos os níveis de extensão axial, com exceção de  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}=6$ , e para igual percentagem de confinamento, as séries W45S4L5, W60S3L5, W300S1L3 do grupo constituído por provetes de betão menos resistente têm uma capacidade de absorção de energia semelhante à série W60S3L5 dos provetes de maior resistência (23 MPa).

Na Figura 4.47 apresenta-se a relação entre a tensão máxima nos vários sistemas de confinamento e a tensão máxima nos provetes confinados (full wrapping) com 3 camadas  $\sigma_c/\sigma_{c,L3}$  para os distintos  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  e para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  de 2, 3, 4 e 6 referentes às séries de ensaio dos grupos C16S300 e C23S300, ou seja, comparam-se os resultados dos grupos de ensaios confinados com manta CF130 S&P 240 de 300 g/m<sup>2</sup>.

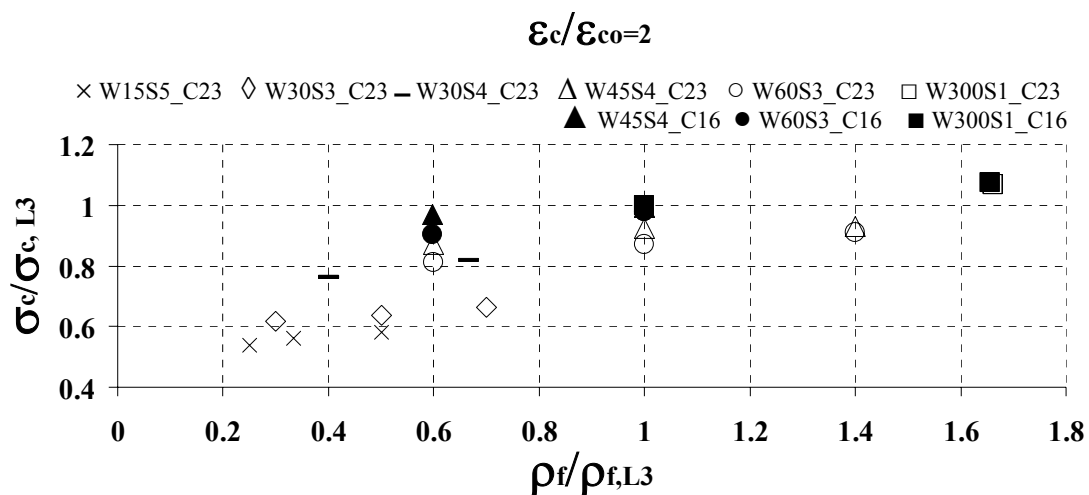


Figura 4.47 – Relação entre  $\sigma_c/\sigma_{c,L3}$  e  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  referente aos grupos de ensaios C23S300 e C16S300 (cont.).

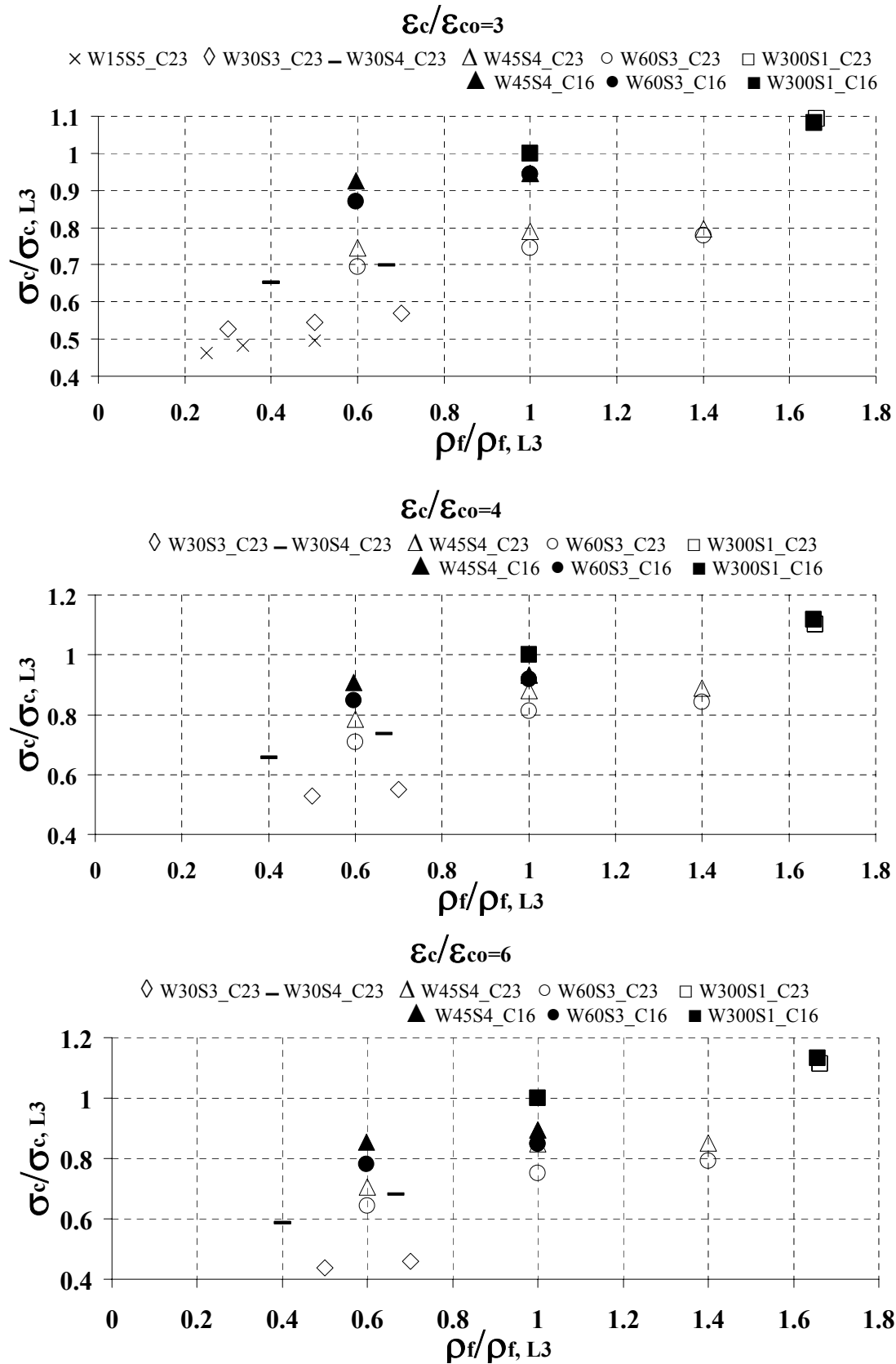


Figura 4.47 (cont.) – Relação entre  $\sigma_c/\sigma_{c,L3}$  e  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  referente aos grupos de ensaios C23S300 e C16S300.

Da análise da Figura 4.47 verifica-se que:

- Para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{c0}$  de 2, 3, 4 e 6 os provetes de betão de menor resistência à compressão (16 MPa) alcançaram maiores valores de  $\sigma_c/\sigma_{c0,L3}$ .

Na Figura 4.48 apresenta-se a relação entre a tensão máxima nos vários sistemas de confinamento e a tensão máxima nos provetes confinados (full wrapping) com 5 camadas  $\sigma_c/\sigma_{c,L5}$  para os distintos  $\rho_f/\rho_{f,L5}$  e para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{c0}$  de 2, 3, 4, 6 e 8 referentes às séries de ensaios dos grupo C16S300 e C23S300, ou seja, comparam-se os resultados dos grupos de ensaios de provetes confinados com manta CF130 S&P 240 de 300 g/m<sup>2</sup>.

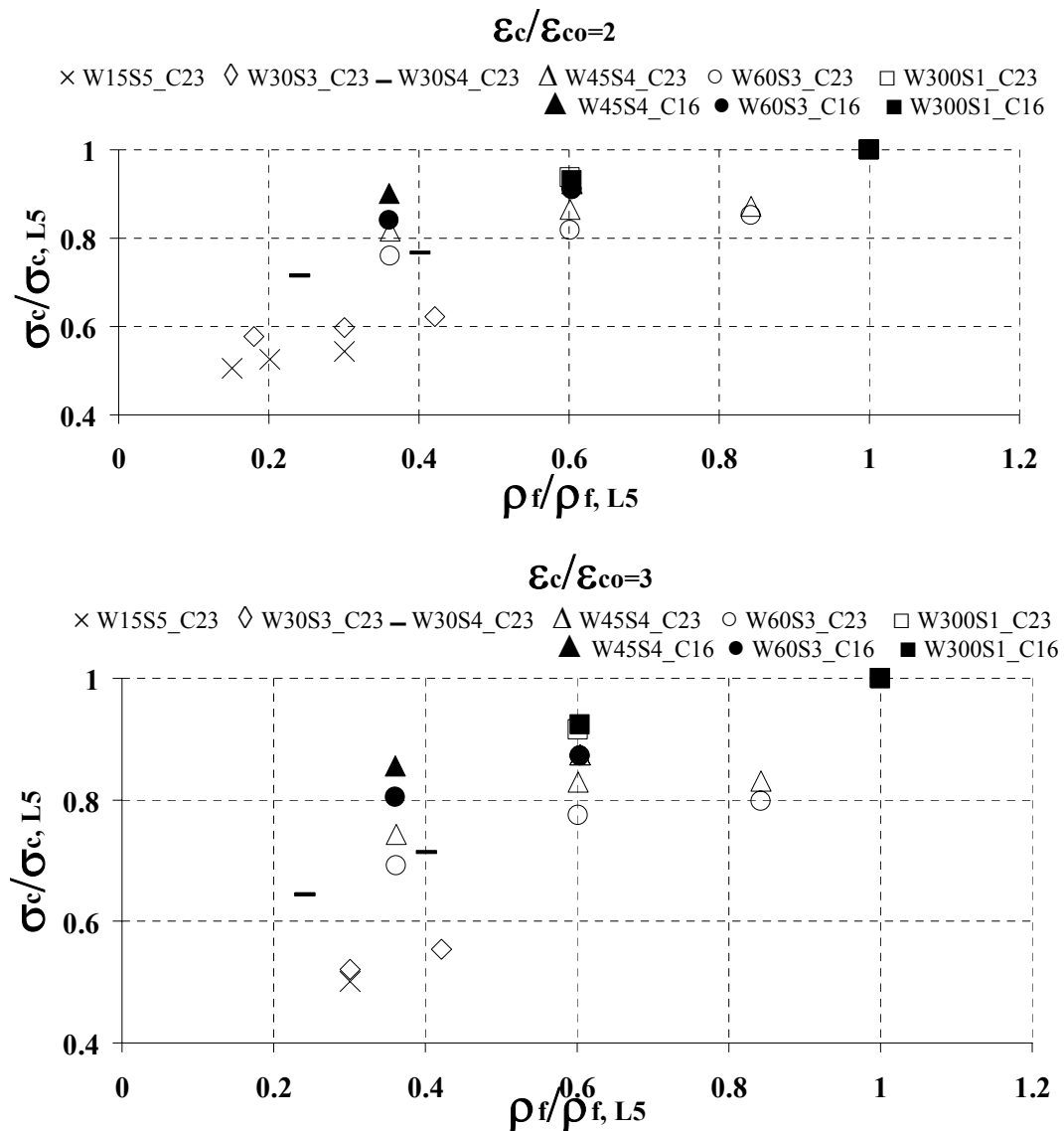


Figura 4.48 – Relação entre  $\sigma_c/\sigma_{c,L5}$  e  $\rho_f/\rho_{f,L5}$  referente aos grupos de ensaios C23S300 e C16S300 (cont.)

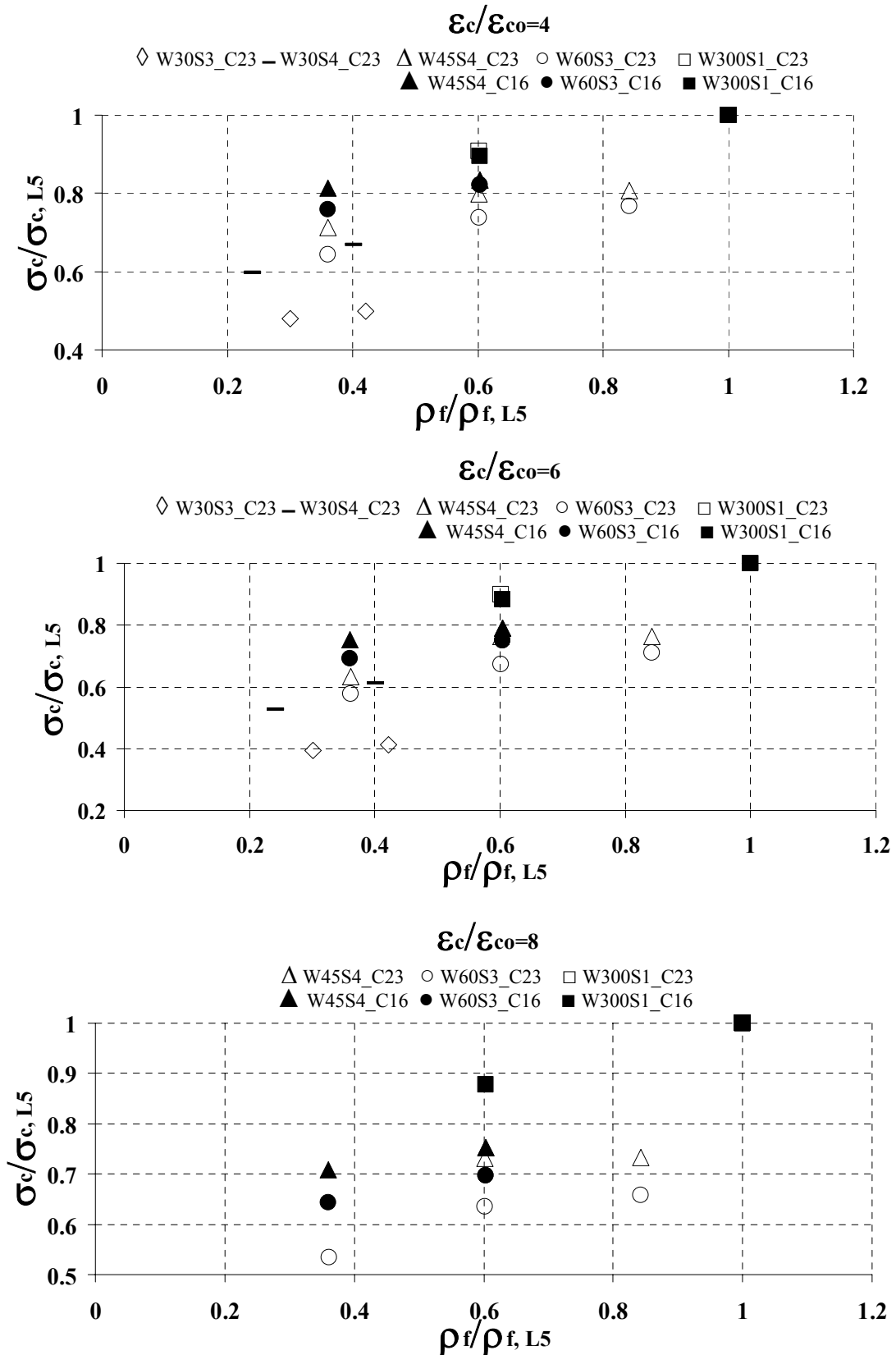


Figura 4.48 (cont.) – Relação entre  $\sigma_c/\sigma_{c,L5}$  e  $\rho_f/\rho_{f,L5}$  referente aos grupos de ensaios C23S300 e C16S300.

Da análise da Figura 4.48 verifica-se que:

- Para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  de 2, 3, 4, 6 e 8 os provetes de betão de menor resistência à compressão (16 MPa) alcançaram maiores valores para  $\sigma_c/\sigma_{co,L5}$ , embora esta diferença seja menos significativa que nos gráficos anteriores  $\sigma_c/\sigma_{co,L3}$  versus  $\rho_f/\rho_{f,L3}$

#### 4.6.2 Séries confinadas com manta CF120 S&P 240 de 200 g/m<sup>2</sup>

Na Figura 4.49 apresenta-se a relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e  $\rho_f$ , para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  de 2, 3 e 4 referentes aos grupos de ensaios C23S200 e C16S200, ou seja, comparam-se os resultados dos grupos de ensaios confinados com manta CF120 S&P 240 de 200 g/m<sup>2</sup>.

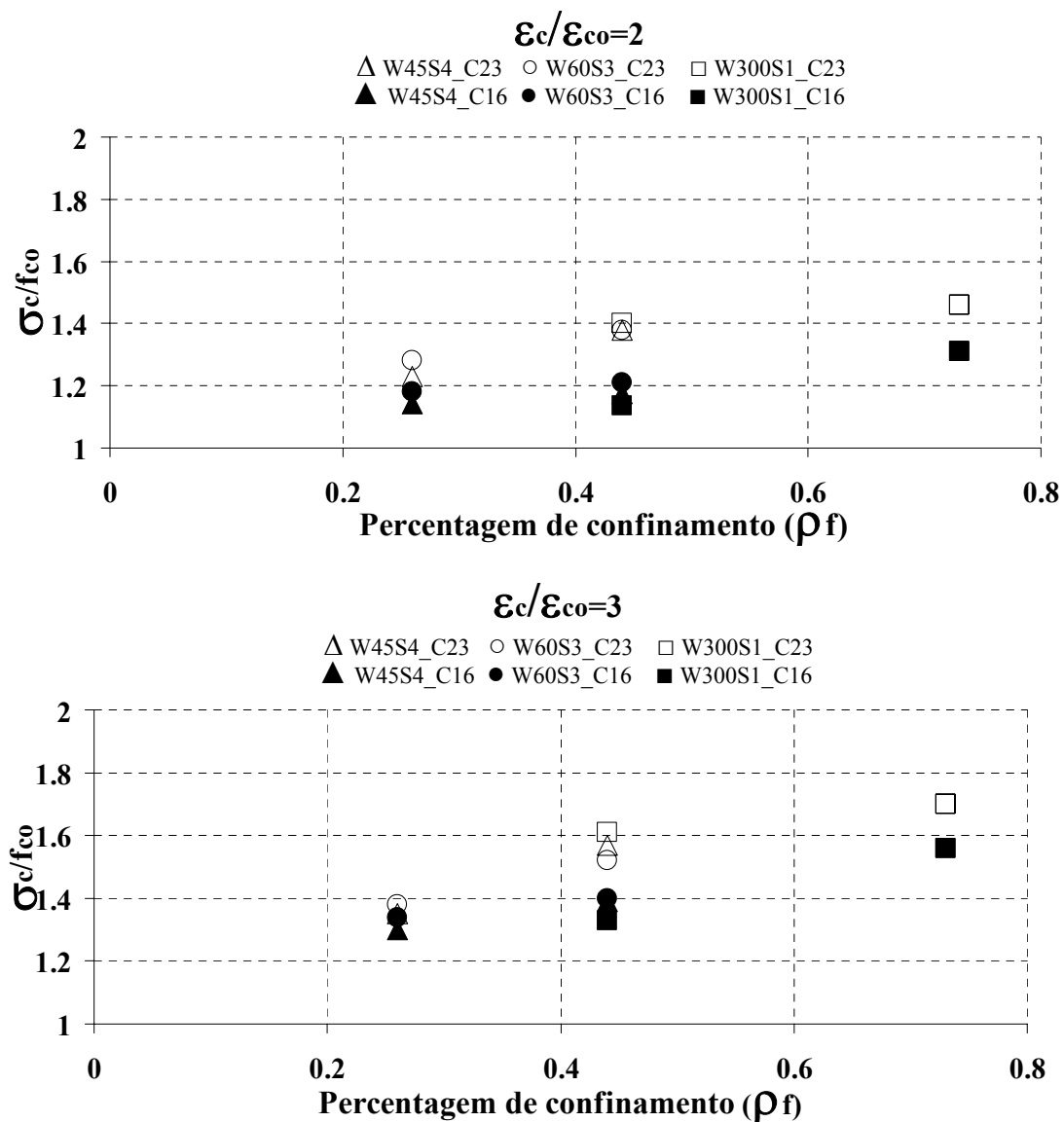


Figura 4.49 – Relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e  $\rho_f$  referente aos grupos de ensaios C23S200 e C16S200 (cont.)

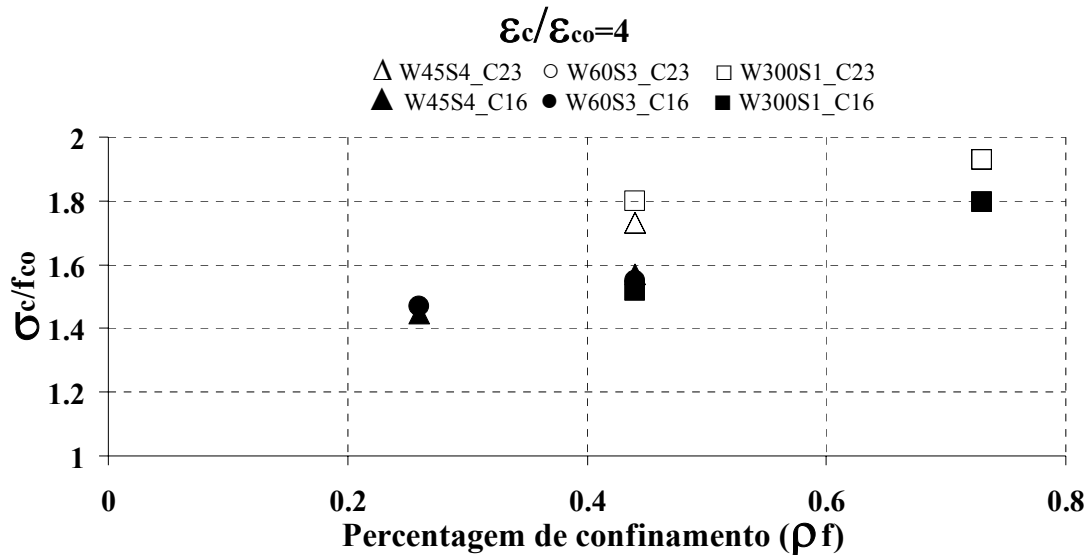


Figura 4.49 (cont.) – Relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e  $\rho_f$  referente aos grupos de ensaios C23S200 e C16S200

Da análise da Figura 4.49 verifica-se que:

- Para  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  igual a 2, 3 e 4 os provetes de betão de maior resistência à compressão (23 MPa) alcançaram maiores valores para  $\sigma_c/f_{co}$ . Assim, o confinamento foi mais efectivo nos provetes de betão de maior resistência (23 MPa). Em alguns dos sistemas de confinamento a influência da resistência do betão nos valores do parâmetro  $\sigma_c/f_{co}$  foi cerca de 30%.

Na Figura 4.50 apresenta-se a relação entre  $\Delta U/U_c$  e  $\rho_f$  para  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  de 2, 3, e 4 referentes às séries de ensaios dos grupos C23S200 e C16S200, ou seja, comparam-se os resultados dos grupos de ensaios confinados com manta CF120 S&P 240 de 200 g/m<sup>2</sup>.

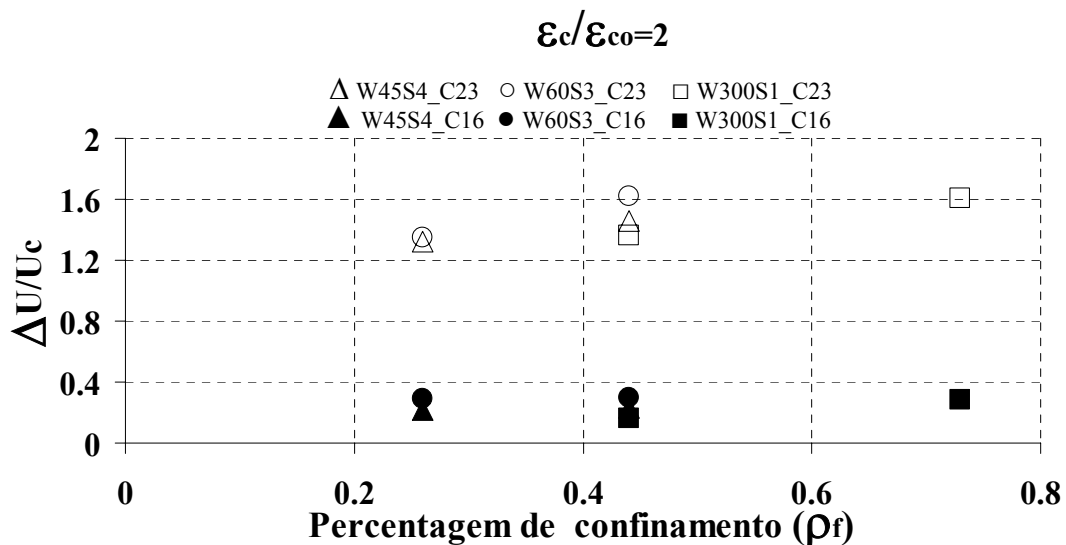


Figura 4.50 – Relação entre  $\Delta U/U_c$  e  $\rho_f$  referente aos grupos de ensaios C23S200 e C16S200 (cont.).

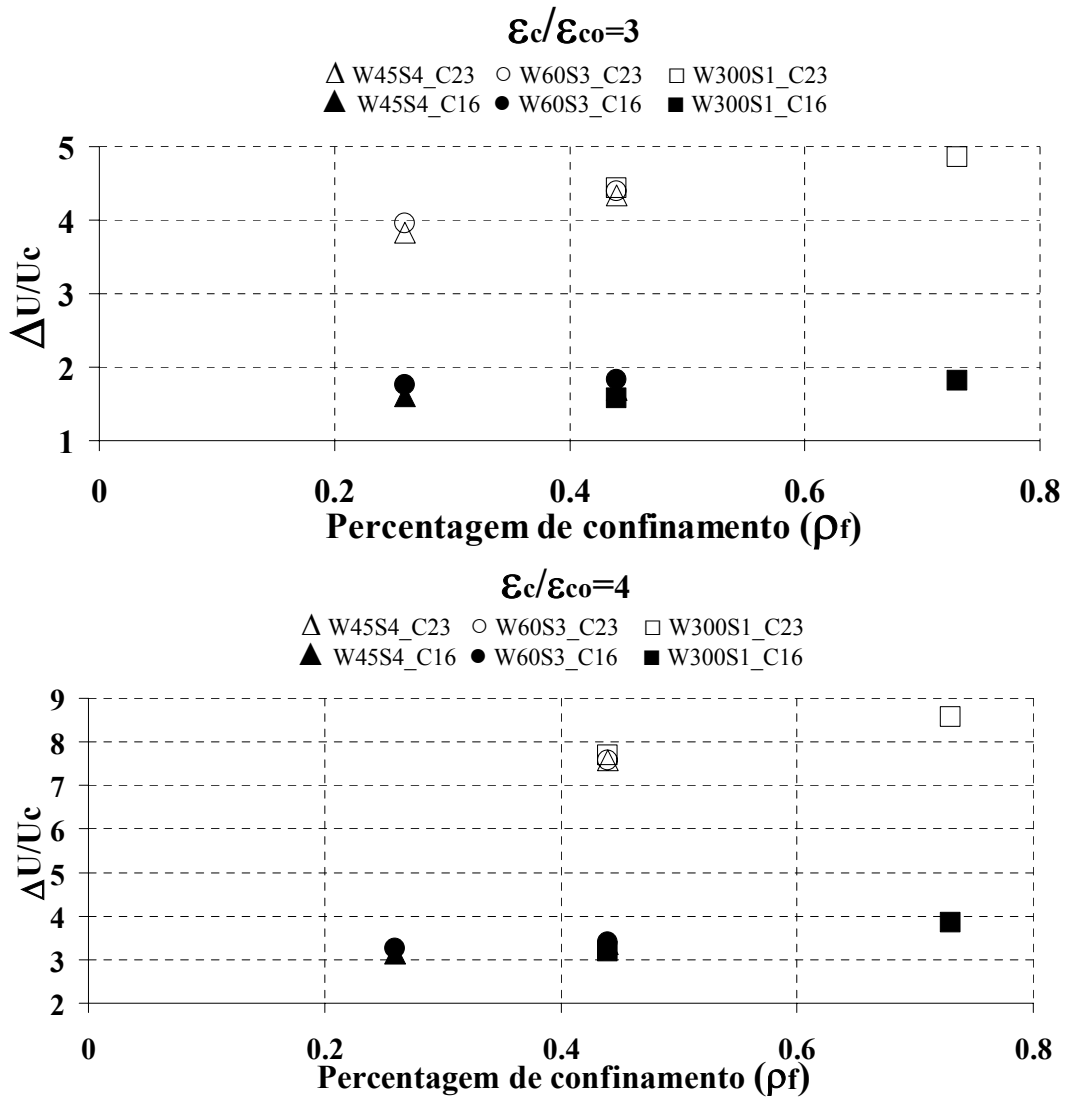


Figura 4.50 (cont.) – Relação entre  $\Delta U/U_c$  e  $\rho_f$  referente aos grupos de ensaios C23S200 e C16S200

Da análise da Figura 4.50 verifica-se que:

- Para  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  de 2, 3, e 4 e para as séries de igual percentagem de confinamento as séries W60S3 têm maior capacidade de absorção de energia que as séries W45S4.
- A capacidade de absorção de energia foi mais elevada nas séries de provetes de maior resistência (23 MPa).

Na Figura 4.51 apresenta-se a relação entre a tensão máxima nos vários sistemas de confinamento e a tensão máxima nos provetes confinados (full wrapping) com 3 camadas  $\sigma_c/\sigma_{c,L3}$  para os distintos  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  e  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  de 2, 3, e 4 referentes às séries de ensaio dos grupos C16S200 e C23S200, ou seja, comparam-se os resultados dos grupos de ensaios confinados com manta CF120 S&P 240 de  $200 \text{ g/m}^2$ .

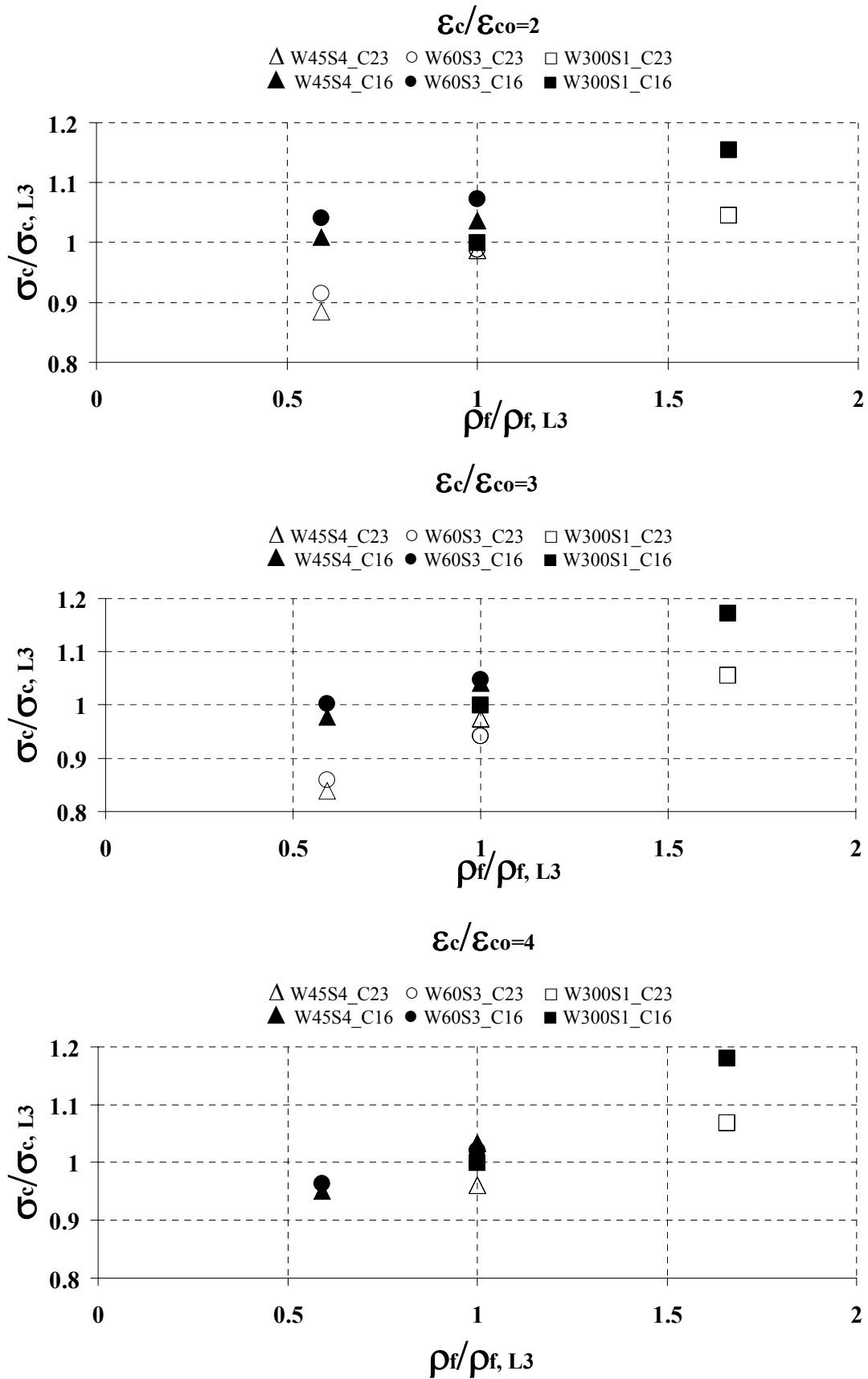


Figura 4.51 – Relação entre  $\sigma_c/\sigma_{c,L3}$  e  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  referente aos grupos de ensaios C16S200 e C23S200

Da análise da Figura 4.51 verifica-se que:

- Para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{c0}$  de 2, 3 e 4 e nos provetes de betão de menor resistência à compressão (16 MPa) foram alcançados maiores valores de  $\sigma_c/\sigma_{c0,L3}$ . As maiores diferenças registaram-se nos sistemas de confinamento parciais com 3 camadas, aproximadamente 15% e nos sistemas totalmente confinados com 5 camadas, aproximadamente 13%.

Na Figura 4.52 apresenta-se a relação entre a tensão máxima nos vários sistemas de confinamento e a tensão máxima nos provetes confinados (full wrapping) com 5 camadas  $\sigma_c/\sigma_{c,L5}$  para os distintos  $\rho_f/\rho_{f,L5}$  e para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{c0}$  de 2, 3, 4 e 6 referentes às séries de ensaios dos grupos C16S200 e C23S200, ou seja, comparam-se os resultados dos grupos de ensaios confinados com manta CF120 S&P 240 com 200 g/m<sup>2</sup>.

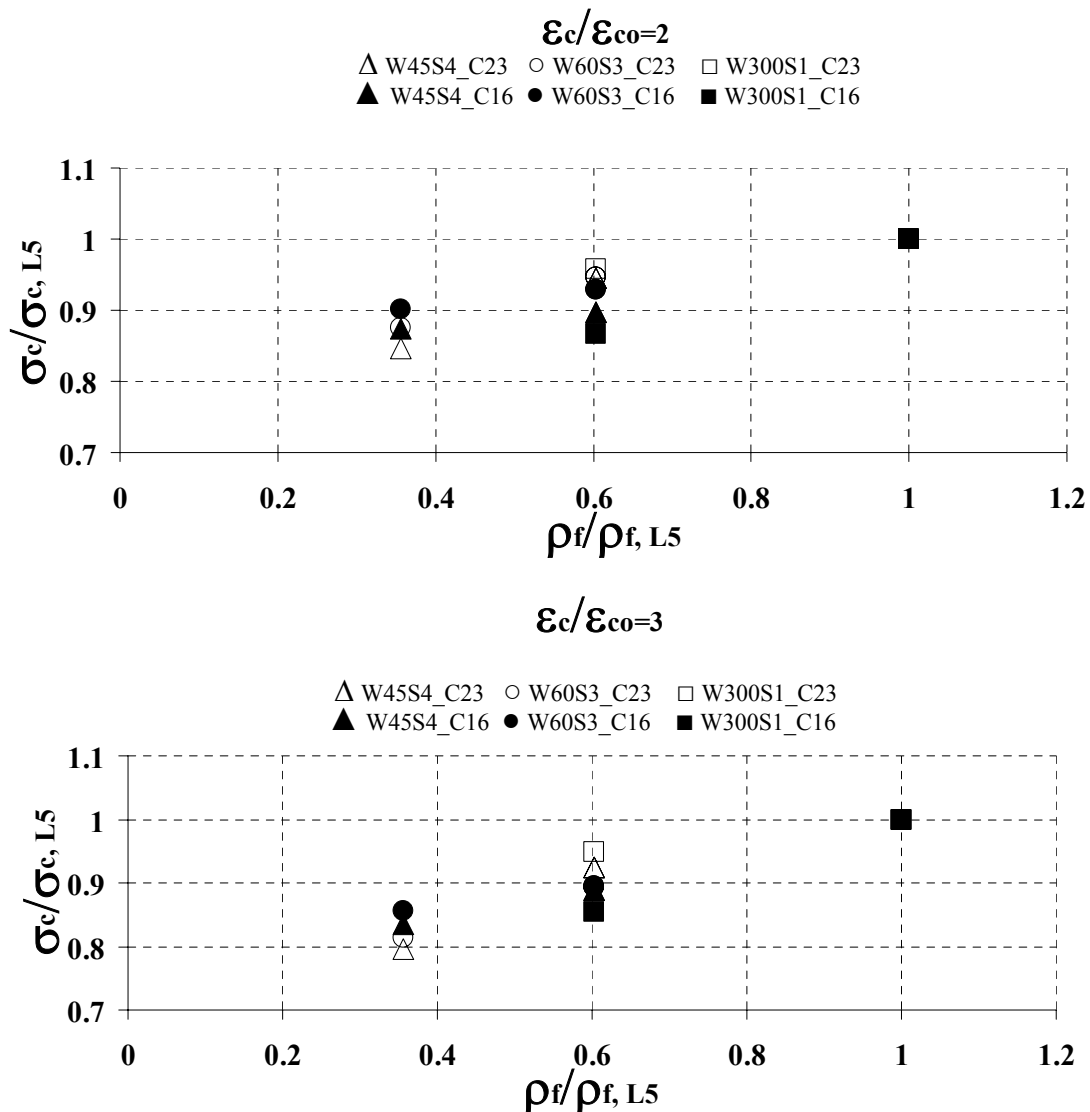


Figura 4.52 – Relação entre  $\sigma_c/\sigma_{c,L5}$  e  $\rho_f/\rho_{f,L5}$  referente aos grupos de ensaios C16S200 e C23S200 (cont.)

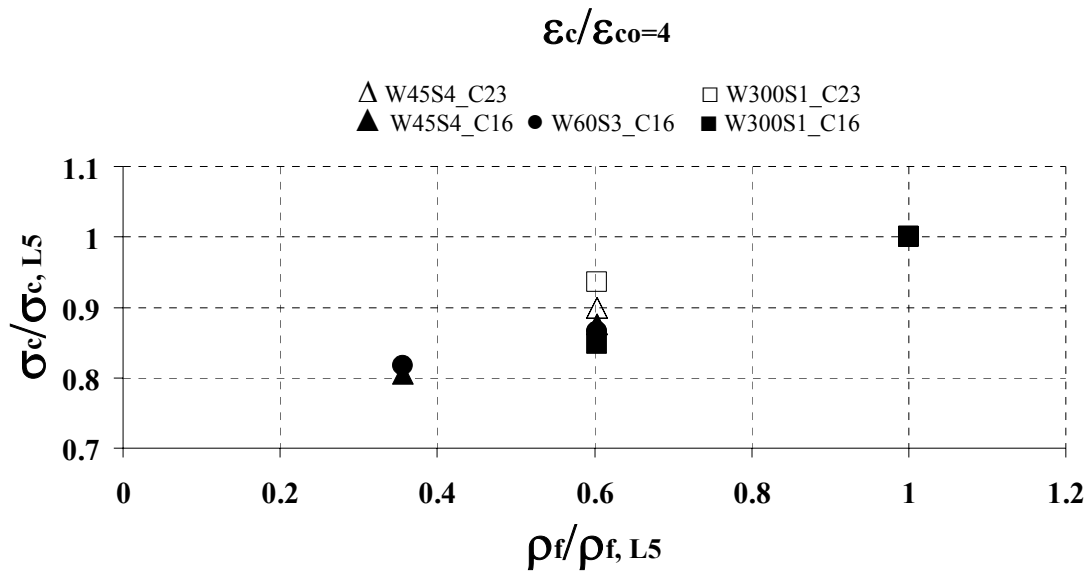


Figura 4.52 (cont.) – Relação entre  $\sigma_c/\sigma_{c,L5}$  e  $\rho_f/\rho_{f,L5}$  referente aos grupos de ensaios C16S200 e C23S200.

Da análise da Figura 4.52 verifica-se que:

- Neste caso não há uma tendência para uma das classes de betão obter valores de  $\sigma_c/\sigma_{c,L5}$  sempre superiores ou inferiores. Para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{c0}$  de 2, 3 e 4 nos provetes confinados com 3 camadas de manta de CFRP e constituídos pelo betão de menor resistência à compressão (16 MPa) alcançaram-se valores mais elevados de  $\sigma_c/\sigma_{c0,L5}$ . No caso dos provetes confinados com 5 camadas sucede o contrário, ou seja, as séries que atingiram valores mais elevados de  $\sigma_c/\sigma_{c0,L5}$  foram as de betão de maior resistência à compressão (23 MPa).

#### 4.7 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/m<sup>2</sup> e outra designada por CF120 S&P 240 de 200 g/m<sup>2</sup>. Para avaliar-se a influência do tipo de manta na eficácia do confinamento, os resultados obtidos em séries com o mesmo tipo de betão mas com distinto tipo de manta serão comparadas. Assim, os resultados dos grupos C23S300 e C23S200 serão comparados bem como os obtidos nos grupos C16S300 e C16S200.

#### 4.7.1 Séries com betão de 23 MPa

Na Figura 4.53 apresenta-se a relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e  $\rho_f$  para  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  de 2, 3, e 4 referentes aos grupos de ensaios C23S200 e C23S300, ou seja, comparam-se os resultados obtidos nos ensaios de provetes de betão de 23 MPa de resistência à compressão.

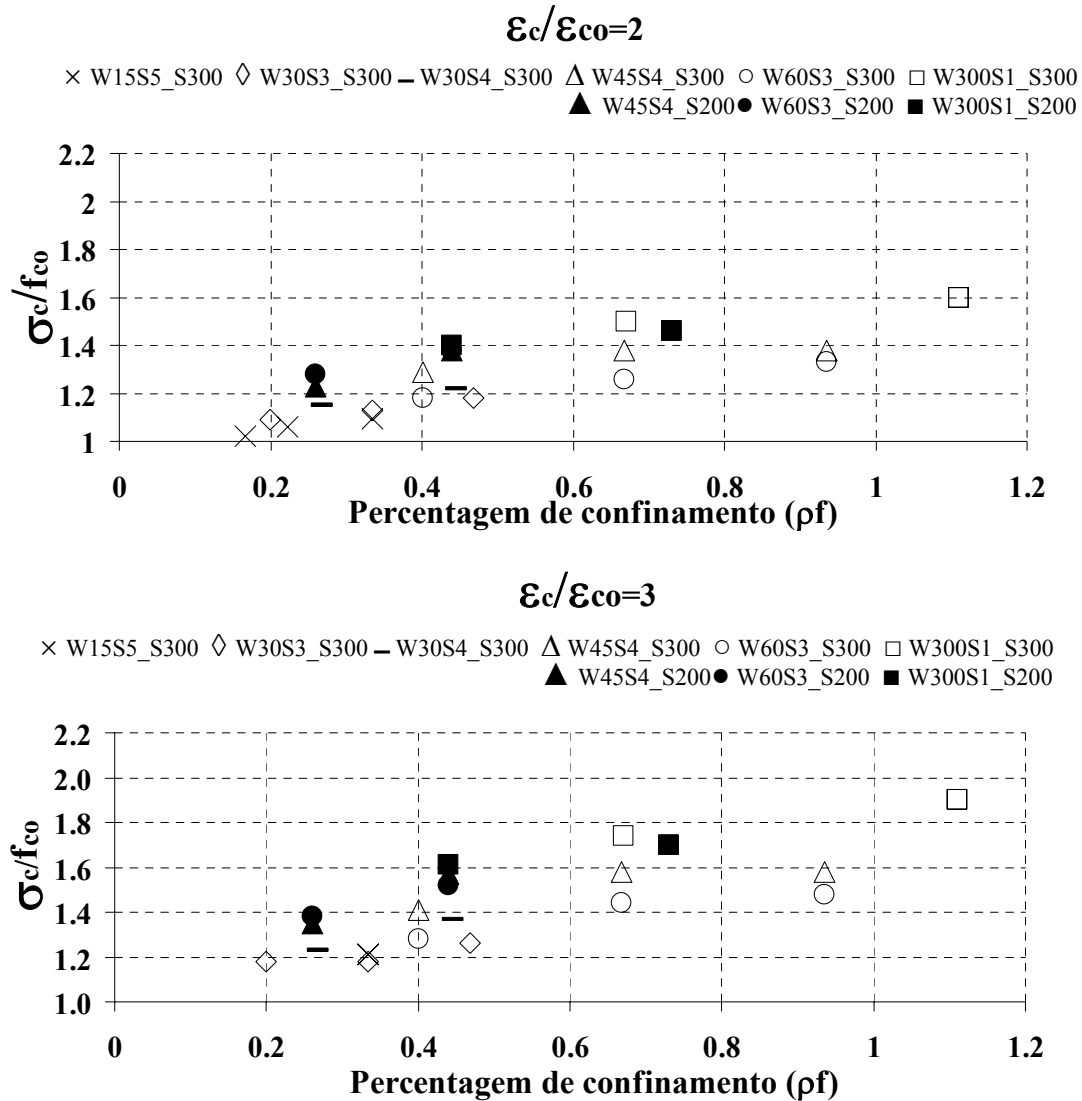


Figura 4.53 – Relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e  $\rho_f$  referente aos grupos de ensaios C23S200 e C23S300 (cont.).

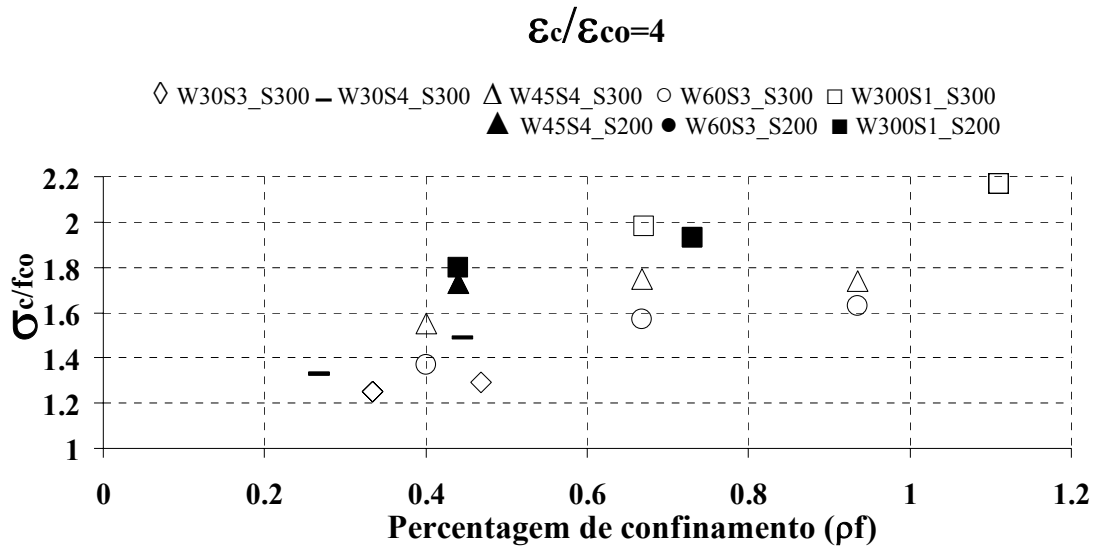


Figura 4.53 (cont.) – Relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e  $\rho_f$  referente aos grupos de ensaios C23S200 e C23S300.

Da análise da Figura 4.53 verifica-se que:

- Para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  de 2, 3 e 4, não são registadas diferenças significativas nos valores de  $\sigma_c/f_{co}$  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>. No entanto, houve uma tendência de uma maior eficácia dos sistemas confinados com a manta menos rígida de 200 g/m<sup>2</sup>.
- Para todos os níveis de extensão axial considerados, os valores de  $\sigma_c/f_{co}$  registados na série W300S1L3 reforçada com a manta de 300 g/m<sup>2</sup> ( $\rho_f = 0.67$ ) foram ligeiramente superiores aos valores obtidos na série W300S1L5 reforçada com a manta de 200 g/m<sup>2</sup> ( $\rho_f = 0.73$ ). No caso das séries confinadas parcialmente com faixas de 45mm e 60mm os valores de  $\sigma_c/f_{co}$  das séries confinadas com 3 camadas de manta de 300 g/m<sup>2</sup> foram ligeiramente inferiores, de 15% a 20%, das séries confinadas com 5 camadas de manta de 200 g/m<sup>2</sup>.

Na Figura 4.54 apresenta-se a relação entre  $\Delta U/U_c$  e  $\rho_f$  para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  de 2, 3, e 4 referentes às séries de ensaios dos grupos C23S200 e C23S300, ou seja, comparam-se os resultados dos grupos de ensaios de provetes de betão de 23 MPa de resistência à compressão.

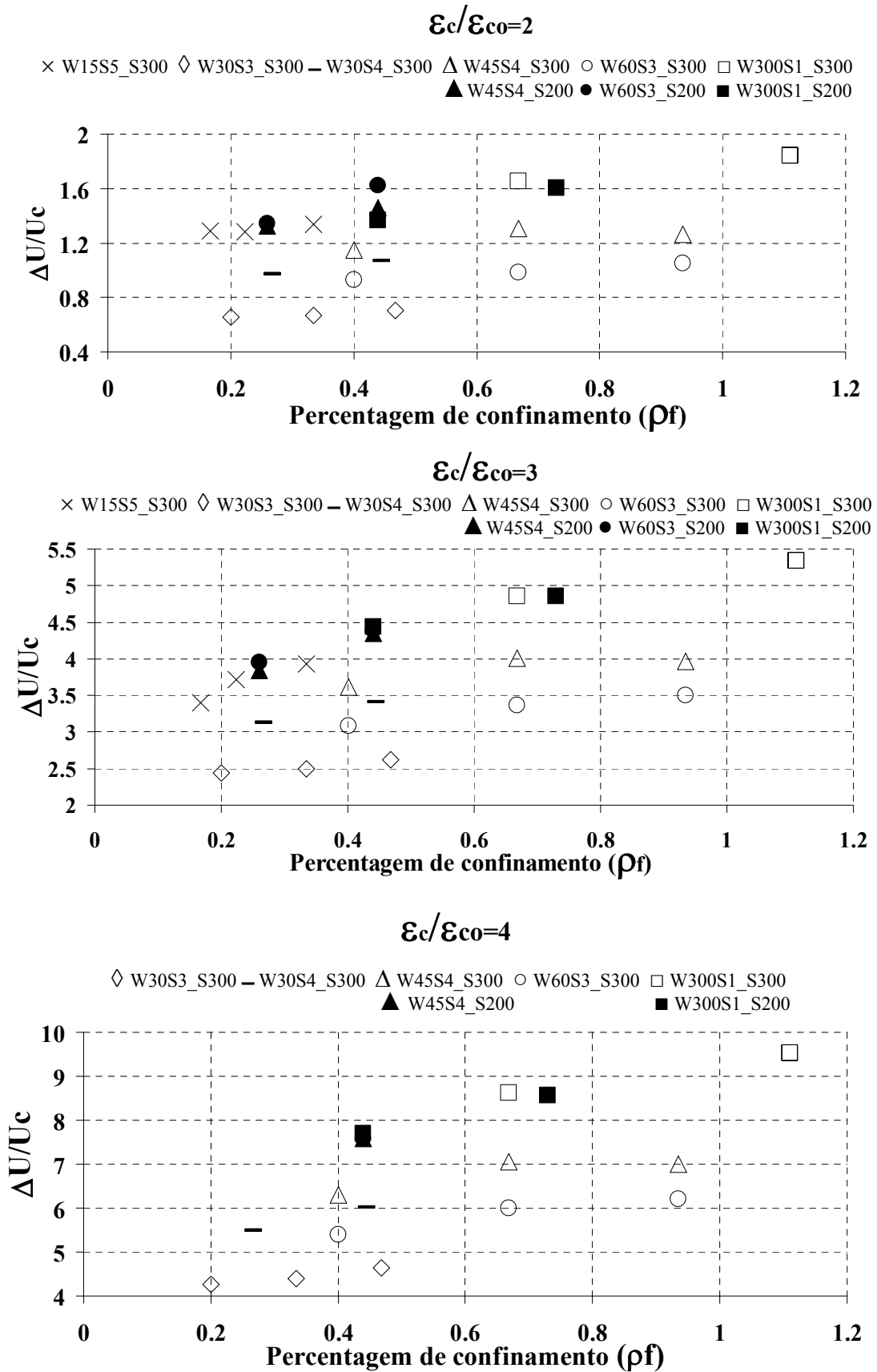


Figura 4.54 – Relação entre  $\Delta U/U_c$  e  $\rho_f$  referente aos grupos de ensaios C23S200 e C23S300.

Da análise da Figura 4.54 verifica-se que:

- Para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  de 2, 3 e 4 constata-se haver diferenças significativas nos valores de  $\Delta U/U_c$  entre as séries de provetes reforçados com distinto tipo de manta. Por exemplo, para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}=3$ , a série W45S4L5 reforçada com a manta de 200 g/m<sup>2</sup> ( $\rho_f=0.44$ ) apresentou valores de  $\Delta U/U_c$  40% superiores aos valores registados na série W45S4L5 reforçada com a manta de 300 g/m<sup>2</sup> ( $\rho_f=0.67$ ) mesmo apesar desta última ter maior  $\rho_f$ .
- Se compararmos séries com semelhantes  $\rho_f$ , por exemplo para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}=3$ , a série W45S4L5 reforçada com a manta de 200 g/m<sup>2</sup> ( $\rho_f=0.44$ ) apresentou valores de  $\Delta U/U_c$  70% superiores aos valores registados na série W45S4L3 reforçada com a manta de 300 g/m<sup>2</sup> ( $\rho_f=0.40$ ). Assim, para  $\rho_f$  semelhantes  $\Delta U/U_c$  é mais elevado nos provetes confinados com manta menos rígida de 200 g/m<sup>2</sup>.
- Para todos os níveis de  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  considerados o valor de  $\Delta U/U_c$  na série W300S1L3 reforçada com 3 camadas de manta de 300 g/m<sup>2</sup> ( $\rho_f=0.67$ ) foi similar ao valor registado na série W300S1L5 reforçada com 5 camadas de manta de 200 g/m<sup>2</sup> ( $\rho_f=0.73$ ).

Na Figura 4.55 apresenta-se a relação entre a tensão máxima nos vários sistemas de confinamento e a tensão máxima nos provetes confinados (full wrapping) com 3 camadas  $\sigma_c/\sigma_{c,L3}$  para os diferentes  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  (manta de 300 g/m<sup>2</sup> com  $\rho_{f,L3}=0.67$  e para a manta de 200 g/m<sup>2</sup> com  $\rho_{f,L3}=0.44$ ) e para  $\varepsilon/\varepsilon_{co}$  de 2, 3, 4 e 6 referentes às séries de ensaio dos grupos C23S200 e C23S300, ou seja, comparam-se os resultados dos grupos de ensaios de provetes de betão de 23 MPa de resistência à compressão.

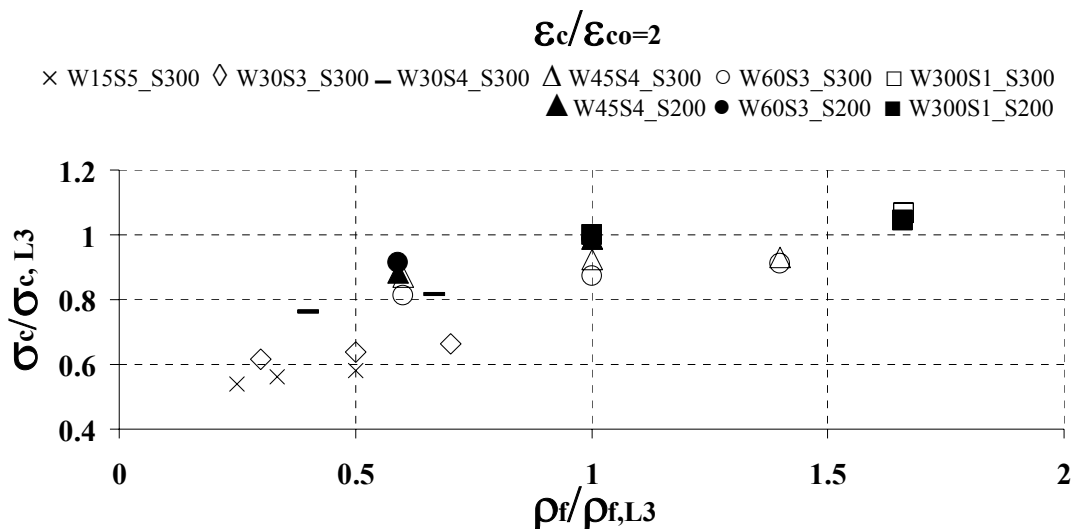


Figura 4.55 – Relação entre  $\sigma_c/\sigma_{c,L3}$  e  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  referente aos grupos de ensaios C23S200 e C23S300 (cont.)

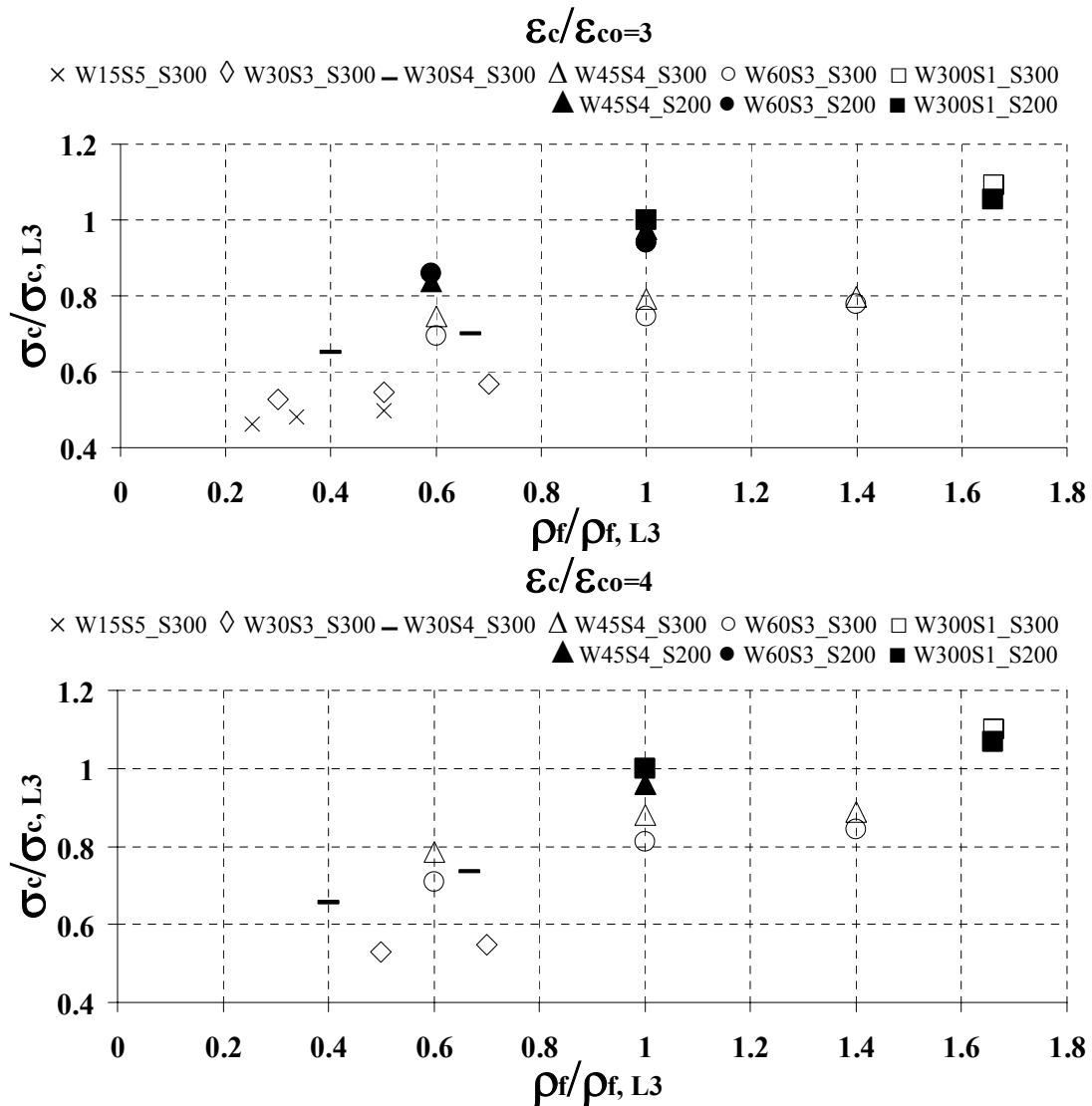


Figura 4.55 (cont.) – Relação entre  $\sigma_c/\sigma_{c,L3}$  e  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  referente aos grupos de ensaios C23S200 e C23S300

Da análise da Figura 4.55 verifica-se que:

- Para  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  de 2, 3, 4, 6 e 8, os provetes das séries confinadas com manta CF130 S&P 240 de 300 g/m<sup>2</sup>, em geral, tiveram valores de  $\sigma_c/\sigma_{c,L3}$  inferiores aos das séries confinadas com manta CF130 S&P 240 de 200 g/m<sup>2</sup>. Essa diferença foi mais significativa nas séries de  $\rho_f/\rho_{f,L3} = 1.0$ .

Na Figura 4.56 apresenta-se a relação entre a tensão máxima nos vários sistemas de confinamento e a tensão máxima nos provetes confinados (full wrapping) com 5 camadas  $\sigma_c/\sigma_{c,L5}$  para os diferentes  $\rho_f/\rho_{f,L5}$  (manta de 300 g/m<sup>2</sup> com  $\rho_f=1.11$  e para a manta de 200 g/m<sup>2</sup> com  $\rho_f=0.73$ ) e para  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  de 2, 3, 4, 6 e 8 referentes às séries de ensaio dos grupos C23S200 e C23S300, ou seja, comparam-se os resultados dos grupos de provetes de betão de 23 MPa de resistência à compressão.

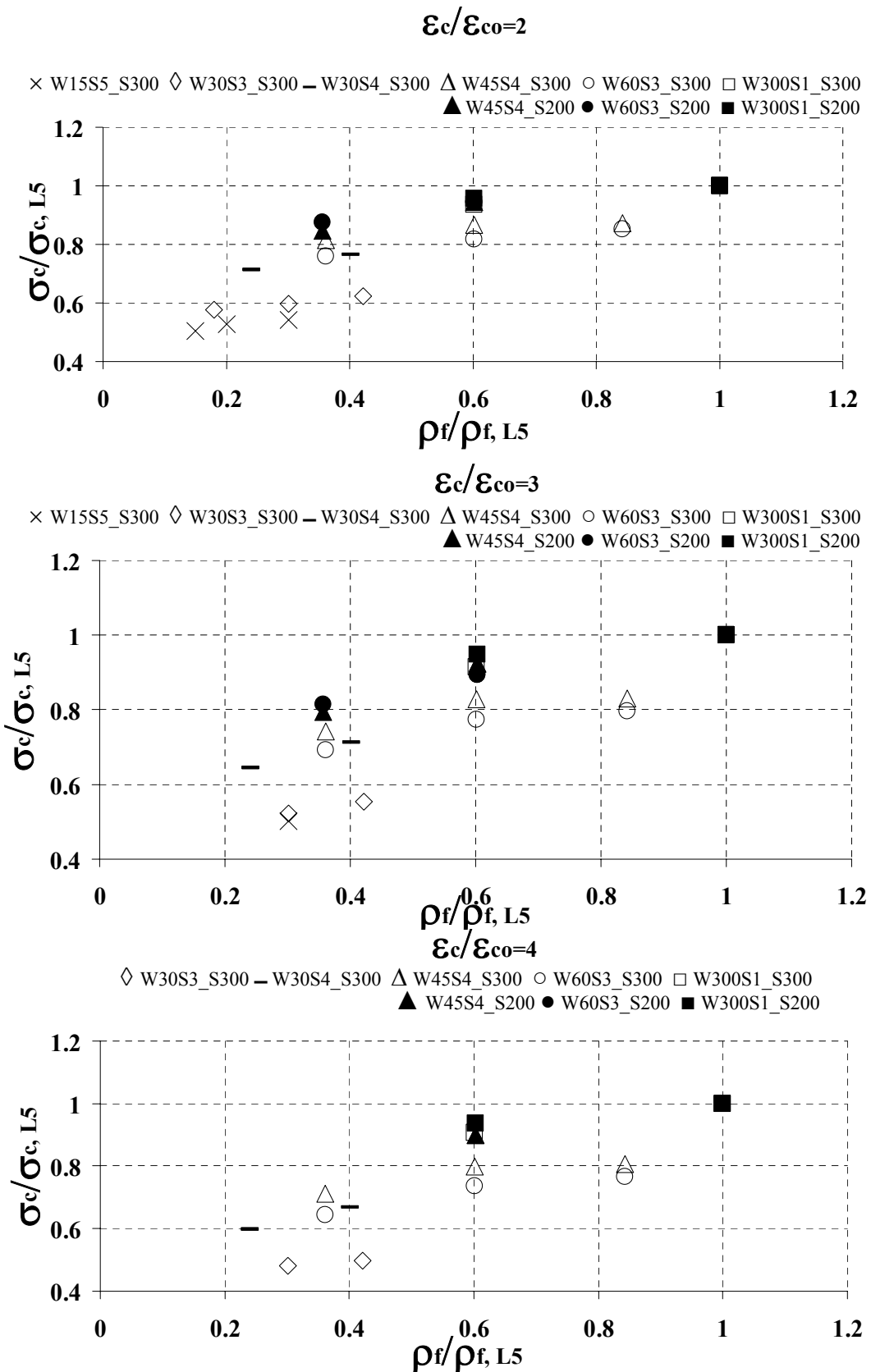


Figura 4.56 – Relação entre  $\sigma_c/\sigma_{c,L5}$  e  $\rho_f/\rho_{f,L5}$  referente aos grupos de ensaios C23S200 e C23S300.

Da análise da Figura 4.56 verifica-se que:

- Para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  de 2, 3, 4, 6 e 8, os provetes das séries confinadas com manta CF130 S&P 240 de 300 g/m<sup>2</sup> tiveram valores de  $\sigma_c/\sigma_{co,L5}$  inferiores aos da série confinadas com manta CF130 S&P 240 de 200 g/m<sup>2</sup>. Essa diferença foi mais significativa nas séries de  $\rho_f/\rho_{f,L5} = 6.0$ .

#### 4.7.2 Séries com betão de 16 MPa

Na Figura 4.57 apresenta-se a relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e  $\rho_f$  para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  de 2, 3, 4, 6 e 8 referentes aos grupos de ensaios C16S200 e C16S300, ou seja, comparam-se os resultados obtidos nos grupos de ensaios de provetes de betão de 16 MPa de resistência à compressão.

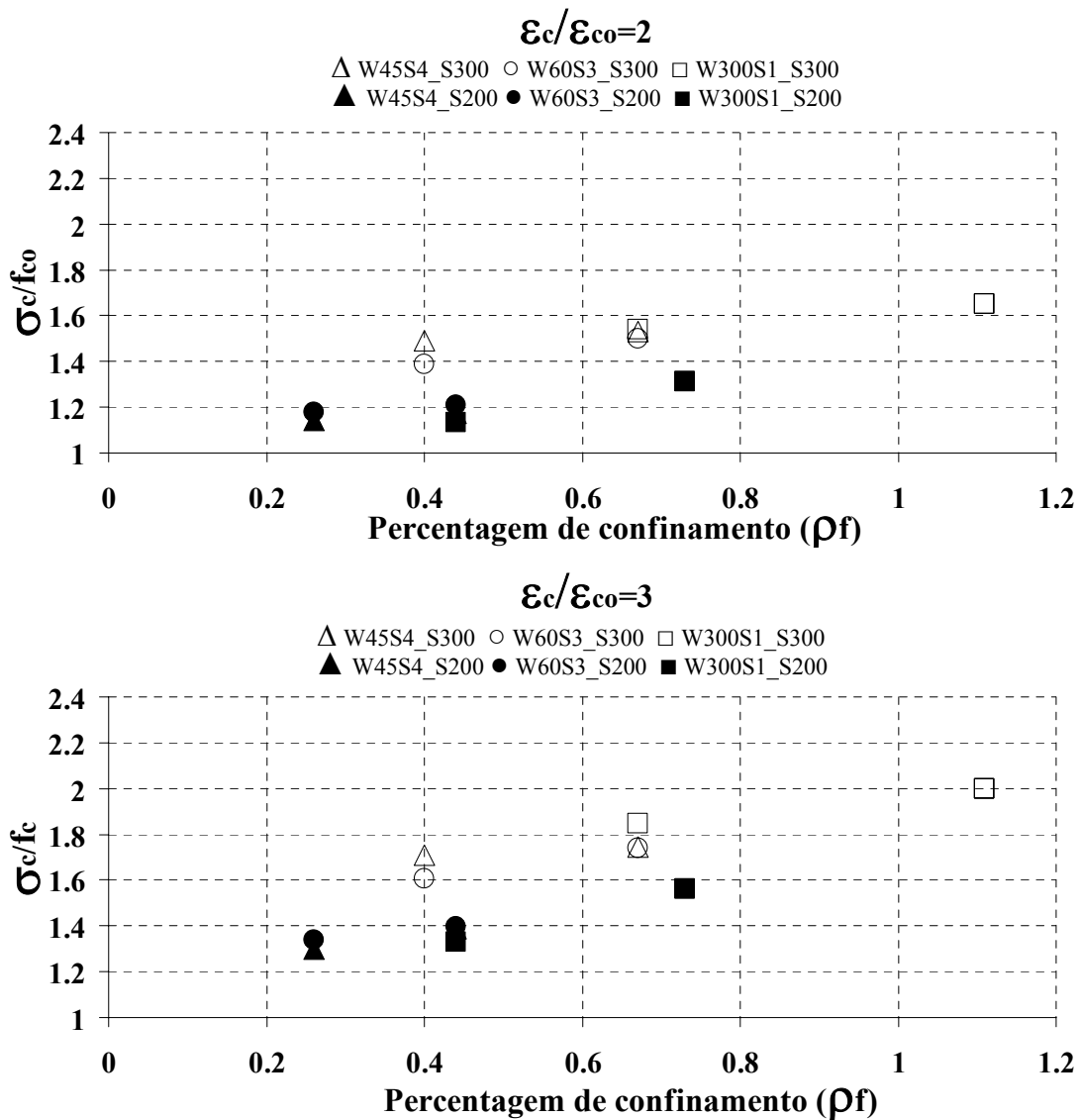


Figura 4.57 – Relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e  $\rho_f$  referente aos grupos de ensaios C16S200 e C16S300 (cont.).

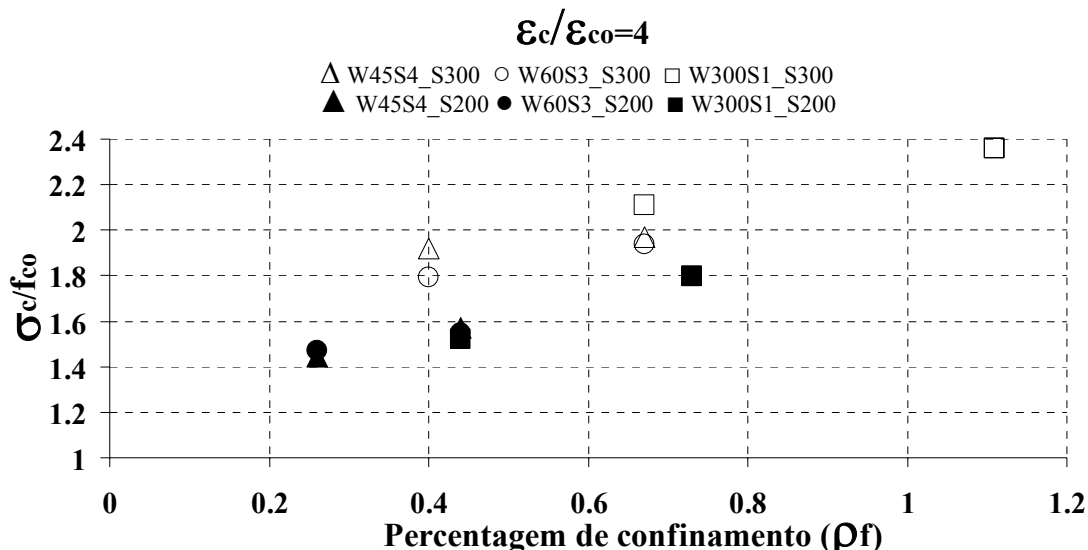


Figura 4.57 (cont.) – Relação entre  $\sigma_c/f_{co}$  e  $\rho_f$  referente aos grupos de ensaios C16S200 e C16S300.

Da análise da Figura 4.57 verifica-se que:

- Para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  de 2, 3 e 4, ao contrário dos valores registados nos provetes de betão 23 MPa de resistência à compressão (ver Figura 4.53), verificaram-se diferenças significativas nos valores de  $\sigma_c/f_{co}$  entre as séries de provetes reforçados com manta CF130 S&P 240 de 300 g/m<sup>2</sup> e as séries de provetes reforçados com a manta CF120 S&P 240 de 200 g/m<sup>2</sup>. Por exemplo para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}=3$ , as séries W45S4 e W60S3 com 5 camadas de manta de 200 g/m<sup>2</sup>, apesar de terem  $\rho_f$  ligeiramente superior ( $\rho_f=0.44$ ) que as séries W45S4 e W60S3 de 3 camadas de manta de 300 g/m<sup>2</sup> ( $\rho_f=0.40$ ), apresentam valores significativamente mais baixos de  $\sigma_c/f_{co}$ , cerca de 20%. O confinamento parece ser tão mais efectivo quanto mais baixa for a resistência do betão e mais elevada for a rigidez do CFRP.

Na Figura 4.58 apresenta-se a relação entre  $\Delta U/U_c$  e  $\rho_f$  para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$  de 2, 3 e 4, referentes às séries de ensaios dos grupos C16S200 e C16S300, ou seja, comparam-se os resultados dos grupos de ensaios de provetes de betão de 16 MPa de resistência à compressão.

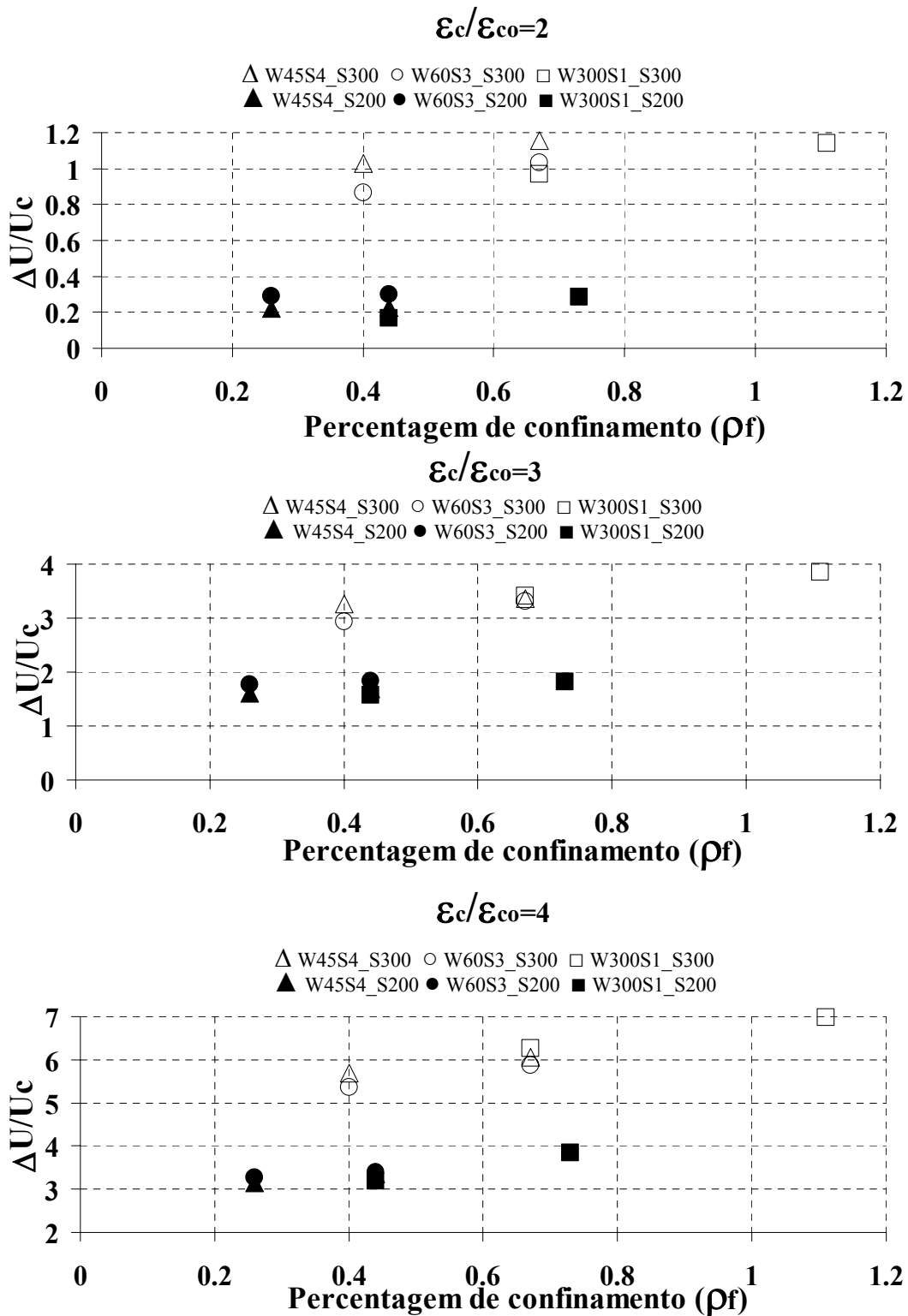


Figura 4.58 – Relação entre  $\Delta U/U_c$  e  $\rho_f$  referente aos grupos de ensaios C16S200 e C16S300

Da análise da Figura 4.58 verifica-se que:

- Para  $\epsilon_c/\epsilon_{co}$  de 2, 3 e 4 consta-te haver diferenças significativas nos valores de  $\Delta U/U_c$  entre as séries. Os provetes reforçados com a manta CF130 S&P 240 de 300 g/m<sup>2</sup> apresentaram capacidade mais elevada de absorção de energia do que

as séries de provetes reforçados com a manta CF120 S&P 240 de 200 g/m<sup>2</sup>. Por exemplo, para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{c0}=3$  e semelhante  $\rho_f$ , o valor de  $\Delta U/U_c$  da série W45S4L3 reforçada com a manta de 300 g/m<sup>2</sup> ( $\rho_f=0.40$ ) foi 166% superior ao da série W45S4L5 reforçada com a manta de 200 g/m<sup>2</sup> ( $\rho_f=0.44$ ). Esta diferença aumenta com  $\varepsilon_c/\varepsilon_{c0}$ .

Na Figura 4.59 apresenta-se a relação entre a tensão máxima nos vários sistemas de confinamento e a tensão máxima nos provetes confinados (full wrapping) com 3 camadas  $\sigma_c/\sigma_{c,L3}$  para os diferentes  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  (manta de 300 g/m<sup>2</sup> com  $\rho_{f,L3}=0.67$  e para a manta de 200 g/m<sup>2</sup> com  $\rho_{f,L3}=0.44$ ) e para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{c0}$  de 2, 3 e 4, referentes às séries de ensaio dos grupos C16S200 e C16S300, ou seja, comparam-se os resultados dos grupos de provetes de betão de 16 MPa de resistência à compressão.

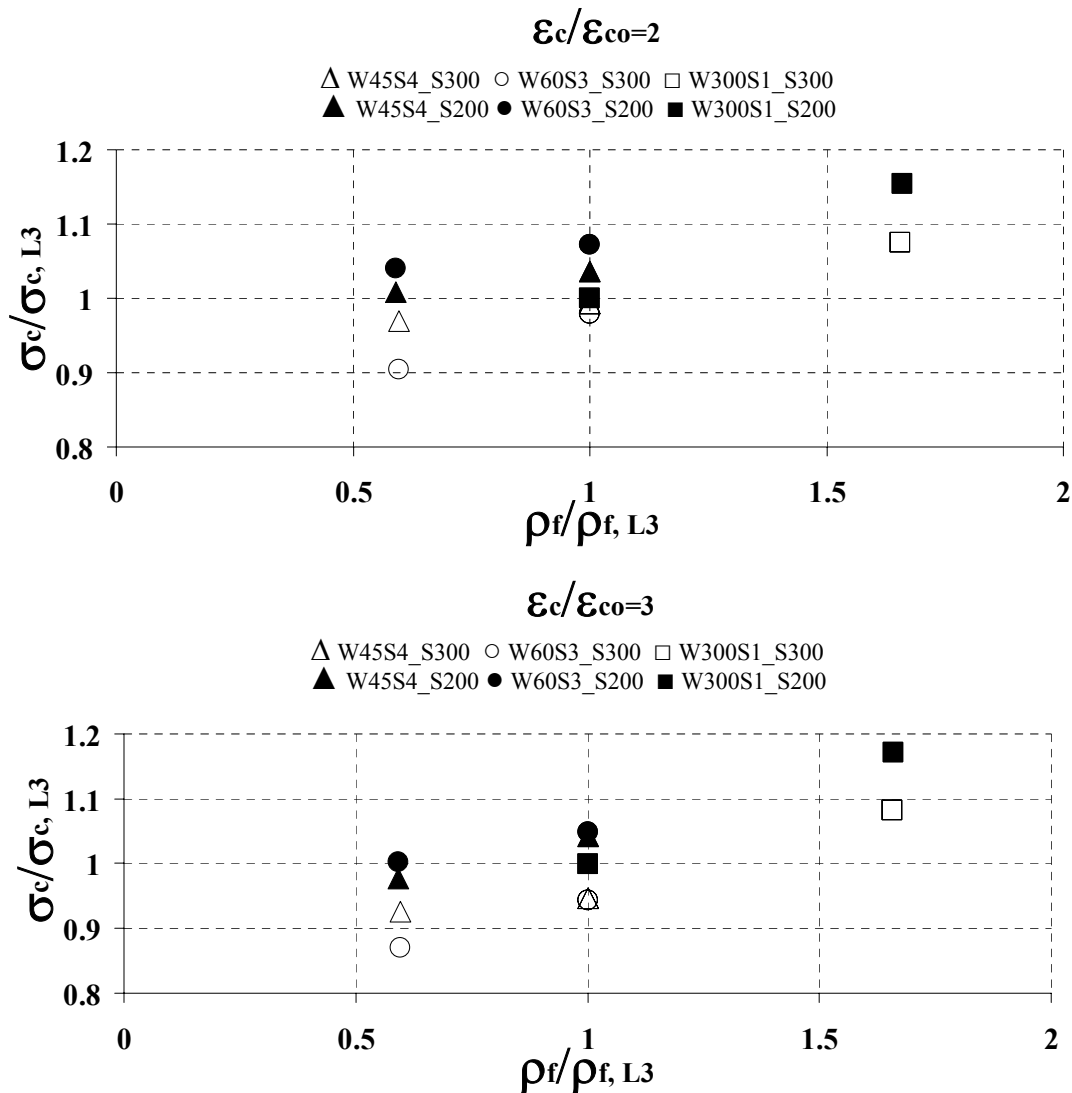


Figura 4.59 – Relação entre  $\sigma_c/\sigma_{c,L3}$  e  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  referente aos grupos de ensaios C16S200 e C16S300 (cont.)

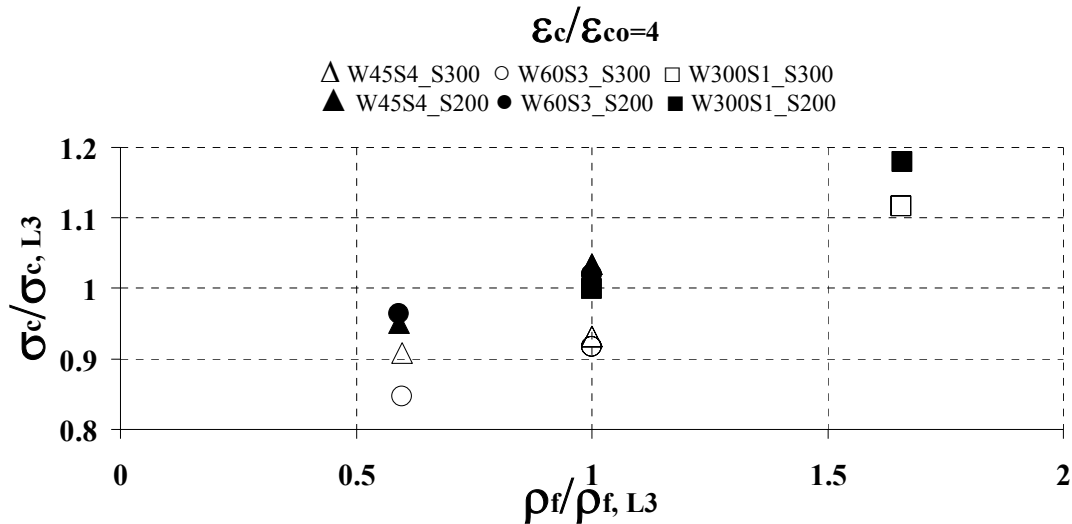


Figura 4.59 (cont.) – Relação entre  $\sigma_c/\sigma_{c,L3}$  e  $\rho_f/\rho_{f,L3}$  referente aos grupos de ensaios C16S200 e C16S300.

Da análise da Figura 4.59 verifica-se que:

- Para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{c0}$  de 2, 3, 4, 6 e 8, os provetes das séries confinadas com manta CF130 S&P 240 de 300 g/m<sup>2</sup> apresentaram valores de  $\sigma_c/\sigma_{c0,L3}$  inferiores aos das séries confinadas com manta CF130 S&P 240 de 200 g/m<sup>2</sup>.

Na Figura 4.60 apresenta-se a relação entre a tensão máxima nos vários sistemas de confinamento e a tensão máxima nos provetes confinados (full wrapping) com 5 camadas  $\sigma_c/\sigma_{c,L5}$  para os distintos  $\rho_f/\rho_{f,L5}$  (manta de 300 g/m<sup>2</sup> com  $\rho_{f,L5}=1.11$  e para a manta de 200 g/m<sup>2</sup> com  $\rho_{f,L5}=0.73$ ) e para  $\varepsilon_c/\varepsilon_{c0}$  de 2, 3, 4, 6 e 8 referentes às séries de ensaio dos grupos C16S200 e C16S300, ou seja, comparam-se os resultados dos grupos de ensaios de provetes de betão de 16 MPa de resistência à compressão.

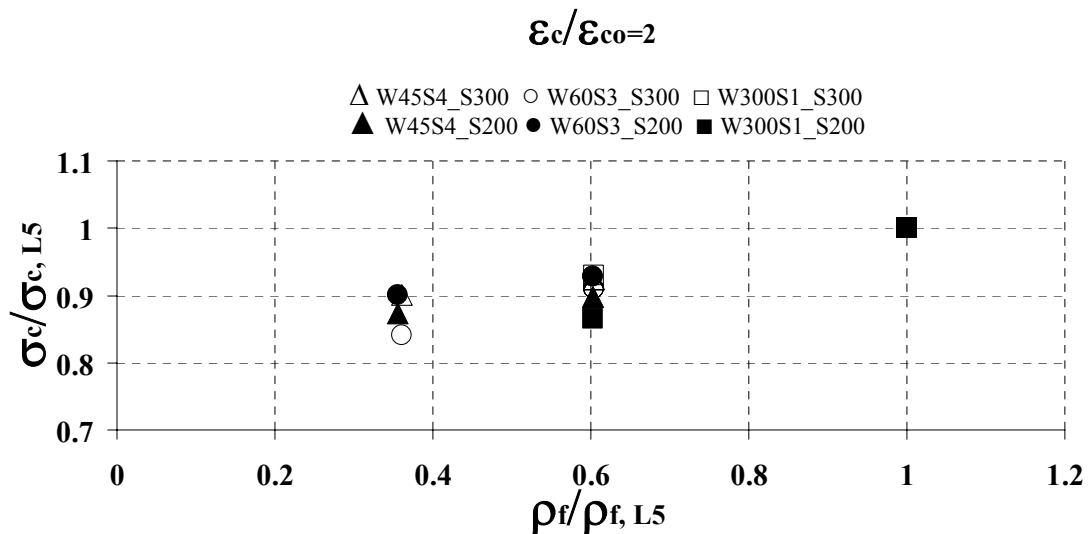


Figura 4.60 – Relação entre  $\sigma_c/\sigma_{c,L5}$  e  $\rho_f/\rho_{f,L5}$  referente aos grupos de ensaios C16S200 e C16S300 (cont.)

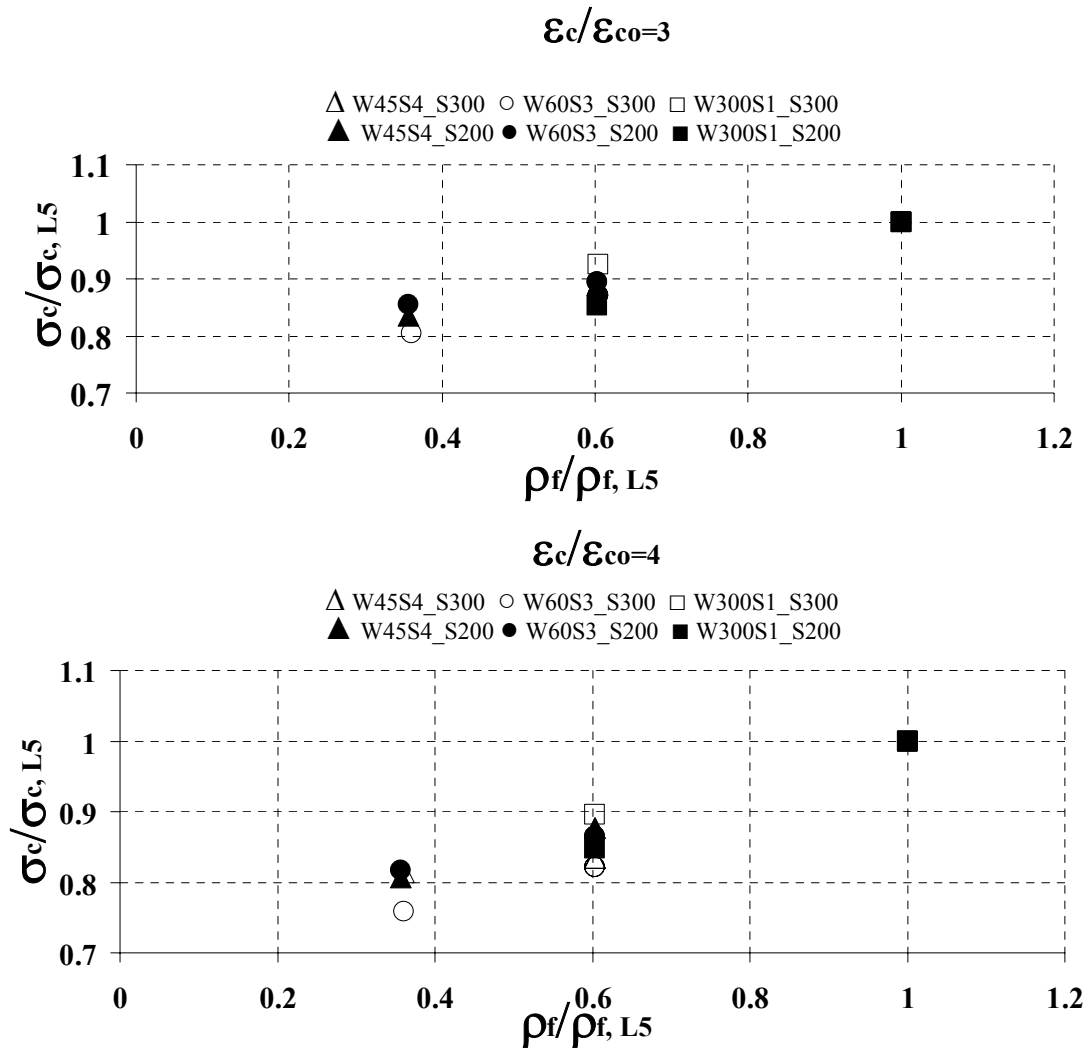


Figura 4.60 (cont.) – Relação entre  $\sigma_c/\sigma_{c,L5}$  e  $\rho_f/\rho_{f,L5}$  referente aos grupos de ensaios C16S200 e C16S300.

Da análise da Figura 4.60 verifica-se que:

- Para  $\epsilon_c/\epsilon_{c0}$  de 2, 3, 4, 6 e 8, os provetes das séries confinadas com manta CF130 S&P 240 de 300 g/m<sup>2</sup> apresentaram, em geral, valores de  $\sigma_c/\sigma_{c,L5}$  inferiores aos das séries confinadas com manta CF130 S&P 240 de 200 g/m<sup>2</sup>. No entanto a diferença não é tão significativa como no caso da relação  $\sigma_c/\sigma_{c,L3}$  versus  $\rho_f/\rho_{f,L3}$ . A elevada rigidez do confinamento com 5 camadas de manta de 200 g/m<sup>2</sup> para o betão de 16 MPa conduz a valores muito próximos de  $\sigma_c/\sigma_{c,L5}$  entre as séries confinadas com os dois tipos de manta.

## 5 CONCLUSÕES

No presente trabalho estudou-se o comportamento à compressão uniaxial de provetes cilíndricos de betão confinados com faixas de manta de CFRP. Foi analisada a influência do número de faixas ao longo da altura do provete, da largura das faixas, do número de camadas de manta por faixa, do tipo de manta e da classe de resistência do betão no aumento da resistência e da capacidade de absorção de energia em compressão daqueles elementos, bem como nos níveis de extensão máxima alcançados pelo CFRP.

### Gráficos tensão versus extensão

O tramo inicial da curva  $\sigma_c - \epsilon_c$  dos provetes confinados e não confinados é igual até ao momento em que a fendilhação do betão activa o confinamento (tramo 1 da Figura 5.1). Nos provetes com  $\rho_f > 0.17$ , as curvas  $\sigma_c - \epsilon_c$  dos provetes confinados começam a divergir das curvas dos correspondentes não confinados, a partir de um nível de tensão um pouco inferior ao da resistência do betão não confinado ( $\sigma_{c1}$ ). Nos provetes confinados a queda de rigidez (diminuição da inclinação da tangente a  $\sigma_c - \epsilon_c$ ), correspondente à entrada em fase de amolecimento do betão, ocorre para um nível de tensão superior ao da resistência do correspondente betão simples ( $\sigma_{c2}$ ). O valor de  $\sigma_{c2}$  é tão maior quanto mais elevado for  $\rho_f$ . A amplitude do tramo 2 é tão mais elevado quanto menor for a resistência do betão e maior a rigidez da manta, dado que a expansibilidade do betão inicia-se para menores níveis de tensão, activando mais cedo o confinamento proporcionado pelo CFRP.

Nos provetes de  $\rho_f > 0.17$ , as curvas de  $\sigma_c - \epsilon_c$  apresentam uma fase de endurecimento após a tensão  $\sigma_{c2}$ . A rigidez desta fase depende da resistência do betão e da rigidez do sistema de confinamento.

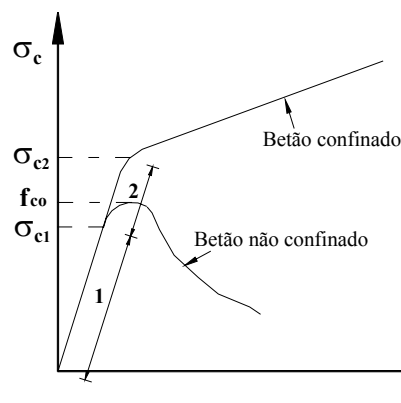


Figura 5.1 – Relação entre  $\sigma_c - \epsilon_c$  em provete confinado e não confinado.

A análise dos resultados obtidos nos distintos sistemas de confinamento utilizados permite concluir que a tensão máxima registada nos provetes de betão simples (BS), i.e., não confinados, foi excedida nas séries com uma percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) superior a 0.17. Nas séries com  $\rho_f > 0.17$  a capacidade de carga aumentou com o número de camadas de CFRP por faixa. Porém, acima de cinco camadas o acréscimo de carga foi marginal.

O aumento da capacidade de carga foi maior nos provetes confinados com a manta de rigidez mais elevada (S&P C-240 de 300 g/m<sup>2</sup>), atingindo valores três vezes maiores que os registados nos provetes de betão simples. O confinamento foi mais efectivo nos provetes de betão de menor resistência (16 MPa).

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, tendo-se registado valores de 16% a 85% da extensão de rotura do CFRP. Nas séries com maior percentagem de confinamento, a capacidade de carga máxima da prensa foi alcançada sem ter ocorrido a rotura do provete, pelo que, nestes casos, as extensões máximas registadas no CFRP são inferiores às que se desenvolveriam caso se tivesse levado os provetes à rotura.

### **Gráficos variação de energia versus percentagem de confinamento**

Em termos de capacidade de absorção de energia esta aumentou com a percentagem de confinamento. Porém, acima de cinco camadas o acréscimo de absorção de energia foi marginal.

Entre séries de igual percentagem de confinamento, confinadas com a manta de maior percentagem de fibras de carbono CF130 S&P 240 de 300 g/m<sup>2</sup>, a capacidade de absorção de energia foi mais elevada nas séries confinadas com faixas de 45mm de largura do que nas séries confinadas com faixas de 60 mm de largura. No caso dos provetes confinados com a manta de CF120 S&P 240 de 200 g/m<sup>2</sup>, esta tendência nem sempre se verificou.

A influência da largura e do número de faixas no grau de confinamento alcançado está relacionada com o espaço livre de betão entre as faixas (volume de betão não confinado). Em séries com a mesma percentagem de confinamento verificou-se maiores aumentos de tensão máxima e de energia absorvida nas que dispunham de menor espaço livre entre faixas. Este comportamento foi mais vincado nas séries de ensaios com provetes reforçados com a manta de 300 g/m<sup>2</sup>, dado que, quanto mais rígido for o sistema de confinamento parcial, maior concentração de dano ocorre no betão entre as faixas de confinamento, diminuindo a eficácia do sistema de confinamento.

### **Índice de rentabilidade (IR)**

O parâmetro IR serviu para verificar quais as séries que permitiram maiores incrementos de capacidade de carga em relação à quantidade de material utilizado no seu confinamento. Para todos os grupos de ensaios verificou-se que, para níveis relativamente baixos de extensão axial dos provetes ( $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}=2$ ), isto é para  $\varepsilon_c \cong 5 \%$ , os níveis de rentabilidade das séries W45S4L5, W60S3L5 e W300S1L3 são similares. Com o aumento dos níveis de deformação o índice de rentabilidade da série W300S1L3 aumentou em relação ao das outras duas séries.

O índice de rentabilidade diminui com o aumento dos níveis de deformação.

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

No presente trabalho foram consideradas duas classes distintas de betão com resistência aos 28 dias de 16 MPa e 23 MPa. Em termos de incremento da capacidade de carga e da ductilidade compararam-se os resultados obtidos nos grupos de ensaios C16S300 e C23S300, onde a única diferença era a classe de resistência do betão, dado que os arranjos de confinamento eram iguais e o tipo de manta foi a CF130 S&P 240 com 300 g/m<sup>2</sup>. Quer em termos de capacidade de carga quer em termos de ductilidade os maiores aumentos foram registados nos provetes de betão de menor capacidade resistente (C16S300). Tal deve-se ao facto de nos sistemas de confinamento parciais ocorrer uma grande concentração de dano no betão entre faixas, sendo esse dano tão mais intenso quanto menos resistente for o betão. Assim, o confinamento é tão mais efectivo quanto maior for a tendência para ocorrerem grandes deformações e elevada expansão radial

Da comparação dos resultados obtidos nos grupos de ensaios C16S200 e C23S200, ambos confinados com manta, CF120 S&P 240 de 200 g/m<sup>2</sup>, verificou-se uma tendência oposta à registada nos grupos confinados com manta de 300 g/m<sup>2</sup>. Nos grupos C16S200 e C23S200 os valores mais elevados quer em termos de capacidade de carga quer em termos de ductilidade foram obtidos nos provetes de betão de maior resistência (C23S200). Neste caso o dano no betão também se concentra entre faixas. No entanto, devido à menor rigidez dos sistemas de confinamento (manta de 200 g/m<sup>2</sup>, quando nos anteriores grupos a manta era de 300 g/m<sup>2</sup>) e à menor expansibilidade do betão do grupo C16S300 as faixas romperam neste grupo.

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

Para avaliar esta influência foram comparados os resultados obtidos nos grupos de ensaios C23S300 e C23S200 (betão de igual classe resistente e manta de distinta rigidez). Valores mais elevados de aumento de capacidade de carga e de aumento de capacidade de absorção de energia foram registados nos sistemas confinados com a manta mais rígida (300 g/m<sup>2</sup>). Tendência similar de resultados foi observada entre os grupos de ensaios C16S200 e C16S300, mas as diferenças registadas entre estas séries foram superiores às obtidas entre as séries C23S300 e C23S200.

Dos quatro grupos ensaiados, o que apresentou maior incremento em termos de capacidade de carga e de absorção de energia foi o C16S300, constituído por provetes de betão de menor resistência e confinados com a manta mais rígida.

### **Modos de rotura**

Os modos de rotura observados estão relacionados com o tipo de manta e com o tipo de betão. Nos provetes confinados parcialmente com a manta mais fina, CF120 S&P 240, a rotura violenta das fibras foi precedida por estalidos relacionados com o rompimento das fibras. No caso dos provetes confinados com a manta mais grossa, CF130 S&P 240, a rotura de faixas (s) de manta não ocorreu em todos os provetes, principalmente nas séries totalmente confinadas e constituídas por provetes de betão maior resistência. Nos casos em que ocorreu rotura de faixas (s) de manta, esta foi muito mais violenta do que no caso dos provetes confinados com a manta mais fina, CF120 S&P 240, dado haver

maior quantidade de energia acumulada nos sistemas confinados com a manta mais grossa no momento da rotura.

Dos quatro grupos de ensaios o que apresentou maior dano no fim dos ensaios foi o grupo C23S200, ou seja, o grupo formado por provetes com betão de maior resistência à compressão, confinados com a manta mais fina.

## REFERÊNCIAS:

CEB-FIB, Structural Concrete- textbook on behaviour, design and performance, vol.1, July 1999.

Choi, S., Karl-Christian Thienel, Shah, S.P., (1994) “Strain softening of concrete, RILEM Round Robin Test, committee 148-SSC-Strain softening of concrete, Evaston, IL, USA, July.

Cole, C. e Belardi, A. (2001). “FRP jacketed Reinforced Concrete Columns.” *Center for infrastructure engineering studies*, University of Missouri, Department of Civil Engineering, Rolla, May, 104 pp.

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

Nanni, A., Bradford, N., M. (1995). “FRP jacketed concrete under uniaxial compression.” *Constr. And Build. Mat*, 9(2), 115-124.

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

Picher F., Rochete P., Labossière P., (1995). “Confinement of concrete cylinders with CFRP”. *Fiber composites in infrastructure, Proceeding, First International Conference on composites in infrastructure*, 829-841.

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

Saadatmanesh H., Ehsani M. R., Li M.W., (1994) “*Strength and ductility of concrete columns externally reinforced with fiber composites straps*”. *ACI Struct J*; 91(4): 434-47.

Saafi, M., Toutanji, H. A., e Li, Z. (1999). “Behavior of concrete columns confined with fiber reinforced polymer tubes.” *ACI Material Journal*, 96(4), 500-509.

Saatcioglu, M., e Baingo, D. (1999). “ Circular high-strength concrete columns under simulated seismic loading”. *Journal of structural engineering*, ASCE, 125(3), 272-289.

Seible, F., Priestley, M., J., N., Hegemier, G. A., and Innamorato, D. (1997). "Seismic retrofit of RC columns with continuous carbon fiber jackets." *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 1(2), 52-62.

Untiveros, C.M.A. (2002) "Estudio experimental del comportamiento del hormigón confinado sometido a compresión", Tesis doctoral, Barcelona.

Van Mier, J. G. M. "Strain-softening of concrete under multiaxial loading conditions"

Xiao, Y., Ma, R. (1997). "Seismic retrofit of RC circular columns using prefabricated composites jacketing." *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 123(10), 1357-1364.

Xiao Y. e Wu H., e Martin, G. R. (1999) "Prefabricated composite jacketing of RC columns for enhanced shear strength". *Journal of structural Engineering*, ASCE, Vol. 124, nº3, pp 255-264.

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.

Zangelmi, E. J., (1999) "Caracterización del comportamiento de hormigones de altas prestaciones com y sin fibras metálicas a compresión uniaxial", Tesis doctoral, Barcelona.

ANEXO A

A1 . Gráficos rotação-extensão axial para as séries de ensaios do grupo C23S300

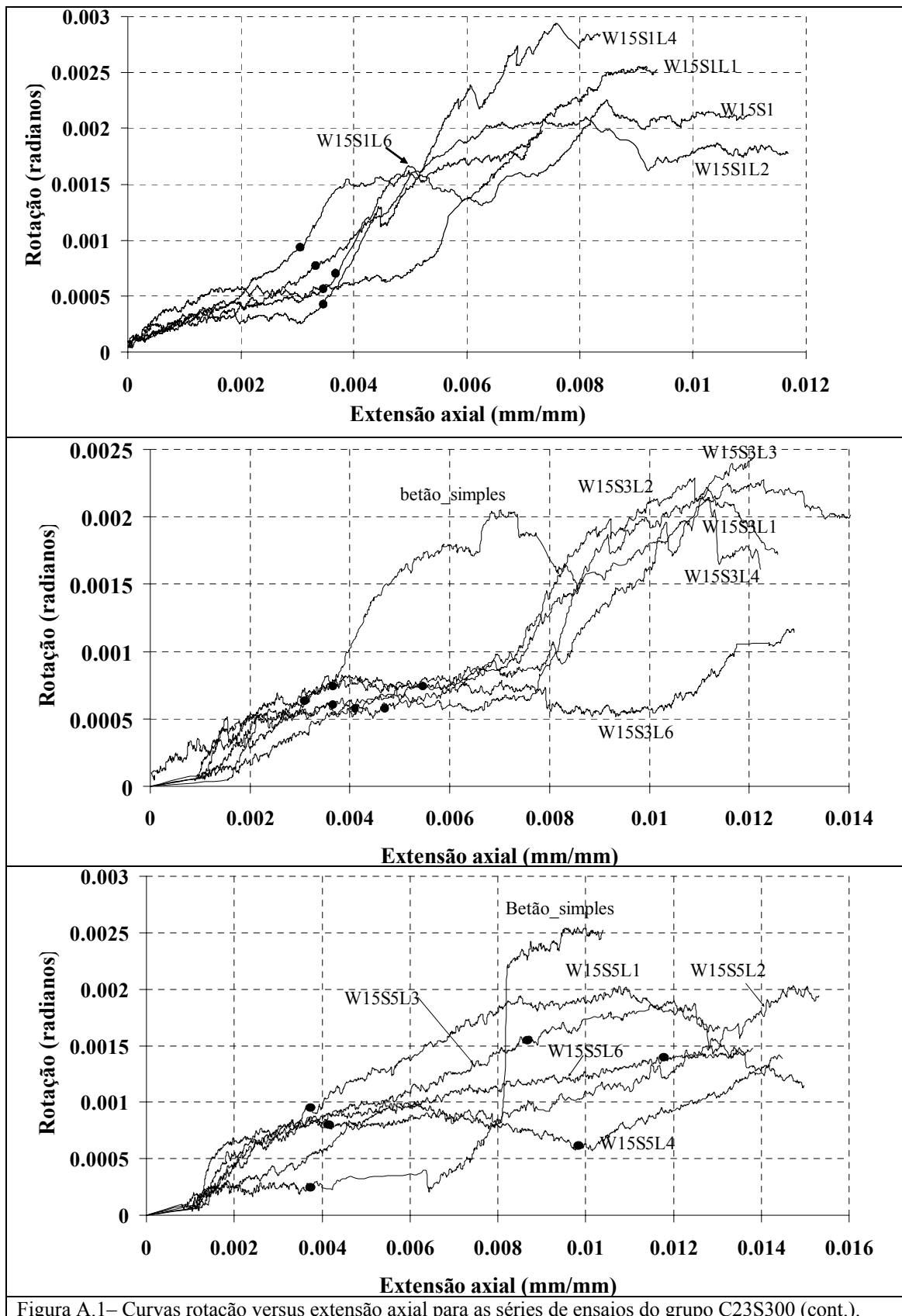
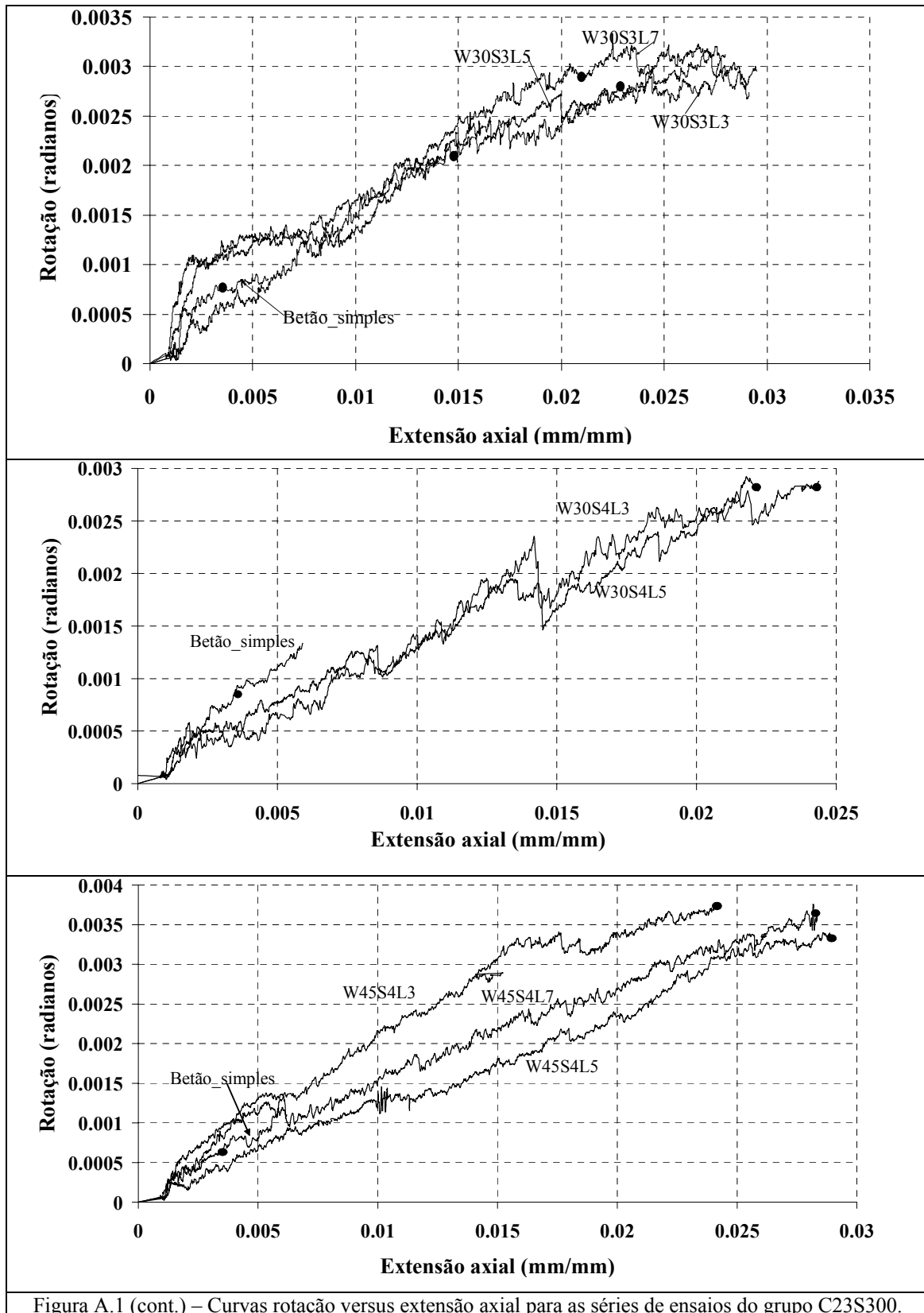


Figura A.1– Curvas rotação versus extensão axial para as séries de ensaios do grupo C23S300 (cont.).



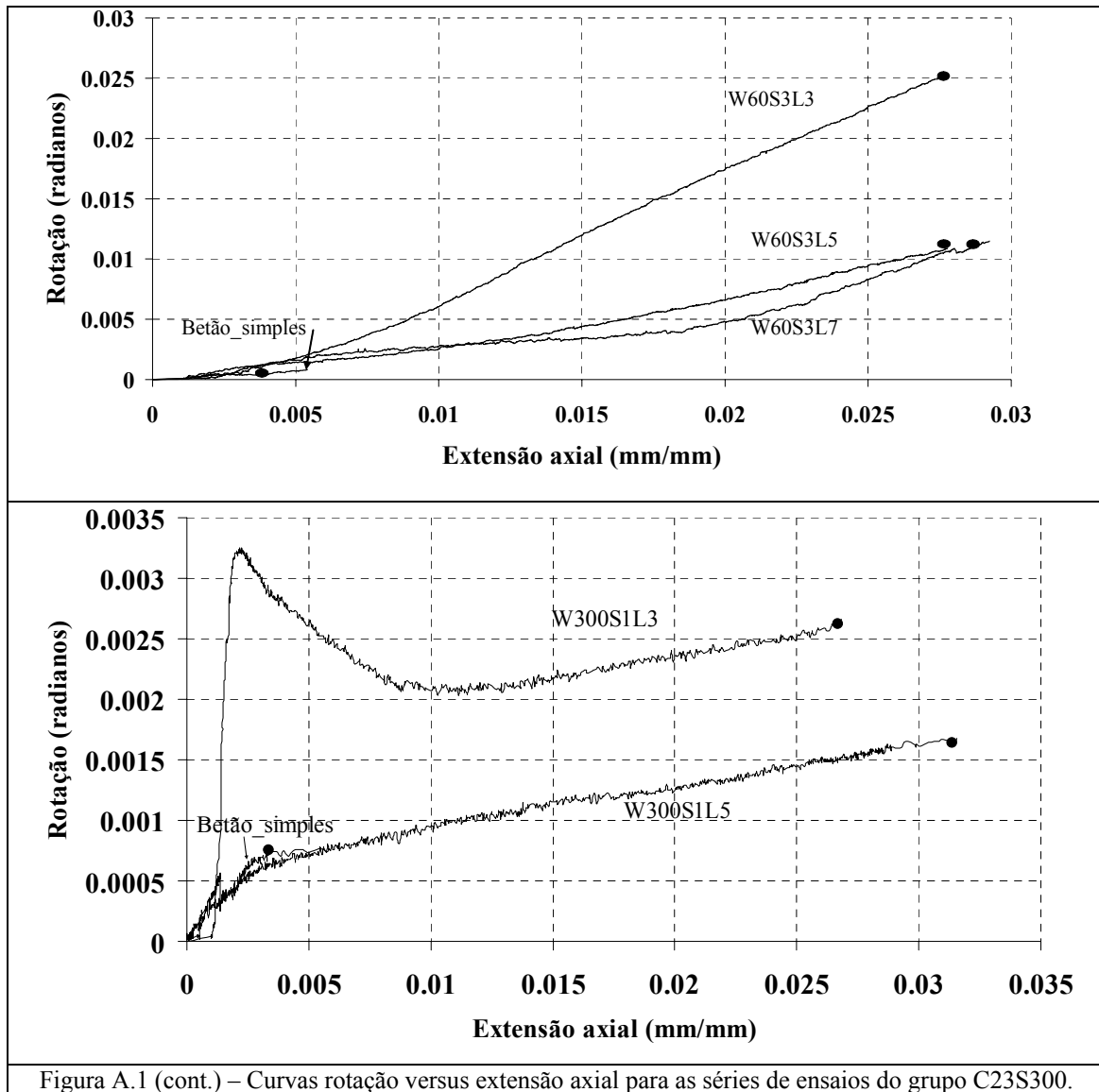


Figura A.1 (cont.) – Curvas rotação versus extensão axial para as séries de ensaios do grupo C23S300.

A2 . Gráficos rotação-extensão axial para as séries de ensaios do grupo C23S200

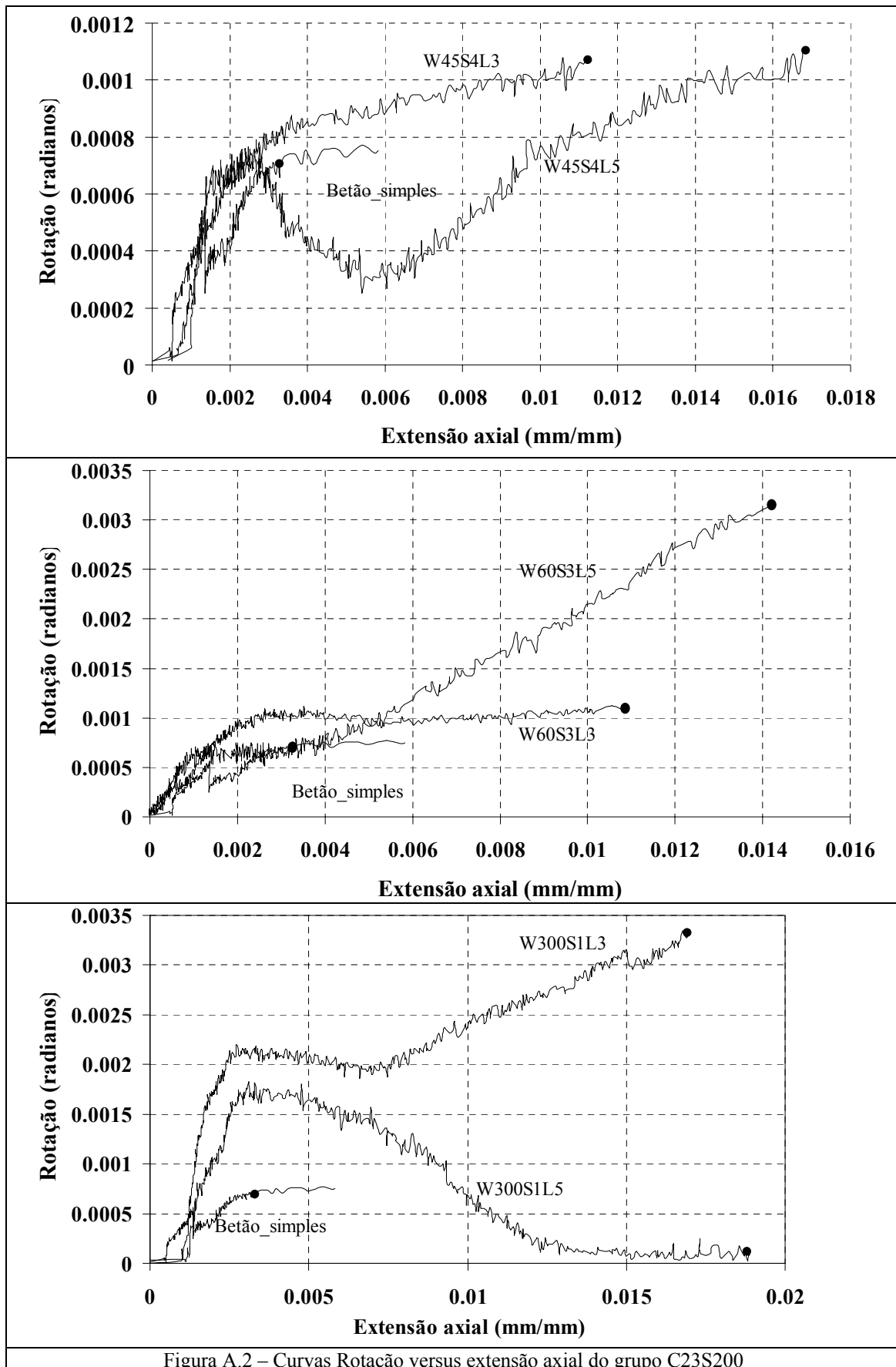


Figura A.2 – Curvas Rotação versus extensão axial do grupo C23S200

**A3 . Gráficos rotação-extensão axial para as séries de ensaios do grupo C16S200**

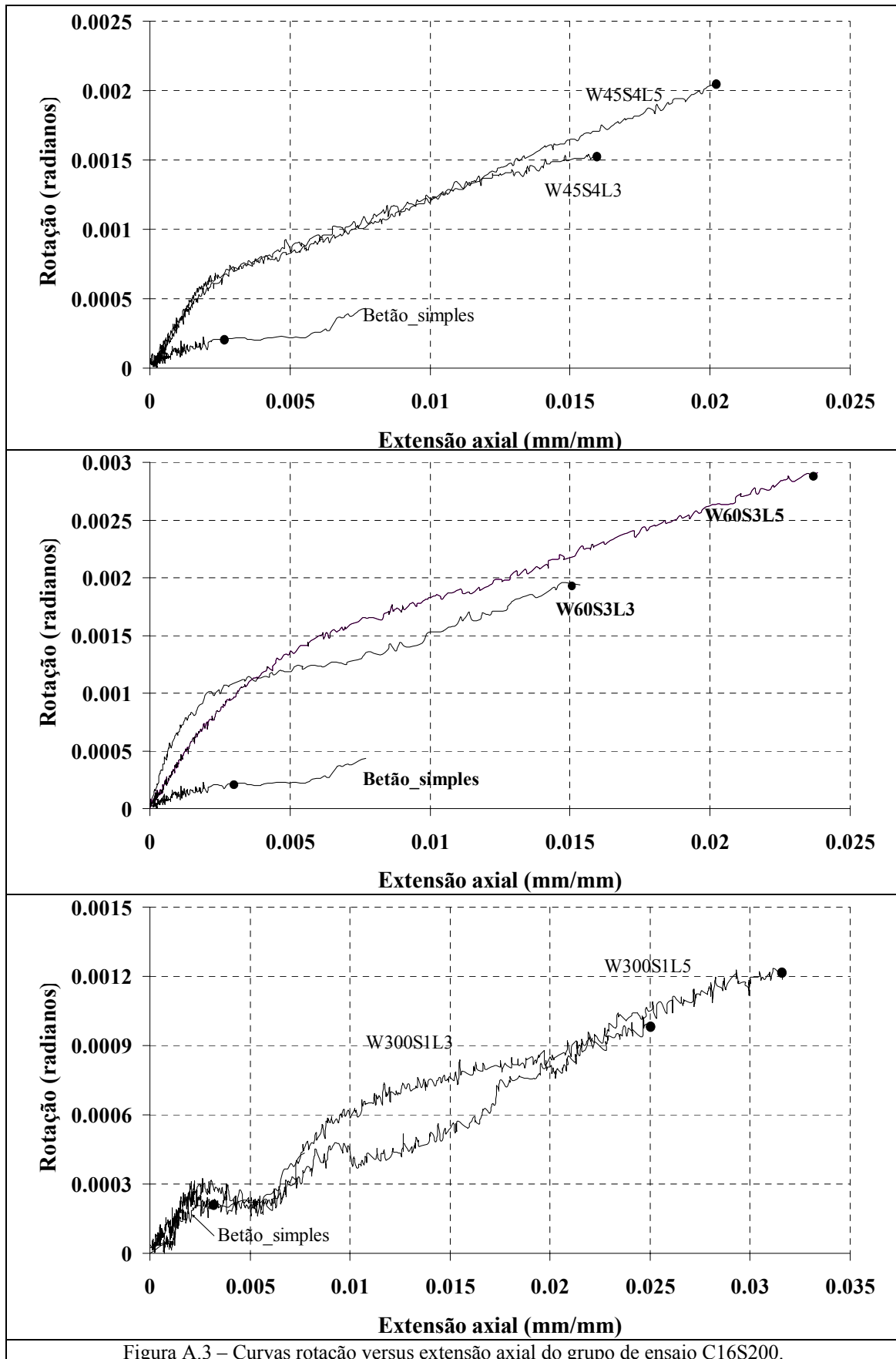


Figura A.3 – Curvas rotação versus extensão axial do grupo de ensaio C16S200.

**A4 . Gráficos rotação-extensão axial para as séries de ensaios do grupo C16S300**

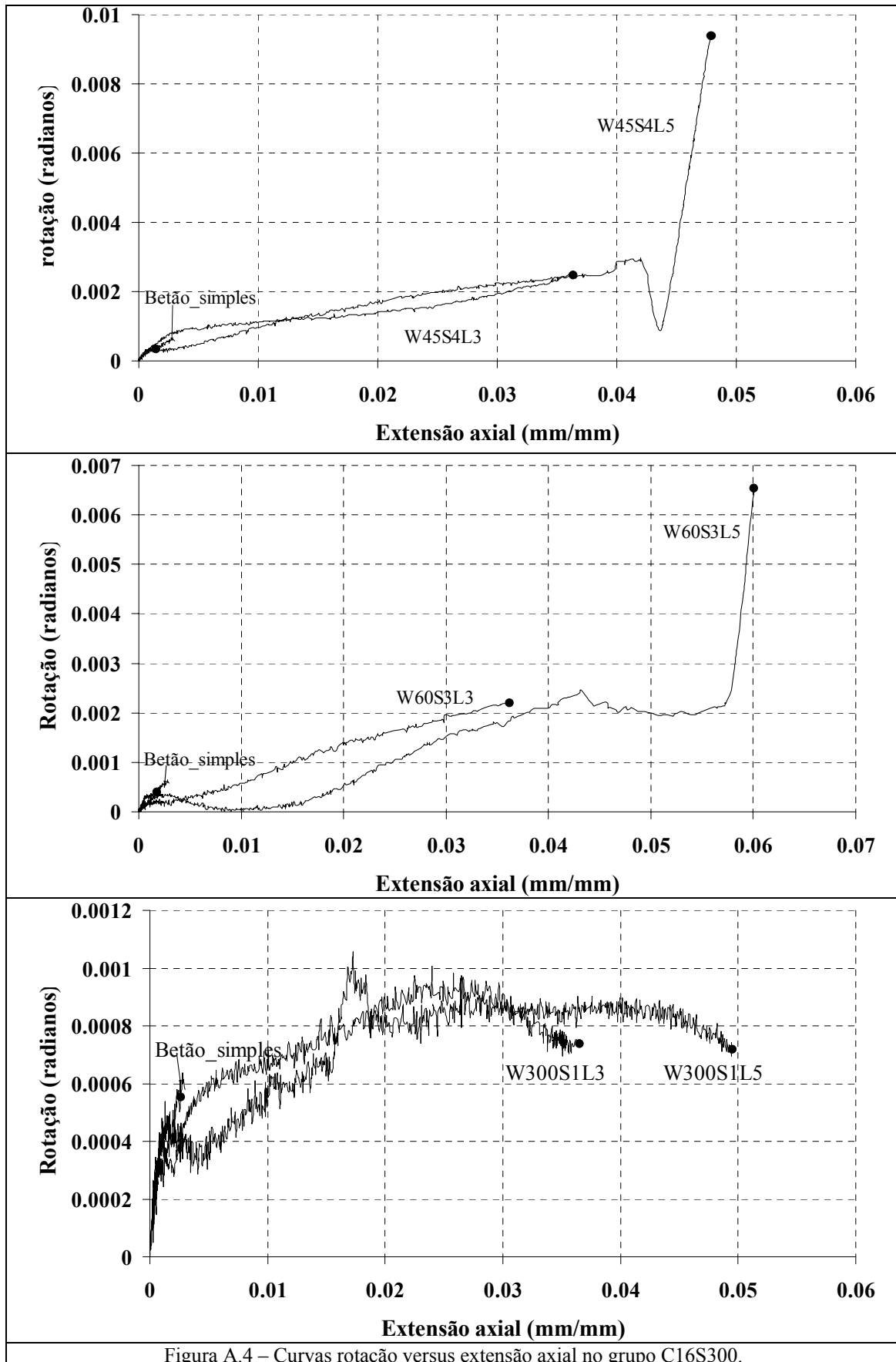

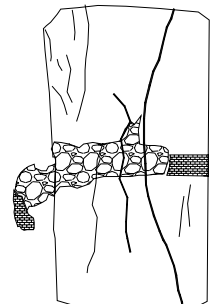

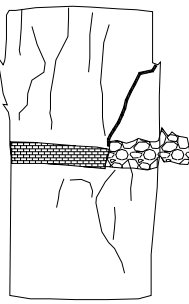

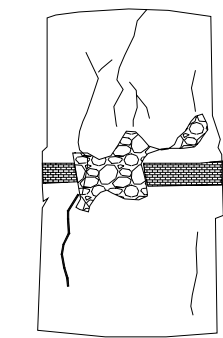

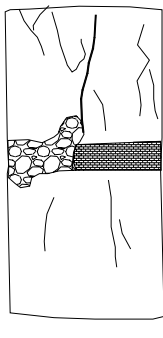

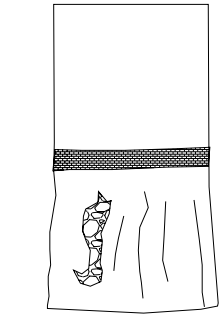
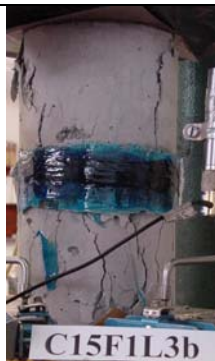
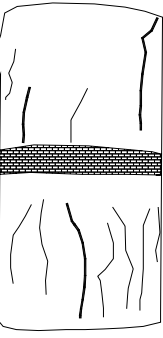



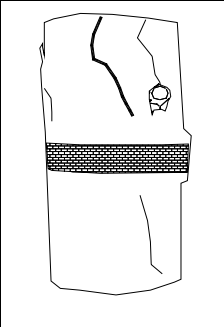

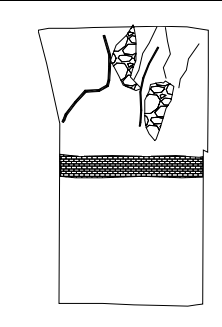

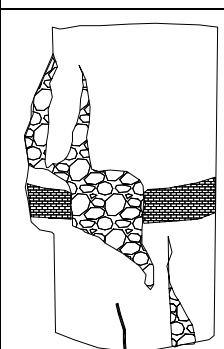

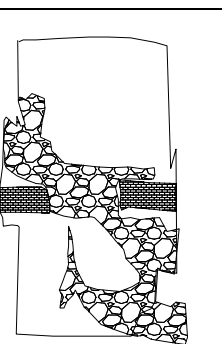
Figura A.4 – Curvas rotação versus extensão axial no grupo C16S300.

## ANEXO B


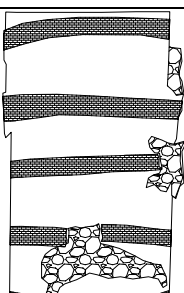

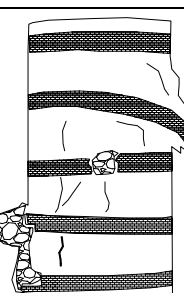
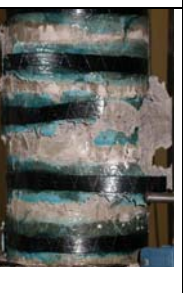
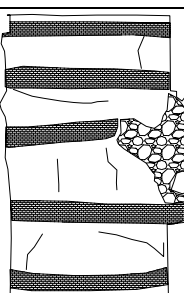

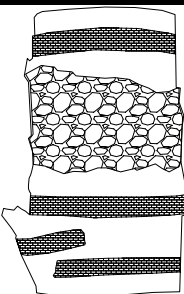

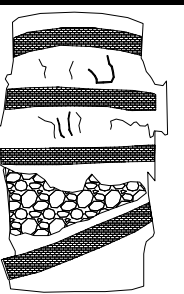

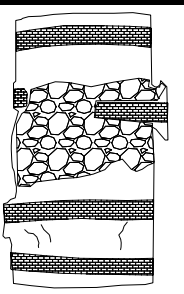
### B1 – Esquema do modo de rotura das séries de ensaios do grupo S23S300


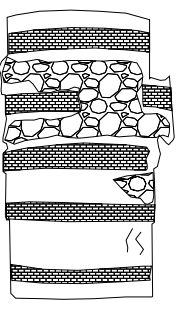

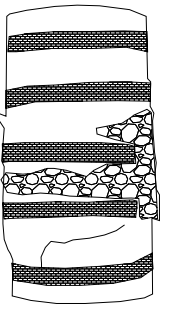

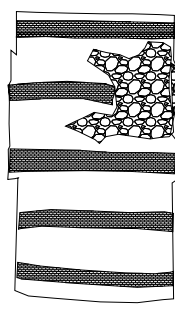

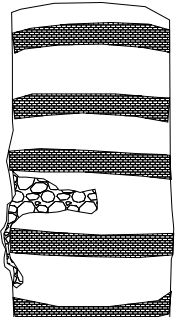

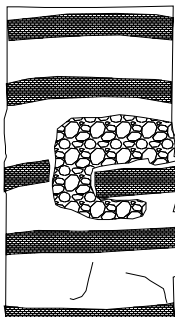

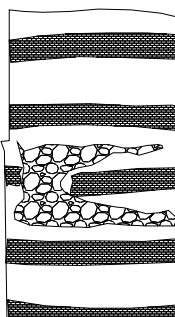

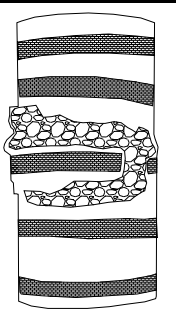

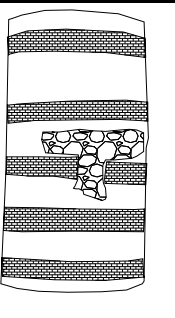

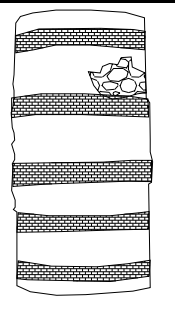

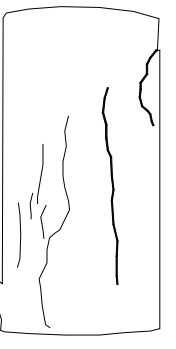

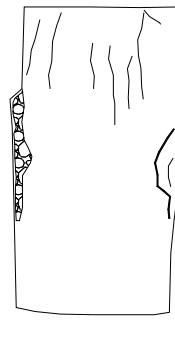

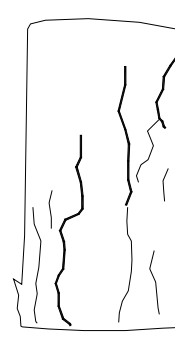
#### B1.1 - Esquema do modo de rotura das séries W15S1Ln

	Provete	Esquema	Provete	Esquema
1 camada				
	W15S1L1a		W15S1L1b	
2 camadas				
	W15S1L2a		W15S1L2b	
3 camadas				
	W15S1L3a		W15S1L3b	


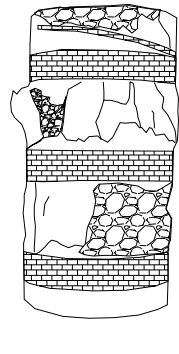

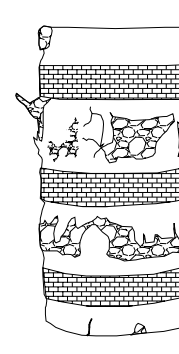

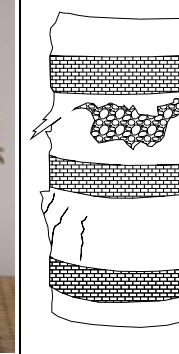

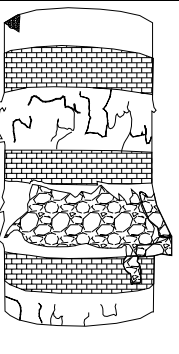

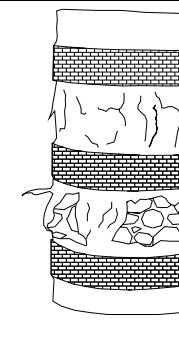

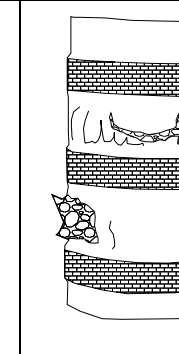

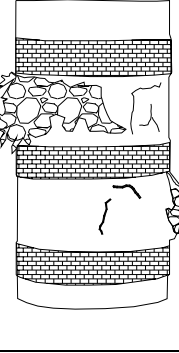

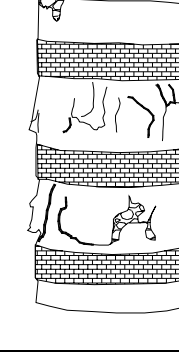

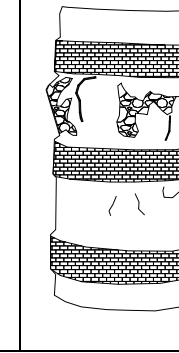
4 camadas				
	W15S1L4a		W15S1L4b	
	<b>Provete</b>	<b>Esquema</b>	<b>Provete</b>	<b>Esquema</b>
6 camadas				
	W15S1L6a		W15S1L6b	


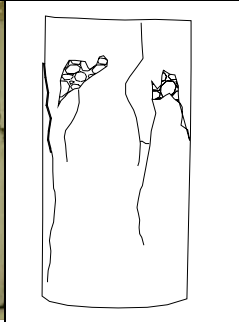

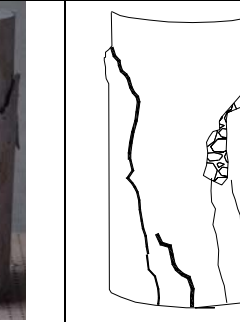

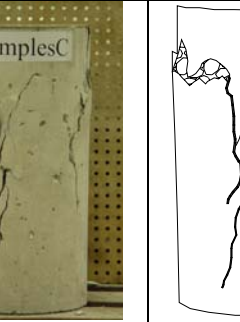
**B.1.2 - Esquema do modo de rotura das séries W15S5Ln**

	<b>Provete</b>	<b>Esquema</b>	<b>Provete</b>	<b>Esquema</b>	<b>Provete</b>	<b>Esquema</b>
1 camadas						
	W15S5L1a		W15S5L1b		W15S5L1c	
2 camadas						
	W15S5L2a		W15S5L2b		W15S5L2c	


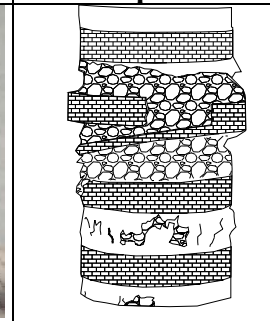

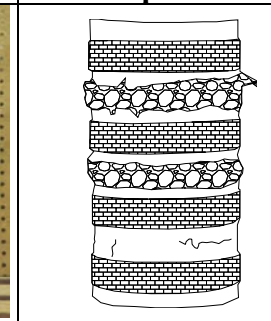

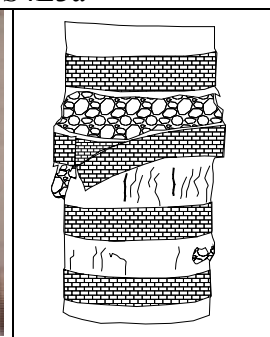

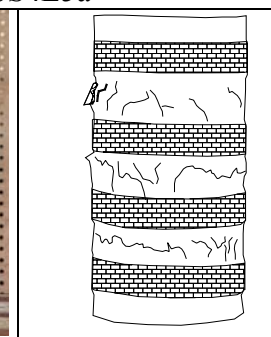
	Provete	Esquema	Provete	Esquema	Provete	Esquema
3 camadas						
	W15S5L3a		W15S5L3b		W15S5L3c	
4 camadas						
	W15S5L4a		W15S5L4b		W15S5L4c	
6 camadas						
	W15S5L6a		W15S5L6b		W15S5L6c	
0 camadas						
	W15S5_Simples A		W15S5_Simples B		W15S5_Simples C	

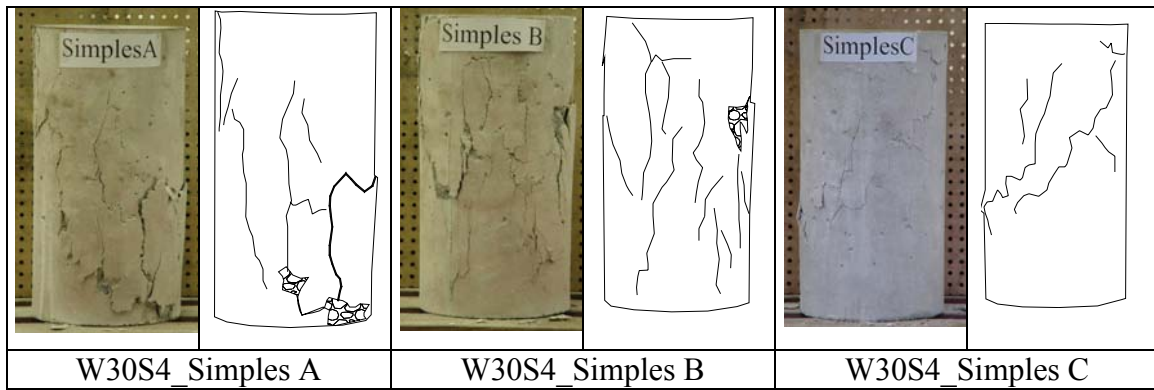
**B.1.3 - Esquema do modo de rotura das séries W30S3Ln**

3 camadas		5 camadas		7 camadas	
Provete	Esquema	Provete	Esquema	Provete	Esquema
					
W30S3L3a		W30S3L5a		W30S3L7a	
					
W30S3L3b		W30S3L5b		W30S3L7b	
					
W30S3L3c		W30S3L5c		W30S3L7c	

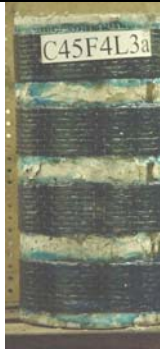
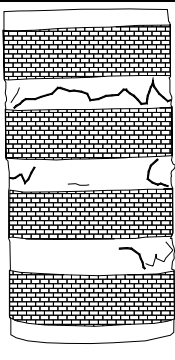

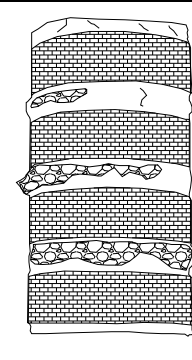

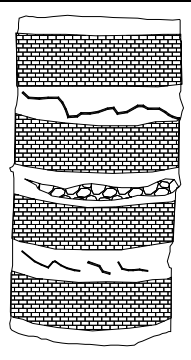

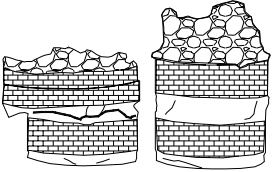

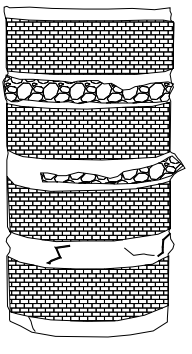

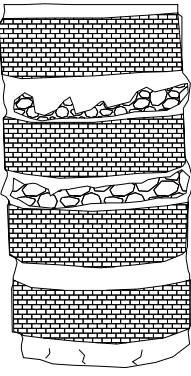

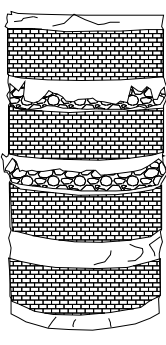

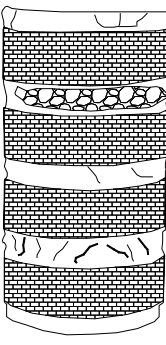

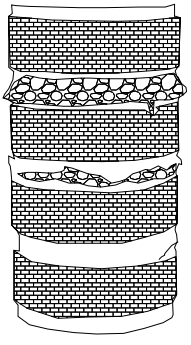
					
W30S3 Simples A		W30S3 Simples B		W30S3 Simples C	

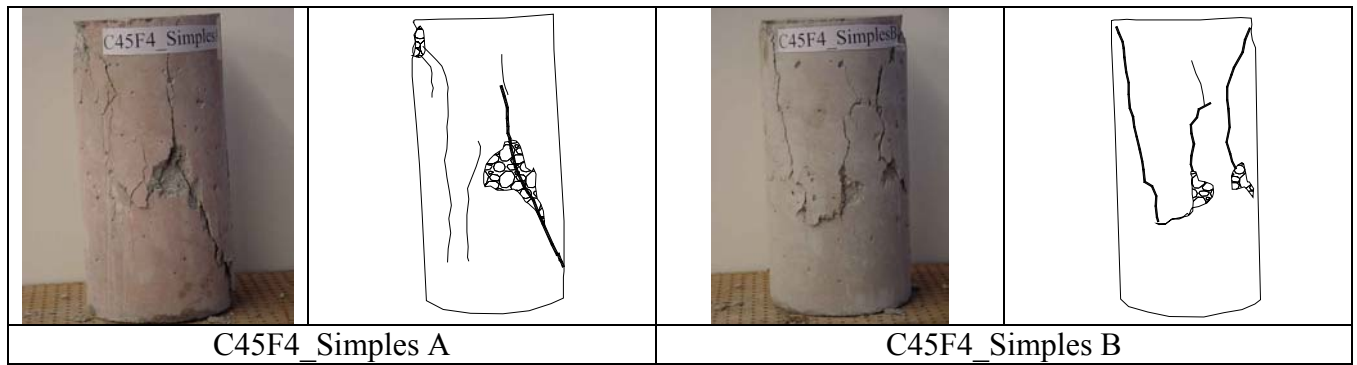
**B.1.4 – Esquema do modo de rotura das séries W30S4Ln**

3 camadas		5 camadas	
Provete	Esquema	Provete	Esquema
			
W30S4L3a		W30S4L5a	
			
W30S4L3b		W30S4L5b	


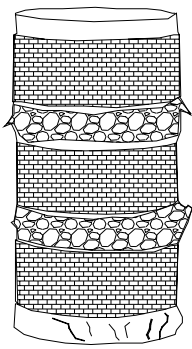

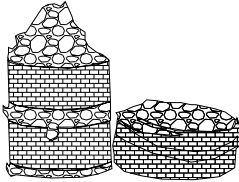

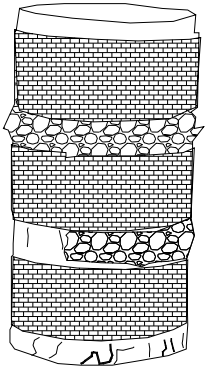

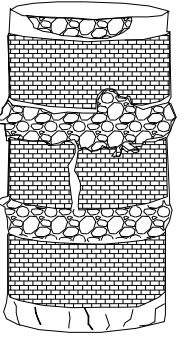

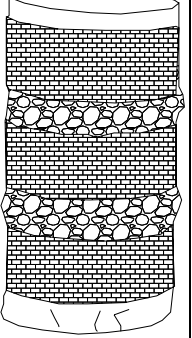

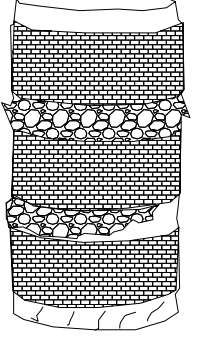

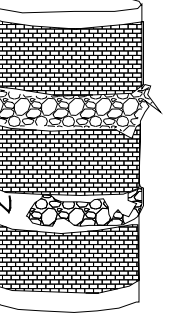

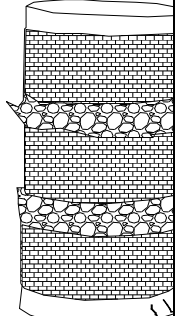

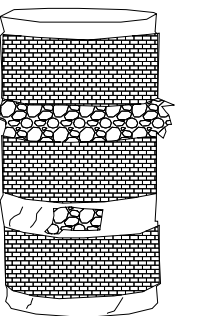



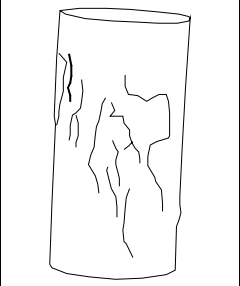

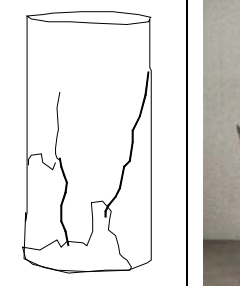
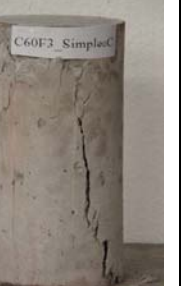
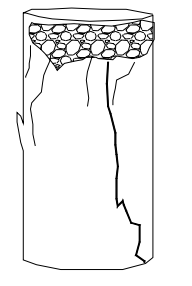
**B.1.5 - Esquema do modo de rotura das séries W45S4Ln**

3 camadas		5 camadas		7 camadas	
Provete	Esquema	Provete	Esquema	Provete	Esquema
					
W45S4L3a		W45S4L5a		W45S4L7a	
					
W45S4L3b		W45S4L5b		W45S4L7b	
					
W45S4L3c		W45S4L5c		W45S4L7c	


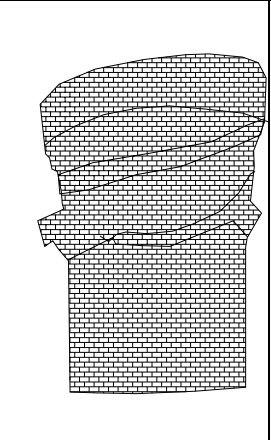

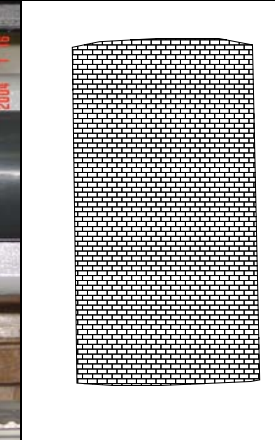

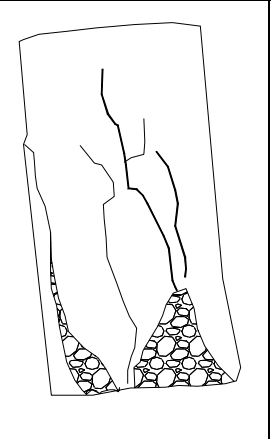

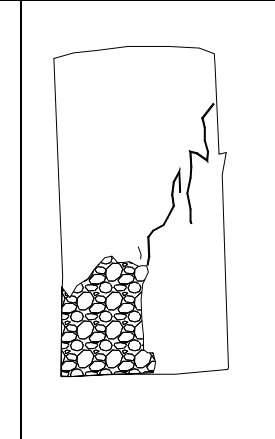


**B.1.6 - Esquema do modo de rotura das séries W60S3Ln**

3 camadas		5 camadas		7 camadas	
Provete	Esquema	Provete	Esquema	Provete	Esquema
					
W60S3L3a		W60S3L5a		W60S3L7a	
					
W60S3L3b		W60S3L5b		W60S3L7b	
					
W60S3L3c		W60S3L5c		W60S3L7c	


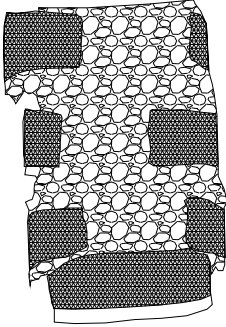
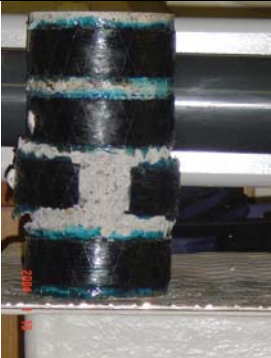
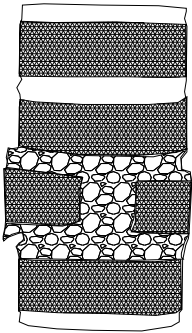

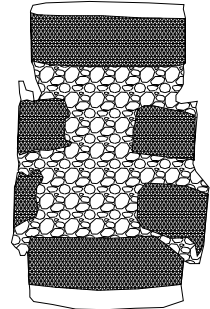

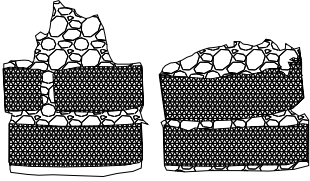
					
C60F3_Simples A		C60F3_Simples B		C60F3_Simples C	

**B.1.7 - Esquema do modo de rotura das séries W300S1Ln**


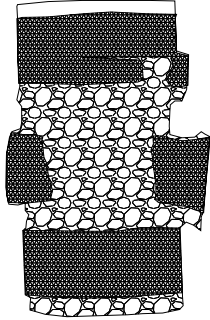

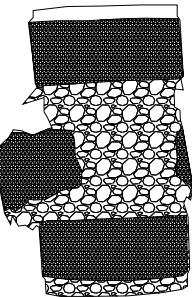
3 camadas		5 camadas	
Provete	Esquema	Provete	Esquema
			
W300S1L3		W300S1L5	
			
W300S1_SimplesA		W300S1_SimplesB	

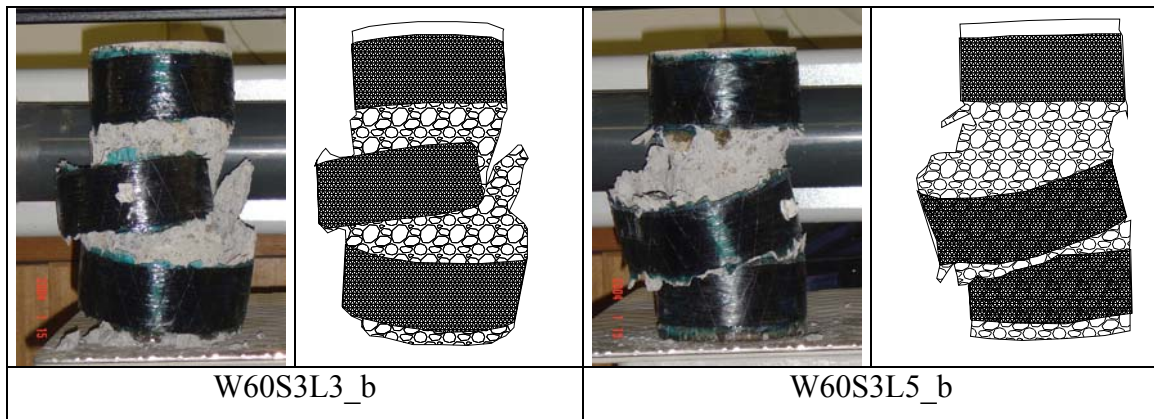
## B2 – Esquema do modo de rotura das séries de ensaios do grupo C23S200

### B2.1 - Esquema do modo de rotura das séries W45S4Ln

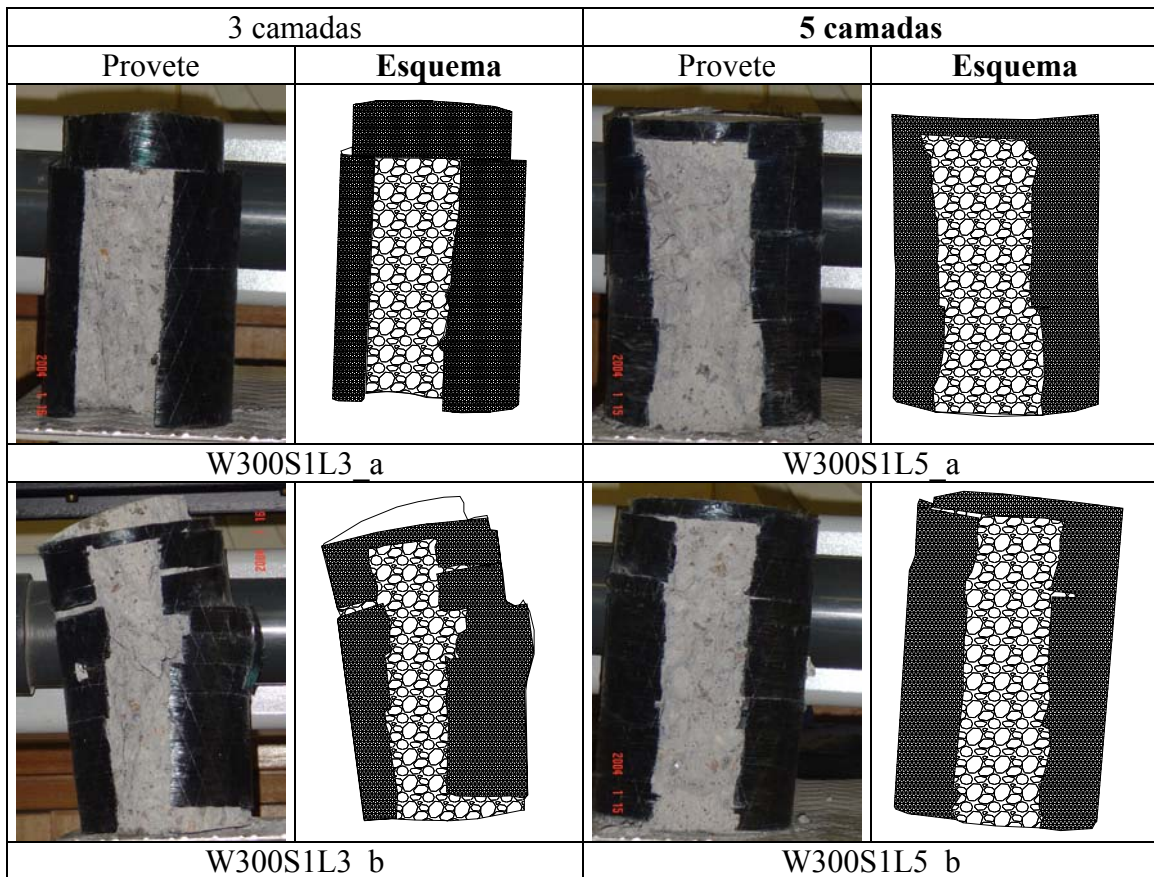
3 camadas		5 camadas	
Provete	Esquema	Provete	Esquema
			
W45S4L3 a		W45S4L5 a	
			
W45S4L3 b		W45S4L5 b	
			
		W45S4L5 b	

### B2.2 - Esquema do modo de rotura das séries W60S3Ln


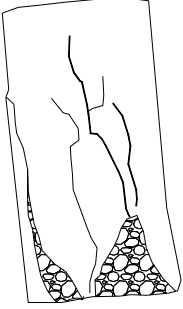

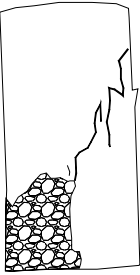
3 camadas		5 camadas	
Provete	Esquema	Provete	Esquema
			
W60S3L3 a		W60S3L5 a	



**B2.3 - Esquema do modo de rotura das séries W300S1Ln**


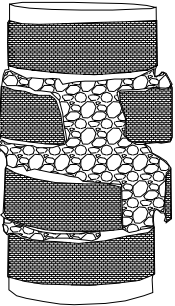

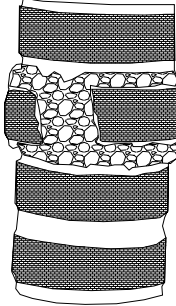

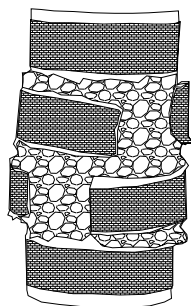

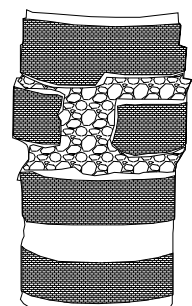


### B2.4 - Esquema do modo de rotura das séries sem reforço


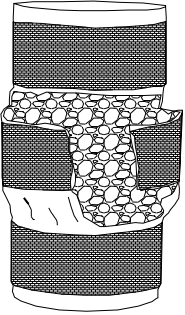

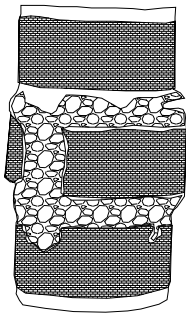

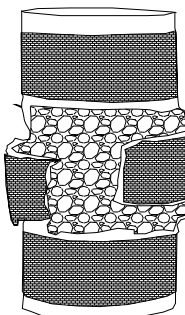

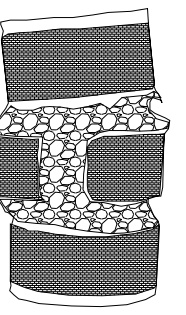
Provete	Esquema	Provete	Esquema
			
Simples_a		Simples_b	

**B3 – Esquema do modo de rotura das séries de ensaios do grupo C16S200**


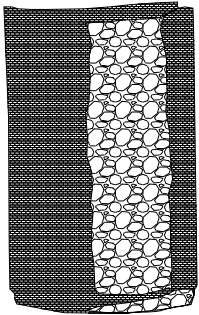

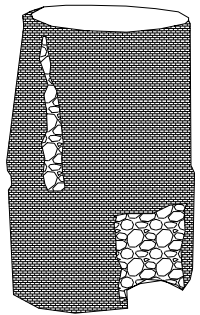

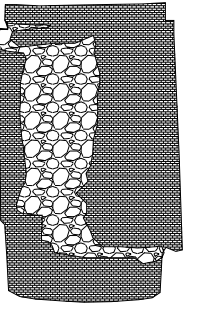

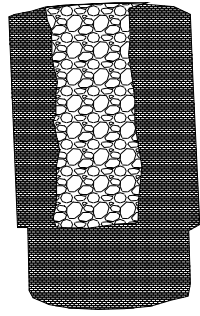
**B3.1 - Esquema do modo de rotura das séries W45S4Ln**

3 camadas		5 camadas	
Provete	Esquema	Provete	Esquema
			
W45S4L3 a		W45S4L5 a	
			
W45S4L3 b		W45S4L5 b	


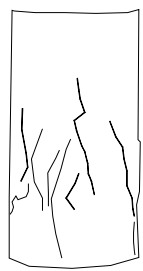


**B3.2 - Esquema do modo de rotura das séries W60S3Ln**

3 camadas		5 camadas	
Provete	Esquema	Provete	Esquema
			
W60S3L3 a		W60S3L5 a	
			
W60S3L3 b		W60S3L5 b	

**B3.3 - Esquema do modo de rotura das séries W300S1Ln**


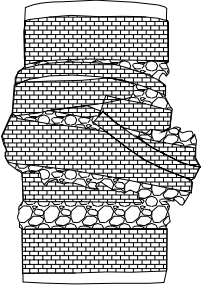

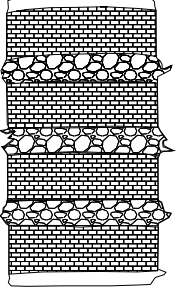
3 camadas		5 camadas	
Provete	Esquema	Provete	Esquema
			
W300S1L3 a		W300S1L5 a	
			
W300S1L3 b		W300S1L5 b	

**B3.4 - Esquema do modo de rotura das séries sem reforço**

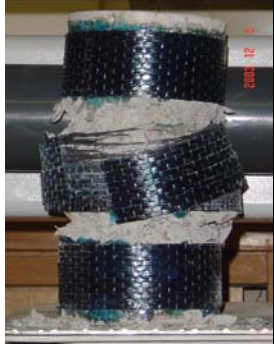
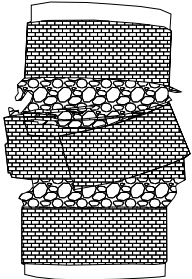
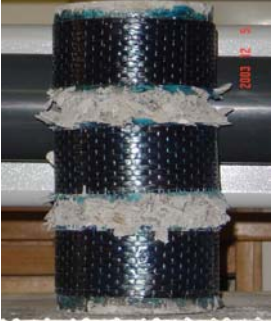
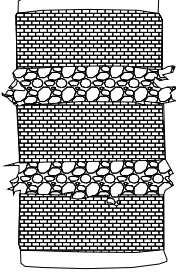
Provete	Esquema	Provete	Esquema
			
Simple_a		Simple_b	

## B4 – Esquema do modo de rotura das séries de ensaios do grupo C16S300


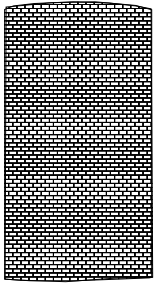

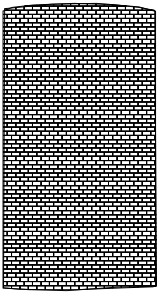
### B4.1 - Esquema do modo de rotura das séries W45S4Ln

3 camadas		5 camadas	
Provete	Esquema	Provete	Esquema
			
W45S4L3		W45S4L5	


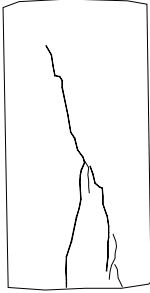
### B4.2 - Esquema do modo de rotura das séries W60S3Ln

3 camadas		5 camadas	
Provete	Esquema	Provete	Esquema
			
W60S3L3		W60S3L5	

**B4.3 - Esquema do modo de rotura das séries W300S1Ln**

3 camadas		5 camadas	
Provete	Esquema	Provete	Esquema
			
W300S1L3		W300S1L3	

**B4.4 - Esquema do modo de rotura das séries sem reforço**

Provete	Esquema
	
Simples	