



Análise numérica e experimental de faixas de lajes contínuas de CA reforçadas com laminados de carbono aplicados segundo a técnica NSM

Experimental and numerical analysis of continuous RC slab strips strengthened with CFRP laminates by using the NSM technique

Gláucia Dalfré (1); Joaquim Barros (2); Ana C. P. dos Santos (3); César Faraone (4)

(1) PhD, Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA)

(2) Professor Catedrático, ISISE - Universidade do Minho

(3) PhD, Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA)

(4) Bolsita de IC, Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA)

Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA), Av. Tancredo Neves, 6731 Foz do Iguaçu Brasil

Resumo

Os programas experimentais para o reforço à flexão de estruturas de concreto armado (CA) segundo a técnica NSM (Near Surface Mounted, em língua inglesa) com laminados de fibras de carbono (CFRP) são, em geral, realizados com vigas simplesmente apoiadas. Deste modo, há uma carência de estudos experimentais e teóricos sobre a redistribuição de momentos em elementos estruturais estaticamente indeterminados reforçados segundo a técnica NSM. Assim, de forma a avaliar a influência da técnica de reforço NSM no incremento de capacidade de carga e na redistribuição de momentos em elementos contínuos de CA, um programa experimental composto por dezessete faixas de laje foi realizado, onde seis faixas de lajes foram ensaiadas sem qualquer tipo de reforço compósito (SL15-H/HS, SL30-H/HS e SL45-H/HS), formando o conjunto de lajes de referência, e onze faixas de laje (SL15s25-H/HS, SL15s50-H, SL30s25-H/HS, SL30s50-H/HS, SL45s25-H/HS e SL45s50-H/HS) foram reforçadas com laminados de CFRP inseridos no concreto de recobrimento segundo a técnica NSM. Para fins de validação, os resultados experimentais são comparados com os valores previstos pela análise efetuada com um programa de cálculo automático baseado no método dos elementos finitos (MEF). Por fim, um estudo paramétrico composto por 288 modelos numéricos foi realizado para investigar a influência da configuração de reforço e da percentagem de CFRP no incremento da capacidade de carga e da redistribuição de momentos em faixas de lajes reforçadas segundo a técnica NSM. Os programas experimental e numérico referentes às faixas de laje das séries SL15-H/HS são descritos e os resultados obtidos são apresentados e analisados neste trabalho.

Palavra-Chave: Lajes Contínuas de CA, Reforço à flexão, MEF, NSM, Redistribuição de momentos

Abstract

The experimental programs for the flexural strengthening of reinforced concrete (RC) structures using the Near Surface Mounted (NSM) technique with Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) laminates were, in general, conducted with simply supported beams. Therefore, there is a lack of experimental and theoretical studies on the moment redistribution of statically indeterminate RC elements strengthened with NSM technique. Thus, in order to assess the influence of the NSM CFRP flexural strengthening technique on the increase of the load carrying capacity and the moment redistribution capacity of continuous RC elements, an experimental composed of seventeen RC slab strips was carried out, in which six of the RC slabs were unstrengthened, forming a control set (SL15-H/HS, SL30-H/HS and SL45-H/HS), and eleven slabs (SL15s25-H/HS, SL15s50-H, SL30s25-H/HS, SL30s50-H/HS, SL45s25-H/HS and SL45s50-H/HS) were strengthened with CFRP laminates according to the NSM technique. Furthermore, for validation purposes, the experimental results are compared with values predicted by the analysis carried out using a FEM-based computer program. Finally, a parametric study composed of 288 numerical models is carried out to investigate the influence of the strengthening arrangement and CFRP percentage in terms of load carrying capacity and moment redistribution capacity of continuous RC slab strips flexurally strengthened by the NSM technique. The experimental and numerical programs concerns to the SL15-H/HS Series are described and the obtained results are presented and analyzed in this paper.

Keywords: Continuous RC slabs, Flexural strengthening, FEM, NSM, Moment Redistribution



1 Introdução

A investigação experimental da ductilidade e redistribuição de momentos em elementos contínuos reforçados com FRP (Fiber Reinforced Polymer, em língua inglesa) ainda é escassa. Assim, com os programas experimentais recentemente efetuados [BONALDO (2008), DALFRÉ (2013)], pretendeu-se dar um contributo para o conhecimento do comportamento de faixas de lajes contínuas de concreto armado (CA) reforçadas com laminados e CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer, em língua inglesa) aplicados segundo a técnica “Near Surface Mounted” (NSM). Por intermédio dos resultados experimentais obtidos, um programa de computador baseado no método dos elementos finitos (MEF) foi utilizado para prever o comportamento deste tipo de estruturas até ao seu colapso (DALFRÉ e BARROS, 2010). Uma vez validado, realizou-se um estudo paramétrico para avaliar a influência de alguns parâmetros que condicionam o incremento da capacidade de carga e de redistribuição de momentos, tais como a classe de resistência do concreto, a percentagem de armadura longitudinal existente, a configuração de reforço e a percentagem de CFRP. Os resultados mais significativos obtidos na investigação efetuada são apresentados no presente trabalho.

2 Programa Experimental

De forma a avaliar a influência da técnica de reforço NSM na redistribuição de momentos em elementos contínuos de CA, um programa experimental composto por dezessete faixas de laje com dois vãos e dimensões de $120 \times 375 \times 5875 \text{ mm}^3$ foi realizado (Figura 1a). Seis faixas de lajes foram ensaiadas sem qualquer tipo de reforço compósito (SL15-H/HS, SL30-H/HS e SL45-H/HS), e onze faixas de laje (SL15s25-H/HS, SL15s50-H, SL30s25-H/HS, SL30s50-H/HS, SL45s25-H/HS e SL45s50-H/HS) foram reforçadas com laminados de CFRP inseridos no concreto de cobertura segundo a técnica NSM. A notação adotada na identificação de cada laje é SL x sy-z, onde “x” é a percentagem prevista de redistribuição de momento (15%, 30% ou 45%), “y” é o incremento do momento negativo (25% ou 50%) e “z=H” ou “z=HS” indicam que a laje foi reforçada na região de momentos negativos (H; hogging, em língua inglesa) ou em ambas as regiões de momentos negativos/positivos (H e S; hogging e sagging, em língua inglesa), respetivamente. Devido à limitação de espaço, somente os resultados referentes as séries SL15H/HS serão apresentados. Detalhes das seções transversais das faixas de lajes são apresentadas na Figura 1, enquanto as Figuras 2 e 3 apresentam o posicionamento de LVDTs, a geometria, armadura longitudinal e detalhes do sistema de reforço das faixas de laje. Mais detalhes podem ser encontrados noutras publicações [BONALDO (2008); DALFRÉ (2013)].

3 Simulação do comportamento de lajes contínuas reforçadas à flexão com laminados de carbono aplicados segundo à técnica NSM

Com o objetivo de calibrar e validar os modelos numéricos procedeu-se à realização de simulações numéricas dos ensaios experimentais das faixas de laje previamente apresentadas. A simulação do comportamento das faixas de lajes ensaiadas foi realizada com o auxílio do programa “Femix”, baseado no método dos elementos finitos (MEF). Este programa inclui modelos constitutivos capazes de simular o início e propagação da fissuração do concreto, o comportamento não-linear de compressão do concreto, o comportamento elasto-plástico do aço e do comportamento elástico-linear dos laminados confede CFRP. De ANAIS DO 56º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2014 – 56CBC

acordo com o modelo numérico escolhido, a laje de concreto foi considerada como uma casca plana formulada sob a teoria de Reissner Mindlin (BARROS et al., 2007). Para a simulação do dano induzido pela fendilhação e pelo comportamento não-linear do concreto, o elemento de casca foi discretizado em 20 camadas, as quais foram consideradas em estado plano de tensão. Apenas se modelou metade da geometria nos modelos, procurando tirar partido das simetrias existentes. A descrição detalhada deste modelo pode ser encontrada em BARROS et al. (2008), onde se apresentam as condições de apoio e a malha utilizadas. Na Figura 4(a) apresenta-se a relação entre o deslocamento vertical a meio vão e a força aplicada obtida quer experimentalmente quer numericamente. Observa-se que a resposta numérica é próxima da experimental. O bom desempenho do modelo também é visível quando se comparam as tensões da armadura longitudinal de aço, como mostra a Figura 4(b). Mais detalhes podem ser encontrados noutras publicações [BONALDO (2008); DALFRÉ (2013)].

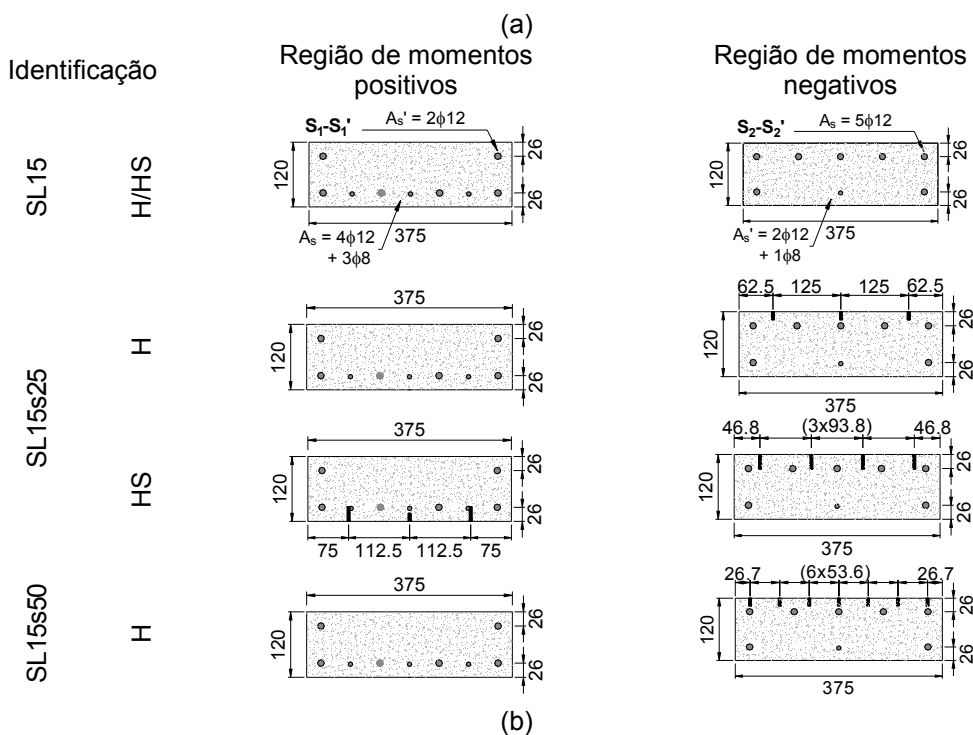
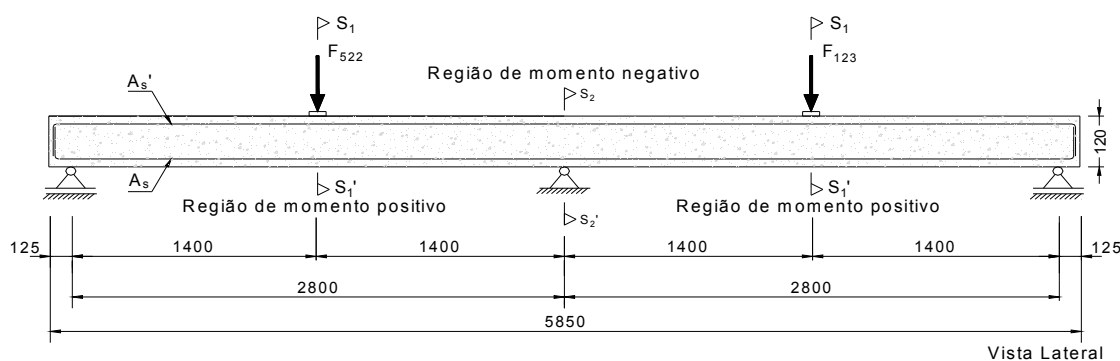


Figura 1 – (a) Características dos provetes ensaiados (A_s' - armadura de flexão alojada junto à face superior; A_s - armadura de flexão alojada junto à face inferior da laje e (b) Detalhes das séries SL15-H/HS (dimensões em mm).

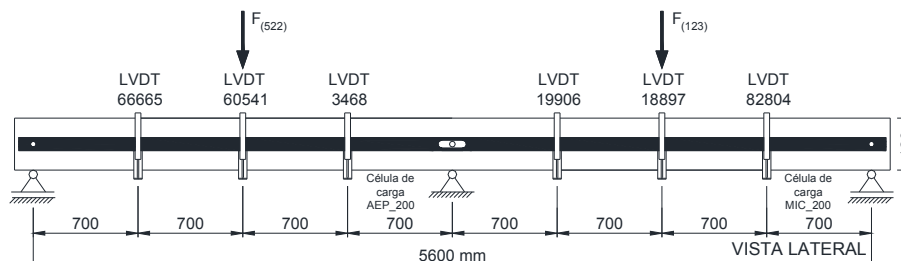


Figura 2 – Posicionamento de transdutores de deslocamento (LVDTs, dimensões em mm).

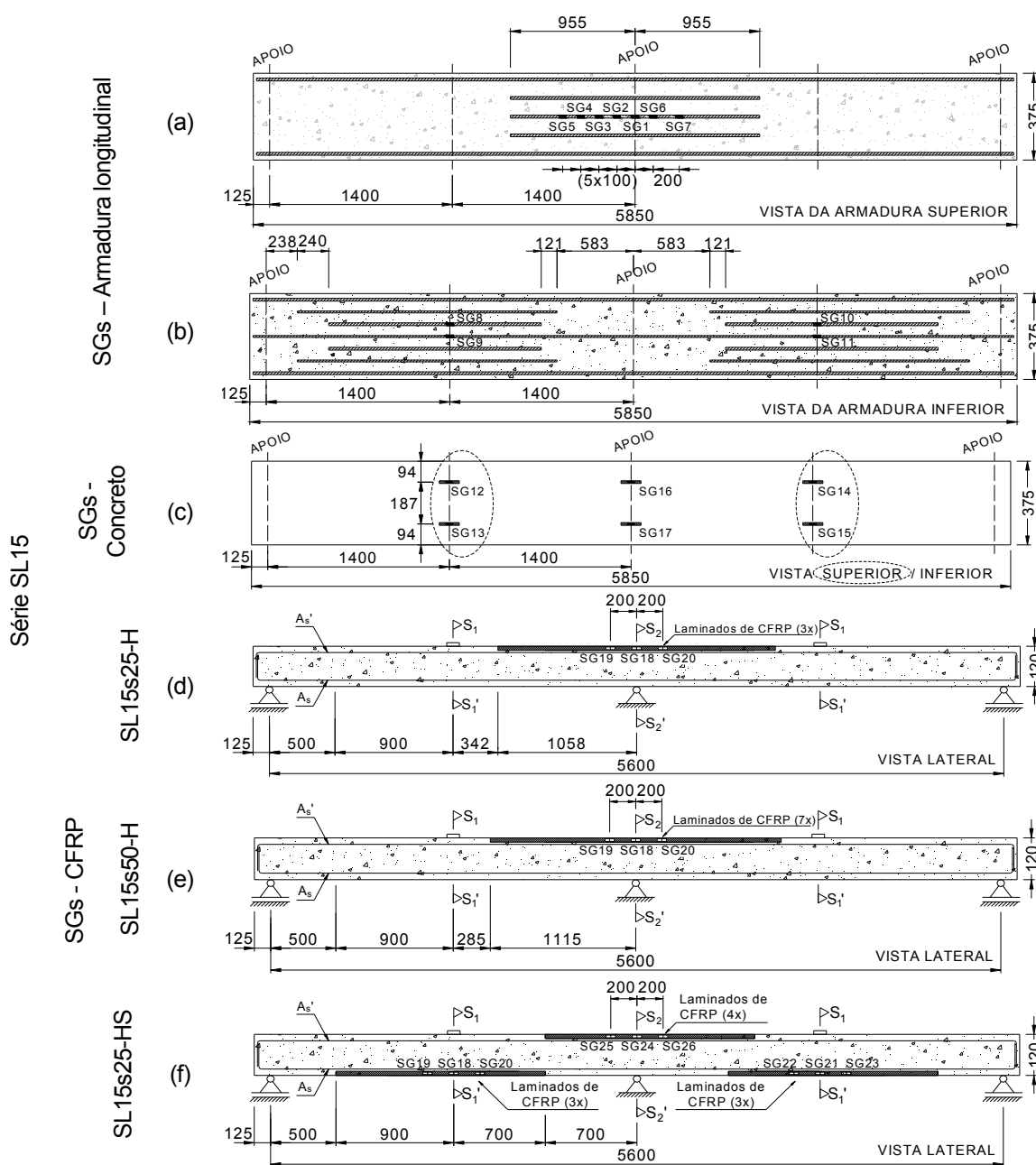


Figura 3 – Posicionamento de (a-b) extensômetros (SGs) nas armaduras longitudinais, (c) concreto, (d-f) laminados de CFRP para as faixas de laje reforçadas da série SL15 (dimensões em mm).

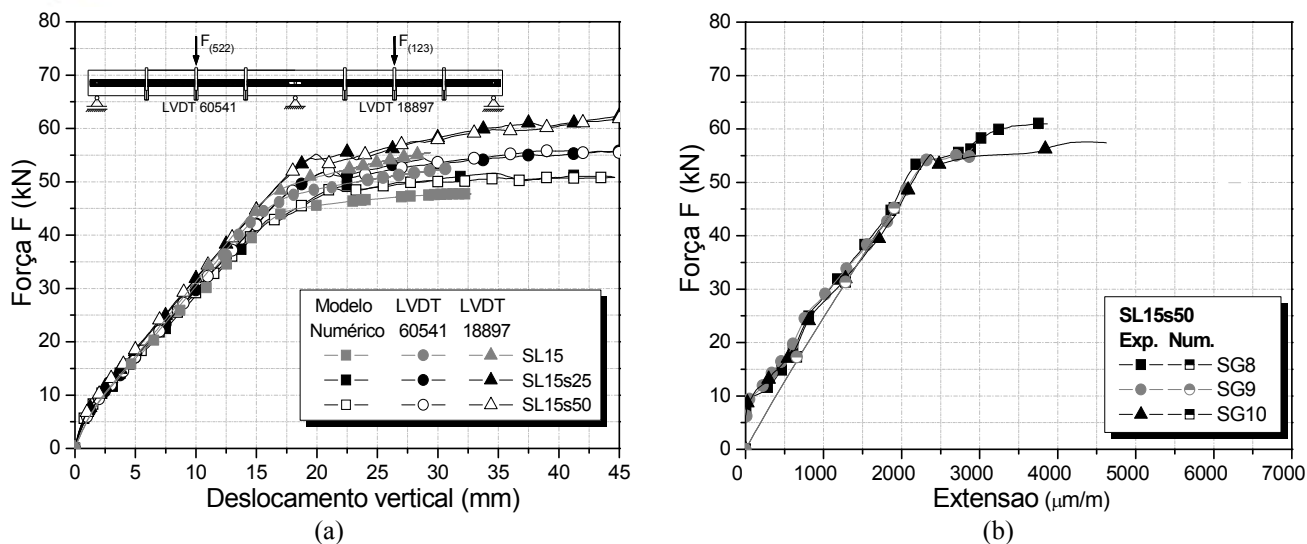


Figura 4 – Relações (a) Força vs. deslocamento vertical para a faixa de laje da Série SL15-H e (b) Força vs. extensões na armadura longitudinal da faixa de laje SL15s50-H.

4 Estudo paramétrico

Após a validação dos modelos numéricos, um estudo paramétrico foi realizado para avaliar a influência de determinados parâmetros no aumento da capacidade de carga e redistribuição de momentos, dentre eles: resistência à compressão do concreto, configurações de reforço, a percentagem de laminados de CFRP e a área de armadura longitudinal instalada nas regiões de momentos negativos e positivos. Os laminados de CFRP foram instalados de acordo com o arranjo apresentado na Figura 5 e Tabela 1. As faixas de lajes foram classificadas em três grupos de acordo com a configuração de reforço utilizada: (a) CFRPs aplicados na região de momentos negativos, (b) CFRPs aplicados na região de momentos positivos e (c) CFRPs aplicados em ambas as regiões de momentos positivos/negativos. A notação adotada na identificação de cada corpo-de-prova é SL_{v_w_x_y_z}, onde “SL” é faixa de laje, “v” é a percentagem prevista de redistribuição de momento (neste caso, 15%), “w” é a classe de resistência do concreto (C12/15, C25/30 e C35/45), “x” e “y” indicam a quantidade de laminados de CFRP aplicados na região de momentos positivos e negativos, respectivamente, e z indica a quantidade de armadura longitudinal utilizada na faixa de laje, onde 100 e 50% correspondem a mesma área de armadura longitudinal (A_s e A'_s) adotada no programa experimental (ver Figura 3a-b) e 50% corresponde a metade desta área ($0.5 A_s$ e $0.5 A'_s$). Assim, a faixa de laje SL15_30_4_2_50 deverá apresentar uma percentagem de redistribuição de momentos (η) igual a 15%, possui concreto com classe de resistência C25/30 (f_{ck} igual a 30 MPa em provetes cúbicos), possui 4 laminados na região de momentos positivos e 2 laminados na região de momentos negativos, respectivamente, e 50% da área de armadura longitudinal quando comparada a utilizada no programa experimental. No estudo paramétrico, as propriedades mecânicas (Tabela 2) adotadas para as classes de resistência do concreto (C12/15, C25/30 ou C35/45) analisadas neste trabalho foram determinadas seguindo as recomendações do EUROCODE 2 (2004) e CEB-FIP Model Code (1993). Os valores dos parâmetros adotados para simular o comportamento das barras de aço são apresentados na Tabela 3. Para as simulações numéricas, laminados de CFRP com

seção transversal de $1.4 \times 20\text{mm}^2$, com módulo de elasticidade de 165 GPa e extensão última de tração igual a 17.70 ‰, foram utilizados.

Tabela 1 – Resumo das configurações de reforço (ver Figura 5)

Classe de resistência do concreto	Número de laminados de CFRP		A_s e $A'_s = 100\%$			A_s e $A'_s = 50\%$		
			$\rho_{s,eq}^S$ (%)	$\rho_{s,eq}^H$ (%)	Identificação do modelo numérico	$\rho_{s,eq}^S$ (%)	$\rho_{s,eq}^H$ (%)	Identificação do modelo numérico
	S (a)	H (b)						
C12/15	0	0	1.71	1.60	SL15_15_0_0_100	0.86	0.80	SL15_15_0_0_50
	0	2	1.71	1.72	SL15_15_0_2_100	0.86	0.91	SL15_15_0_2_50
	0	4	1.71	1.83	SL15_15_0_4_100	0.86	1.03	SL15_15_0_4_50
	0	7	1.71	2.00	SL15_15_0_7_100	0.86	1.19	SL15_15_0_7_50
	2	0	1.82	1.60	SL15_15_2_0_100	0.97	0.80	SL15_15_2_0_50
	4	0	1.94	1.60	SL15_15_4_0_100	1.08	0.80	SL15_15_4_0_50
	7	0	2.10	1.60	SL15_15_7_0_100	1.25	0.80	SL15_15_7_0_50
	2	2	1.82	1.72	SL15_15_2_2_100	0.97	0.91	SL15_15_2_2_50
	2	4	1.82	1.83	SL15_15_2_4_100	0.97	1.03	SL15_15_2_4_50
	2	7	1.82	2.00	SL15_15_2_7_100	0.97	1.19	SL15_15_2_7_50
	4	2	1.94	1.72	SL15_15_4_2_100	1.08	0.91	SL15_15_4_2_50
	4	4	1.94	1.83	SL15_15_4_4_100	1.08	1.03	SL15_15_4_4_50
	4	7	1.94	2.00	SL15_15_4_7_100	1.08	1.19	SL15_15_4_7_50
	7	2	2.10	1.72	SL15_15_7_2_100	1.25	0.91	SL15_15_7_2_50
7	4	2.10	1.83	SL15_15_7_4_100	1.25	1.03	SL15_15_7_4_50	
7	7	2.10	2.00	SL15_15_7_7_100	1.25	1.19	SL15_15_7_7_50	
C25/30	0	0	1.71	1.60	SL15_30_0_0_100	0.86	0.80	SL15_30_0_0_50
	0	2	1.71	1.72	SL15_30_0_2_100	0.86	0.91	SL15_30_0_2_50
	0	4	1.71	1.83	SL15_30_0_4_100	0.86	1.03	SL15_30_0_4_50
	0	7	1.71	2.00	SL15_30_0_7_100	0.86	1.19	SL15_30_0_7_50
	2	0	1.82	1.60	SL15_30_2_0_100	0.97	0.80	SL15_30_2_0_50
	4	0	1.94	1.60	SL15_30_4_0_100	1.08	0.80	SL15_30_4_0_50
	7	0	2.10	1.60	SL15_30_7_0_100	1.25	0.80	SL15_30_7_0_50
	2	2	1.82	1.72	SL15_30_2_2_100	0.97	0.91	SL15_30_2_2_50
	2	4	1.82	1.83	SL15_30_2_4_100	0.97	1.03	SL15_30_2_4_50
	2	7	1.82	2.00	SL15_30_2_7_100	0.97	1.19	SL15_30_2_7_50
	4	2	1.94	1.72	SL15_30_4_2_100	1.08	0.91	SL15_30_4_2_50
	4	4	1.94	1.83	SL15_30_4_4_100	1.08	1.03	SL15_30_4_4_50
	4	7	1.94	2.00	SL15_30_4_7_100	1.08	1.19	SL15_30_4_7_50
	7	2	2.10	1.72	SL15_30_7_2_100	1.25	0.91	SL15_30_7_2_50
7	4	2.10	1.83	SL15_30_7_4_100	1.25	1.03	SL15_30_7_4_50	
7	7	2.10	2.00	SL15_30_7_7_100	1.25	1.19	SL15_30_7_7_50	
C35/45	0	0	1.71	1.60	SL15_45_0_0_100	0.86	0.80	SL15_45_0_0_50
	0	2	1.71	1.72	SL15_45_0_2_100	0.86	0.91	SL15_45_0_2_50
	0	4	1.71	1.83	SL15_45_0_4_100	0.86	1.03	SL15_45_0_4_50
	0	7	1.71	2.00	SL15_45_0_7_100	0.86	1.19	SL15_45_0_7_50
	2	0	1.82	1.60	SL15_45_2_0_100	0.97	0.80	SL15_45_2_0_50
	4	0	1.94	1.60	SL15_45_4_0_100	1.08	0.80	SL15_45_4_0_50
	7	0	2.10	1.60	SL15_45_7_0_100	1.25	0.80	SL15_45_7_0_50
	2	2	1.82	1.72	SL15_45_2_2_100	0.97	0.91	SL15_45_2_2_50
	2	4	1.82	1.83	SL15_45_2_4_100	0.97	1.03	SL15_45_2_4_50
	2	7	1.82	2.00	SL15_45_2_7_100	0.97	1.19	SL15_45_2_7_50
	4	2	1.94	1.72	SL15_45_4_2_100	1.08	0.91	SL15_45_4_2_50
	4	4	1.94	1.83	SL15_45_4_4_100	1.08	1.03	SL15_45_4_4_50
	4	7	1.94	2.00	SL15_45_4_7_100	1.08	1.19	SL15_45_4_7_50
	7	2	2.10	1.72	SL15_45_7_2_100	1.25	0.91	SL15_45_7_2_50
7	4	2.10	1.83	SL15_45_7_4_100	1.25	1.03	SL15_45_7_4_50	
7	7	2.10	2.00	SL15_45_7_7_100	1.25	1.19	SL15_45_7_7_50	

Tabela 2 – Propriedades mecânicas do concreto utilizadas no estudo paramétrico

Parâmetro	C12/15	C25/30	C35/45
Valor médio da tensão de rotura do concreto à compressão	$f_{cm} = 20 \text{ N/mm}^2$	$f_{cm} = 33 \text{ N/mm}^2$	$f_{cm} = 43 \text{ N/mm}^2$
Módulo de elasticidade	$E_c = 22.95 \text{ N/mm}^2$	$E_c = 26.40 \text{ N/mm}^2$	$E_c = 28.90 \text{ N/mm}^2$
Coefficiente de Poisson	$\nu_c = 0.15$		
Extensão do concreto à compressão correspondente à tensão máxima	$\epsilon_{c1} = 1.80 \times 10^{-3}$	$\epsilon_{c1} = 2.10 \times 10^{-3}$	$\epsilon_{c1} = 2.25 \times 10^{-3}$
Diagrama trilinear de 'tension-softening'	$f_{ct} = 1.05 \text{ N/mm}^2$ $G_f = 0.041 \text{ N/mm}$	$f_{ct} = 1.71 \text{ N/mm}^2$ $G_f = 0.058 \text{ N/mm}$	$f_{ct} = 2.14 \text{ N/mm}^2$ $G_f = 0.07 \text{ N/mm}$
	$\xi_1 = 0.015; \alpha_1 = 0.6; \xi_2 = 0.2; \alpha_2 = 0.25$		
Parâmetro que define a energia de modo I de fratura disponível para a nova fenda	2		
Fator de retenção para o corte	$p_1 = 2$		
Largura da banda de fendilhação	Raiz quadrada da área de influência do ponto de integração de Gauss		
Ângulo para formação de nova fenda (Sena-Cruz 2004)	$\alpha_{th} = 30^\circ$		
Número máximo de fendas por ponto de integração	2		

Tabela 3 – Valores dos parâmetros utilizados no modelo constitutivo do aço.

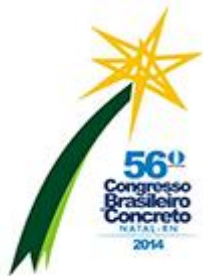
Diâmetro do varão	$P_1(\epsilon_{sy}[-]; \sigma_{sy}[\text{MPa}])$	$P_2(\epsilon_{sh}[-]; \sigma_{sh}[\text{MPa}])$	$P_3(\epsilon_{su}[-]; \sigma_{su}[\text{MPa}])$	$E_s [\text{GPa}]$
Ø 8mm	(1.90×10^{-3} ; 379.16)	(4.42×10^{-2} ; 512.19)	(8.85×10^{-2} ; 541.66)	200.80
Ø 10mm	(2.32×10^{-3} ; 413.20)	(3.07×10^{-2} ; 434.75)	(1.31×10^{-1} ; 546.25)	178.24
Ø 12mm	(2.09×10^{-3} ; 414.35)	(3.05×10^{-2} ; 435.63)	(1.02×10^{-1} ; 537.98)	198.36

4.1 Apresentação e análise dos resultados

Os resultados obtidos no estudo paramétrico serão apresentados e discutidos de forma a focar os seguintes aspetos: eficácia do reforço de CFRP e da área de armadura longitudinal em termos de capacidade de carga e redistribuição de momentos. Nas simulações numéricas, os valores foram registados assumindo as seguintes condições de ruptura: (a) quando as extensões de compressão na superfície do concreto atingiram o valor de 3.5 ‰ na região de momentos positivos; quando a extensão efetiva, ϵ_{fd} , foi atingida no laminado de CFRP na região de momentos negativos ou positivos. Segundo a norma ACI 440 (2008), para aplicações segundo à técnica NSM, $\epsilon_{fd} = 0.7\epsilon_{fu}$, onde ϵ_{fu} corresponde a extensão última de tração axial do laminado de CFRP.

4.1.1 Coeficiente de capacidade de carga

A Figura 6 e a Tabela 7 apresentam a influência de $\rho_{s,eq}^H$ e $\rho_{s,eq}^S$ no coeficiente de capacidade de carga (λ), o qual é definido como a razão entre a carga de rotura das faixas de laje reforçadas ($F_{u,CFRP}$) e da laje de referência ($F_{u,ref}$), $\lambda = F_{u,CFRP} / F_{u,ref}$. Nesta figura, a taxa de armadura longitudinal equivalente é dada por



$\rho_{s,eq} = (A_s) / (bd_s) + (A_f E_f / E_s) / (bd_f)$, onde A_s é a área de armadura longitudinal, b é a largura da seção analisada, d_s e d_f representam a distância da armadura de tração e do reforço à fibra mais comprimida da seção, respectivamente, A_f é a área do reforço, E_s e E_f são os módulos de elasticidade da armadura de tração e do sistema compósito, respectivamente. A análise dos resultados permite constatar que a presença dos laminados de CFRP no reforço a flexão, independente do arranjo do reforço, proporcionou um aumento da capacidade de carga das faixas de laje. Além disso, percebe-se um maior incremento da capacidade de cargas nas faixas de laje com menor área de armadura longitudinal ($A_s = 50\%$). Para as lajes reforçadas na região de momentos negativos, o incremento da capacidade de carga varia entre 6 e 19% e 12 e 34% para as faixas de laje com armadura equivalente a 100% ou 50% de armadura longitudinal (A_s) utilizada no programa experimental, respectivamente. Estas constatações confirmam o que já tinha sido observado na análise dos resultados experimentais obtidos por BONALDO (2008). Nas faixas reforçadas na região de momentos positivos, um incremento máximo igual a 67% e 151% foi obtido para A_s igual a 100% e 50%, respectivamente. O maior incremento da capacidade de carga das faixas de laje foi obtido quando ambas as regiões de momentos negativos/positivos foram reforçadas. Neste caso, λ varia entre 1.25 a 2.08 e 1.63 a 3.34 para A_s igual a 100% e 50%, respectivamente. A Tabela 4 e a Figura 5 também mostram que λ aumenta com o aumento da classe de resistência do concreto, e que este aumento é mais pronunciado quando as faixas de laje são reforçadas em ambas as regiões de momentos negativos/positivos. Entretanto, o modo de ruptura das faixas de laje pode afetar o incremento da capacidade de carga, principalmente nos casos em que os laminados de CFRP alcançaram a extensão efetiva antes de ser atingido o esmagamento do concreto (casos representados por círculos nas Figuras 5 e 6).

4.1.2 Coeficiente de redistribuição de momentos

O coeficiente de redistribuição de momentos (MRI) é definido como a razão entre η de uma faixa de laje reforçada (η_{CFRP}) e da laje de referência (η_{ref}), onde η é a percentagem de redistribuição de momento. A Figura 6 apresenta as relações $MRI - \rho_{s,eq}^S$ e $MRI - \rho_{s,eq}^H$, enquanto a Tabela 7 inclui um resumo com os valores obtidos nas simulações numéricas. Observa-se que a redistribuição de momentos é dependente do arranjo do reforço. Nas faixas de laje reforçadas na região de momentos negativos, η_{CFRP} é menor que η_{ref} . Para as faixas de laje reforçadas na região de momentos positivos, $MRI > 1.0$, o que significa que as faixas de lajes reforçadas possuem maior capacidade de redistribuição de momentos que as lajes de referência. Além disso, percebe-se que as faixas de lajes com A_s igual a 50% apresentam maior capacidade de redistribuição de momentos. Entretanto, com o aumento da percentagem de laminados na região de momentos negativos, ocorre a diminuição da redistribuição de momentos. A Tabela 7 ainda mostra que MRI diminuiu com o aumento da classe de resistência do concreto nas faixas de laje reforçadas na região de momentos negativos, enquanto há um aumento de MRI nas faixas de laje reforçadas na região de momentos positivos. No caso das faixas de laje reforçadas em ambas as regiões de momentos

negativos/positivos, o aumento da classe de resistência do concreto conduz a diminuição de MRI . A Figura 7 apresenta a relação entre MRI e $\rho_{s,eq}^S / \rho_{s,eq}^H$. Para $\rho_{s,eq}^S / \rho_{s,eq}^H > 1.10$, a redistribuição de momentos é positiva.

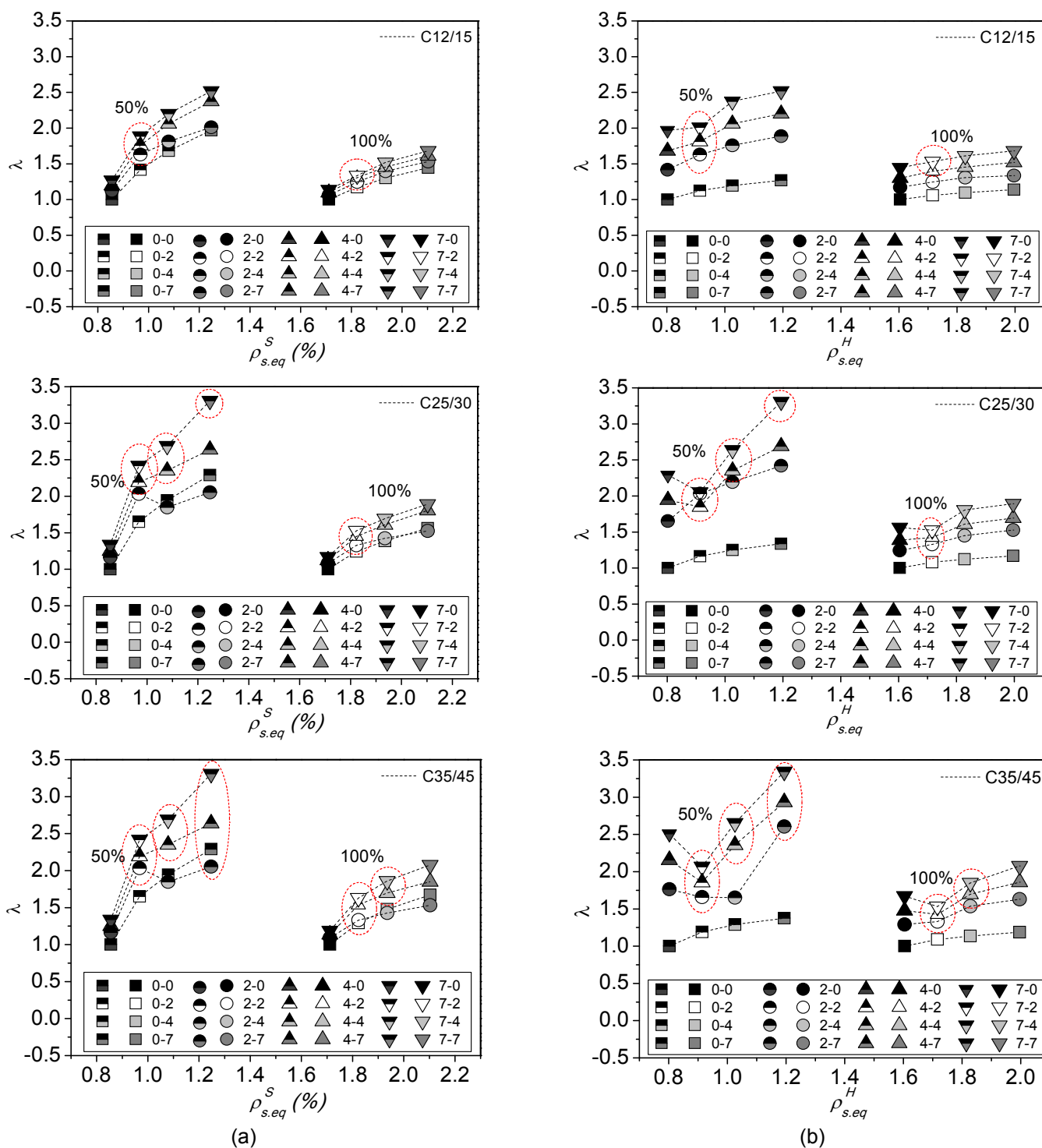


Figura 5 – Relação entre o coeficiente de capacidade de carga, λ , e a taxa de laminados de CFRP/armadura longitudinal equivalente nas regiões de momentos positivos (S) e negativos (H).

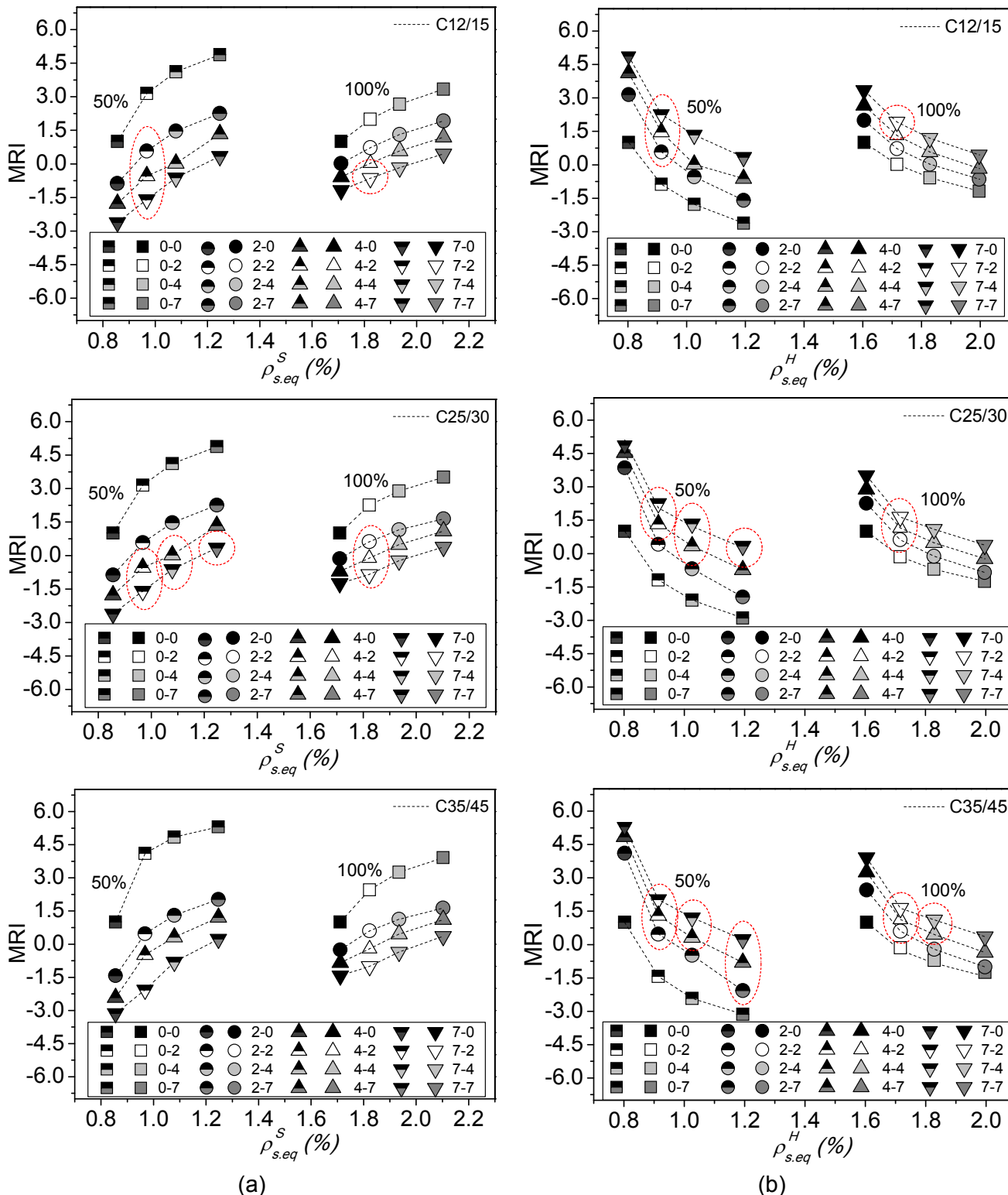


Figura 7 – Relação entre o coeficiente de redistribuição de momentos, MRI, e a taxa de laminados de CFRP/ armadura longitudinal equivalente nas regiões de momentos positivos (S) e negativos (H).

Tabela 4 – Coeficientes de capacidade de carga (λ) e redistribuição de momentos (MRI) – Estudo paramétrico.

Faixa de Laje	$A_s \text{ e } A'_s = 100\%$						$A_s \text{ e } A'_s = 50\%$					
	C12/15		C25/30		C35/45		C12/15		C25/30		C35/45	
	λ	MRI	λ	MRI	λ	MRI	λ	MRI	λ	MRI	λ	MRI
Referência	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
SL15_0_2	1.06	0.02	1.08	-0.14	1.09	-0.26	1.12	-0.87	1.16	-1.18	1.19	-1.43
SL15_0_4	1.10	-0.58	1.12	-0.71	1.14	-0.84	1.20	-1.78	1.25	-2.09	1.29	-2.42
SL15_0_7	1.14	-1.18	1.17	-1.25	1.19	-1.43	1.27	-2.62	1.34	-2.89	1.37	-3.13
SL15_2_0	1.17	2.00	1.24	2.26	1.29	2.45	1.42	3.15	1.65	3.85	1.76	4.10
SL15_2_2	1.25	0.72	1.33	0.62	1.33	0.60	1.63	0.58	2.03	0.42	1.66	0.47
SL15_2_4	1.31	0.03	1.45	-0.12	1.54	-0.21	1.76	-0.54	2.19	-0.68	1.65	-0.48
SL15_2_7	1.33	-0.65	1.53	-0.84	1.63	-1.01	1.89	-1.59	2.42	-1.96	2.60	-2.07
SL15_4_0	1.30	2.67	1.39	2.88	1.48	3.25	1.68	4.11	1.94	4.53	2.16	4.85
SL15_4_2	1.40	1.32	1.42	1.15	1.43	1.13	1.81	1.47	1.85	1.33	1.86	1.31
SL15_4_4	1.45	0.58	1.61	0.49	1.70	0.46	2.06	0.02	2.35	0.34	2.36	0.32
SL15_4_7	1.52	-0.17	1.69	-0.23	1.86	-0.35	2.20	-0.62	2.69	-0.73	2.93	-0.80
SL15_7_0	1.44	3.33	1.56	3.51	1.67	3.91	1.97	4.88	2.29	5.11	2.51	5.31
SL15_7_2	1.53	1.92	1.52	1.64	1.53	1.64	2.01	2.25	2.05	2.05	2.07	2.03
SL15_7_4	1.61	1.19	1.80	1.09	1.85	1.11	2.37	1.34	2.64	1.22	2.65	1.21
SL15_7_7	1.68	0.45	1.89	0.38	2.08	0.36	2.52	0.34	3.31	0.26	3.34	0.23

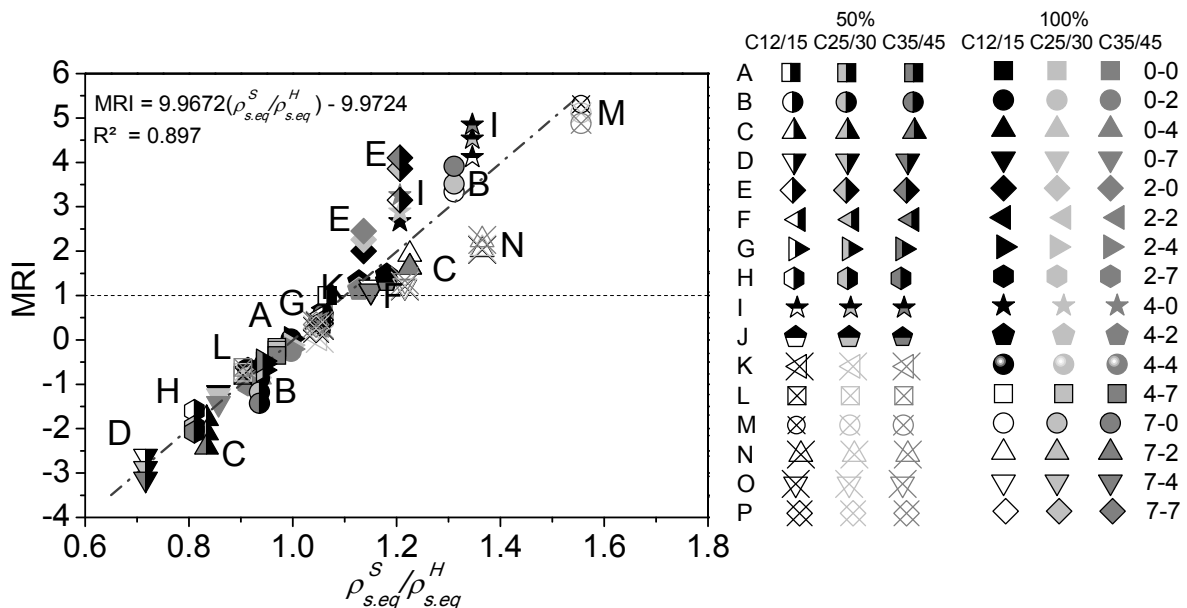


Figura 7 – Relação entre o coeficiente de redistribuição de momentos e $\rho_{s,eq}^S / \rho_{s,eq}^H$.

5 Conclusões

A investigação numérica descrita neste trabalho teve como objetivo avaliar o incremento da capacidade de carga e a capacidade de redistribuição de momentos quando se utiliza a técnica NSM para o reforço à flexão de faixas de laje de concreto armado por inserção de laminados de CFRP em finos entalhes efetuados no concreto de recobrimento. O estudo paramétrico que foi realizado permitiu verificar que a técnica NSM é bastante eficaz no aumento da capacidade de carga, desde que aplicada corretamente. A presença dos laminados de CFRP garante o



incremento da capacidade de carga nas faixas de laje, mas este incremento é mais pronunciado com o aumento de laminados na região de momentos positivos ($\rho_{s,eq}^S$) e em faixas de laje com menor quantidade de armadura longitudinal. De fato, os modelos armados com A_s igual a 50% em comparação as faixas de lajes ensaiadas nos programas experimentais realizados por BONALDO (2008) e DALFRÉ (2013), e reforçados nas regiões de momentos negativos e positivos, apresentaram um incremento da capacidade de carga que varia entre 63% a 234%. As faixas de laje reforçadas na região de momentos positivos mostraram incrementos de 42% a 151%. Finalmente, os laminados de CFRP aplicados na região de momentos negativos apresentaram incremento máximo da capacidade de carga de 37%. Além disso, comprovou-se que com a adoção de um sistema de reforço adequadamente projetado, níveis satisfatórios de redistribuição de momento podem ser atingidos até ao colapso das estruturas contínuas reforçadas com laminados de CFRP. Verificou-se que a redistribuição de momentos apresenta valores positivos para $\rho_{s,eq}^S / \rho_{s,eq}^H > 1.10$.

6 Agradecimentos

O primeiro autor manifesta também o seu agradecimento ao apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - Brasil, bolsa GDE 200953/2007-9. O quarto autor manifesta o seu agradecimento a Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA) pela bolsa de Iniciação Científica concedida para a realização da pesquisa.

7 Referências

ACI Committee 440, **Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R-08)**, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI; 2008.

BARROS, J.A.O.; PEREIRA, E.N.B.; GOUVEIA, A.V.; AZEVEDO, A.F.M. **Numerical simulation of thin steel fiber self-compacting concrete structures**, ACI 435/544 Fall 2007 Puerto Rico Session 1: Deflection and stiffness issues in FRC and thin structural elements (Structural Implications and Material Properties), in CD, 25 pages; 2007.

BARROS, J.A.O.; DALFRÉ, G.M.; DIAS, J.P. **Numerical Simulation of Continuous RC Slabs Strengthened using NSM Technique**, Proceedings of 2nd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, Cape Town, South Africa, November; 2008.

BONALDO, E. **Composite materials and discrete steel fibres for the strengthening of thin concrete structures**, PhD Thesis, University of Minho, Guimarães, Portugal; 2008.

CEB-FIP Model Code 1990. **Design Code**. Thomas Telford, Lausanne, Switzerland; 1993.



Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2014
Outubro / 2014

@ 2014 - IBRACON - ISSN 2175-8182



DALFRÉ, G.; BARROS, J. **Reforço à flexão de faixas de lajes contínuas utilizando laminados de carbono aplicados segundo a técnica NSM**, Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto (CBC2010); 2010.

DALFRÉ, G.M., **Flexural and shear strengthening of RC elements**, PhD Thesis, University of Minho, Portugal, 2013.

EN 1992-1-1, **Eurocode 2: Design of Concrete Structures-Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings**. CEN, Brussels, December; 2004.

SENA-CRUZ, J. M. **Strengthening of concrete structures with near-surface mounted CFRP laminate strips**. PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Minho, Portugal; 2004.