



Reforço à flexão de faixas de lajes contínuas utilizando laminados de carbono aplicados segundo a técnica NSM

Flexural Strengthening of continuous RC slab strips using NSM CFRP laminates

Gláucia Dalfré (1); Joaquim Barros(2)

(1) MSc, Doutoranda em Engenharia de Estruturas, ISISE - Universidade do Minho

(2) Professor Associado, ISISE - Universidade do Minho
Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães Portugal

Resumo

Um programa experimental foi realizado para avaliar a eficácia da técnica “Near Surface Mounted” (NSM) para reforço à flexão de elementos contínuos de betão armado (BA), em termos de capacidade de carga, redistribuição de momentos e ductilidade. O programa experimental é composto por três séries com três faixas de laje de dois tramos iguais, e tem por objectivo verificar a possibilidade de aumentar a resistência aos momentos negativos (na região do apoio central) em 25% e 50%, mantendo níveis de redistribuição de momentos de 15%, 30% e 45%.

Além disso, para fins de validação, os resultados experimentais são comparados com os valores previstos pela análise efectuada com um programa de cálculo automático baseado no método dos elementos finitos. Por fim, é proposta uma estratégia eficaz de reforço à flexão, capaz de aumentar a capacidade resistente das lajes e mantendo elevados níveis de redistribuição de momentos.

Palavra-Chave: Lajes Contínuas de BA, Reforço à flexão, CFRP, NSM, Redistribuição de Momentos

Abstract

An experimental program was carried out to assess the effectiveness of the near surface mounted (NSM) technique for the flexural strengthening of continuous reinforced concrete (RC) slabs, in terms of load carrying, moment redistribution and ductility capacities. The experimental program is composed of three series of three slab strips of two equal span length, in order to verify the possibility of increasing the negative (at the intermediate support region) resisting bending moment in 25% and 50% and maintaining moment redistribution levels of 15%, 30% and 45%. 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 high effective NSM flexural strengthening strategy is proposed, capable of enhancing the slab's load carrying capacity and maintaining high levels of moment redistribution.

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



1 Introdução

A técnica de reforço de elementos de Betão Armado (BA) baseada na inserção de laminados de fibras de carbono (CFRP) em finos entalhes efectuados no betão de recobrimento, designada na literatura internacional por “Near Surface Mounted” (NSM), vem ganhando cada vez mais o interesse de profissionais, engenheiros e investigadores interessados na reabilitação de estruturas. A eficácia desta técnica de reforço à flexão de estruturas de BA foi comprovada por diversos estudos experimentais, teóricos e numéricos (Blaschko e Zilch 1999, Nanni et al. 2004, El-Hacha e Rizkalla 2004, Barros e Fortes 2005, Kotynia 2006, Bonaldo et al. 2008), que contribuíram de forma decisiva na divulgação da NSM entre as comunidades técnico-científicas ligadas ao reforço de estruturas de betão, ilustrando as suas inúmeras vantagens em comparação com as técnicas convencionais.

Embora a utilização de FRP para fins de reforço seja um campo em amplo crescimento e que apresenta benefícios em certas aplicações, a sua utilização acarreta alguns inconvenientes, tais como a rotura violenta dos laminados devido ao seu comportamento elástico-linear e a diminuição, ou até mesmo extinção, da ductilidade, comprometendo assim a capacidade de redistribuição de momentos das estruturas após o seu reforço (Arduini et al. 1997, Casadei et al. 2003).

Estudos preliminares sobre a redistribuição de momentos em elementos reforçados com laminados de carbono aplicados segundo a NSM indicam que níveis significativos de redistribuição foram atingidos em comparação com a técnica mais corrente, a EBR (acrónimo para Externally Bonded Reinforcement) (Liu et al. 2006). Ashour et al. (2004) realizou um programa experimental com dezasseis vigas com diferentes arranjos de armadura longitudinal e reforço externo, o qual foi aplicado nas regiões de momento negativo e positivo. Todas as vigas reforçadas apresentaram incrementos na capacidade de carga, mas também redução da ductilidade quando comparada com as vigas de controlo.

Recentemente, Bonaldo (2008) realizou um programa experimental para avaliar a capacidade de redistribuição de momentos em faixas de lajes de BA com dois vãos reforçadas com laminados de fibras de carbono aplicadas segundo a técnica NSM. Apesar do aumento da resistência à flexão das secções ter excedido os valores previstos (25% e 50%), a redistribuição de momentos foi relativamente baixa, e o aumento da capacidade de carga das lajes reforçadas ficou limitado a 21%.

No presente trabalho, o programa experimental realizado por Bonaldo (2008) é analisado em profundidade, a fim de avaliar as possibilidades e os desafios da técnica NSM em termos de eficácia do reforço à flexão e redistribuição de momentos em faixas de lajes contínuas de BA. Utilizando os resultados obtidos no programa experimental, o desempenho de um modelo numérico implementado em um programa de computador baseado no método dos elementos finitos (MEF) foi avaliado. Com a ajuda deste software, uma estratégia eficaz de reforço à flexão é proposta, capaz de aumentar capacidade de carga da laje e garantir elevados níveis de redistribuição de momentos.

2 Programa Experimental

De forma a avaliar a influência da técnica de reforço NSM na redistribuição de momentos em elementos contínuos de BA, um programa experimental composto por nove faixas de laje com dois vãos e dimensões de $120 \times 375 \times 5875 \text{ mm}^3$ foi realizado (Figura 1a). Três faixas de lajes foram ensaiadas sem qualquer tipo de reforço compósito (SL15, SL30 e SL45), formando o trio de lajes de referência, e seis faixas de laje (SL15s25, SL15s50, SL30s25, SL30s50, SL45s25 e SL45s50) foram reforçadas com laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento segundo à técnica NSM (Figura 1b a 1e). A notação adoptada na identificação de cada provete é SLxsy, onde x é a percentagem prevista de redistribuição de momento (15%, 30% ou 45%) e “y” é o incremento do momento negativo (25% ou 50%).

2.1 Configuração de ensaio e instrumentação

Na Figura 1(a) são apresentadas as condições de carregamento e de apoio dos modelos de faixas de laje, enquanto a instrumentação utilizada nos ensaios está indicada na Figura 2. Os deslocamentos verticais foram medidos por intermédio de seis transdutores de deslocamento (LVDTs) posicionados ao longo do comprimento dos provetes [ver Figura 2(a)]. Os ensaios foram controlados por intermédio dos dois LVDTs (60541 e 18897), posicionados na secção de aplicação da carga, tendo-se utilizado uma velocidade de deslocamento de $20 \mu\text{m/s}$ até se registar uma flecha central de 50 mm. Após este deslocamento o controlo passou a ser efectuado pelo transdutor interno do actuador à velocidade de $25 \mu\text{m/s}$ até ao final do ensaio. A força total aplicada foi medida com recurso a células de carga com capacidade máxima de carga de 200 kN e 0,5% de precisão. Para registar as extensões na armadura longitudinal, nos laminados de CFRP e no betão utilizaram-se extensómetros eléctricos (SGs) dispostos segundo as configurações ilustradas nas Figura 2(b) a 2(f). Dez extensómetros [Figuras 2(b-c)] foram instalados na armadura longitudinal, sendo sete na região de momento negativo (SG1 a SG7) e três nas regiões de momento positivo (SG8 a SG10). Seis extensómetros [Figura 2(d)] foram colados em faces de betão de modo a controlar as extensões de compressão, sendo quatro destes colados na região de aplicação da carga (SG11 a SG14) e os restantes dois na região do apoio central (SG15 e SG16). Finalmente, três extensómetros foram instalados em um dos laminados de CFRP [SG17 a SG19, Figura 2(e) e 2(f)] de modo a avaliar as extensões desenvolvidas ao longo do reforço.

2.1 Propriedades dos materiais

As Tabelas 1 e 2 apresentam um resumo dos resultados obtidos na caracterização dos materiais utilizados no programa experimental. Mais detalhes podem ser encontrados noutra publicação (Bonaldo, 2008).

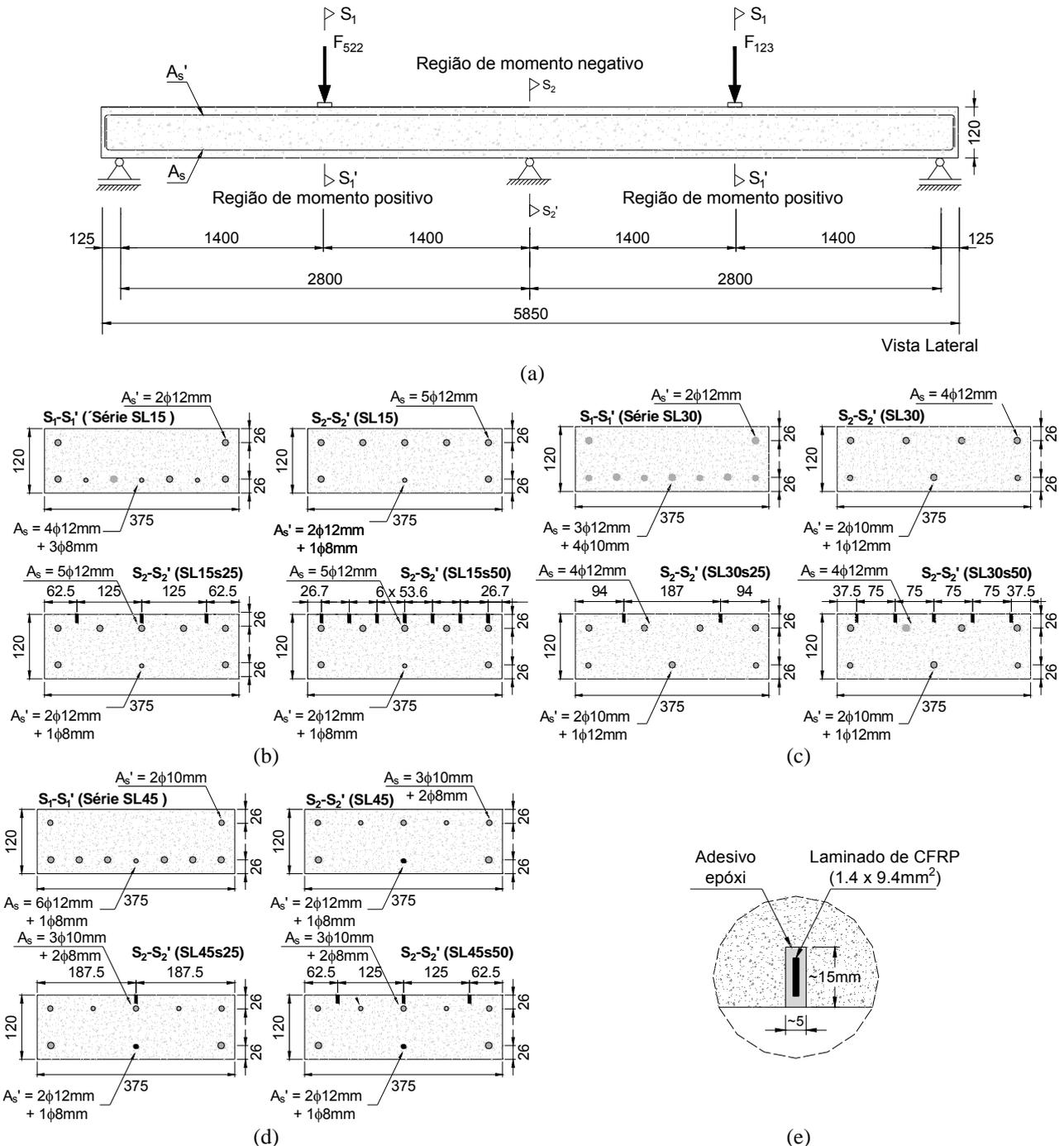


Figura 1 – Características dos provetes ensaiados: (a) armadura longitudinal; sistema de reforço e detalhes das series (b) SL15, (c) SL30, e (d) SL45; (e) geometria do entalhe e do laminado de CFRP (A_s' - armadura de flexão alojada junto à face superior; A_s - armadura de flexão alojada junto à face inferior da laje; dimensões em mm).

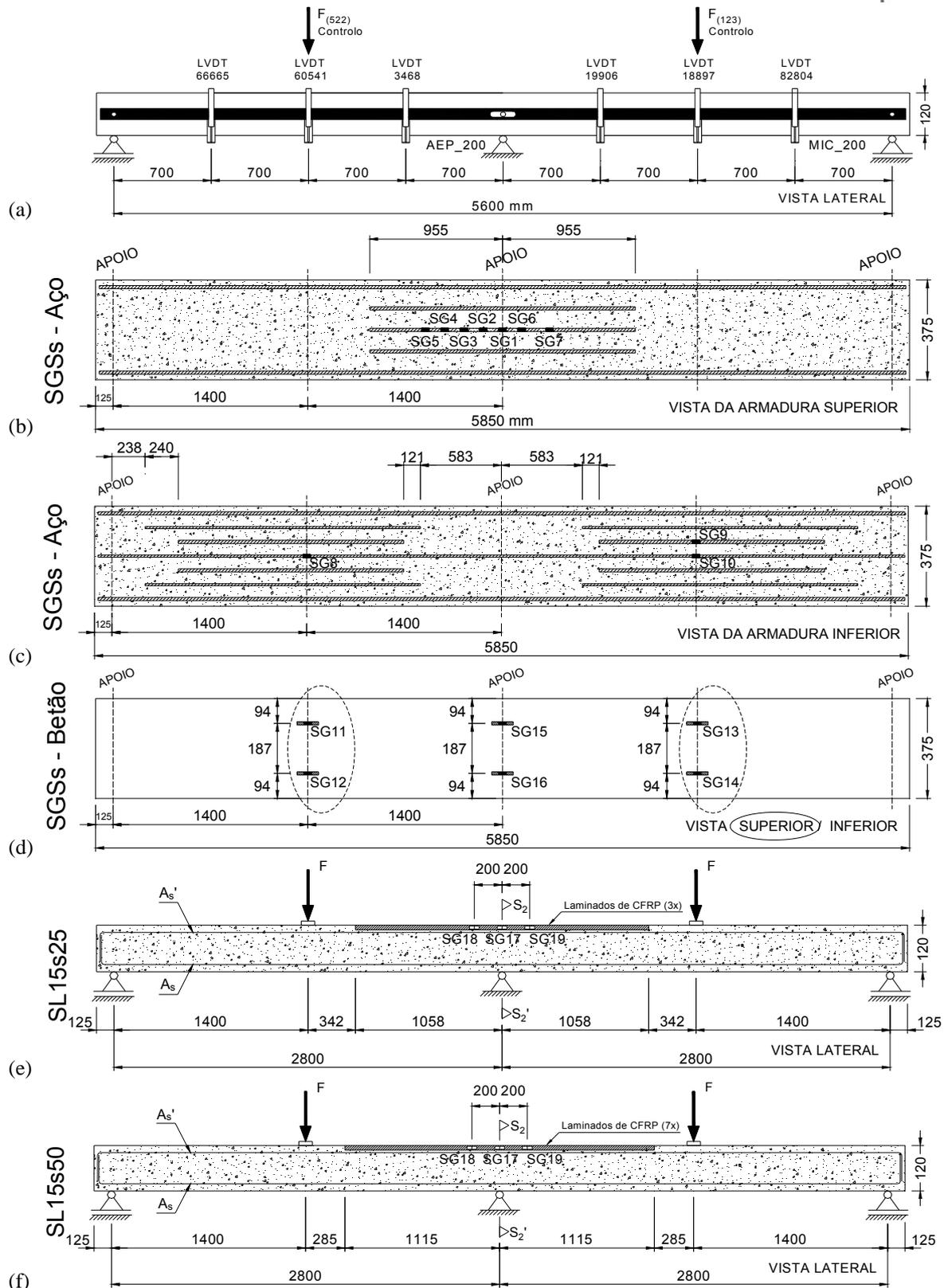


Figura 2 – Posicionamento de (a) LVDTs, (b-c) extensômetros nas armaduras longitudinais, (d) betão, (e-f) laminados de CFRP para as duas faixas de laje reforçada da série SL15 (dimensões em mm).

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do betão e armadura longitudinal.

Betão			Armadura longitudinal				
Séries	$f_{cm} - 28$ dias (MPa)	$f_{cm} - \text{À data do ensaio}$ (MPa)	Diâmetro (mm)	Módulo de Elasticidade (kN/mm ²)	Tensão de cedência (0.2 %) (N/mm ²)	Extensão na tensão de cedência	Tensão última (N/mm ²)
SL15	40.07 (0.59)	44.38 (1.06) [126]	8	200.80 (4.69) {2.33%}	421.35 (2.25) {0.53%}	0.0023 (0.0001) {2.65%}	578.75 (2.09) {0.36%}
SL30	35.99 (0.51)	44.91 (1.33) [105]	10	178.24 (4.42) {2.48%}	446.95 (14.55) {3.26%}	0.0027 (0.0000) {0.45%}	575.95 (1.94) {0.34%}
SL45	41.41 (0.22)	49.29 (1.76) [204]	12	198.36 (5.49) {2.77%}	442.47 (12.68) {2.87%}	0.0024 (0.0000) {0.19%}	539.88 (9.93) {1.84%}

(valor) Desvio-padrão

{valor} Coeficiente de Variação (COV) = (Desvio-padrão/Média) × 100

[valor] Idade à data do ensaio em dias

Tabela 2 – Propriedades mecânicas dos laminados de CFRP.

Laminados com altura igual a 10 mm		
Tensão última (N/mm ²)	Extensão última (%)	Módulo de Elasticidade (kN/mm ²)
2867.63 (88.10) {3.07%}	17.67 (0.54) {3.04%}	159.30 (5.01) {3.15%}

(valor) Desvio-padrão

{valor} Coeficiente de Variação (COV) = (Desvio-padrão/Média) × 100

2.2 Apresentação e análise dos resultados

Nesta secção apresentam-se, para cada modelo, os principais resultados obtidos no programa experimental efectuado com as faixas de laje das séries SL15, SL30 e SL45. Nas Figuras 3 a 5 apresentam-se as curvas força versus deslocamento vertical na secção solicitada [ver Figura 1(a)]. A Tabela 3 inclui o incremento do momento negativo esperado (ΔM_{alvo}^-) e o obtido experimentalmente (ΔM_{exp}^-), onde \bar{F}_{max} é a média das forças totais aplicadas a meio vão da faixa de laje e $\bar{R}_{L, \bar{F}_{max}}$ e $\bar{R}_{C, \bar{F}_{max}}$ são as reacções registadas no apoio lateral e central, respectivamente, quando atingida a \bar{F}_{max} . Foi verificado que, embora o incremento do momento negativo tenha excedido os valores inicialmente propostos, um aumento médio de 8% e 16% da capacidade de carga foi proporcionado pelo sistema de reforço para as lajes ensaiadas das séries onde se pretendia um aumento de 25 e 50%, respectivamente (ver valores apresentados na terceira coluna da tabela 3). Este facto pode ser justificado pela análise dos gráficos apresentados nas Figuras 3 a 5 e pelos valores da Tabela 4. Nesta tabela, para cada faixa de laje, são apresentados os momentos flectores nas regiões de aplicação do carregamento ($M_{Estatico}^+$) e apoio intermédio ($M_{Estatico}^-$), obtidos por equilíbrio estático, a correspondente variação do momento negativo (ΔM^-) e da força aplicada (ΔF), a força total ($F=50.82 \text{ kN} + \Delta F$),

momentos positivo (M_{Rd}^+ , na secção S1-S1') e negativo (M_{Rd}^- , na secção S2-S2'), calculados segundo as recomendações do ACI 440.

No que diz respeito à série SL15, para assegurar o incremento de 25% e 50% do momento negativo, o sistema de reforço deveria promover um aumento da capacidade de carga em 12.71kN e 25.41kN respectivamente, levando em consideração os valores de momentos positivos iguais a 30.29 e 36.35 kN.m (ver Figura 6). Entretanto, de acordo com o arranjo das armaduras longitudinais da secção S1-S1' [Figuras 1(b) e 1(c)], o momento resistente da secção é igual a 25.16 kN.m, o que significa que a contribuição dos laminados no incremento de força é igual a:

$$\left[\frac{50.82[kN] + \Delta F[kN]}{2} + \frac{22.68[kN.m] + 6.44[kN.m]}{2.8[m]} \right] \times 1.4[m] = 25.16[kN.m] \Rightarrow \Delta F = 5.92 kN$$

o que corresponde a um incremento de 12% no caso da laje SL15s25, similar ao valor obtido experimentalmente. Efectuando-se uma análise similar para a faixa de laje SL15s50,

$$\left[\frac{50.82[kN] + \Delta F[kN]}{2} + \frac{22.68[kN.m] + 11.01[kN.m]}{2.8[m]} \right] \times 1.4[m] = 25.16[kN.m] \Rightarrow \Delta F = 9.19 kN$$

o que corresponde a um incremento de 18%, também similar ao valor obtido experimentalmente (21%). No caso das faixas de laje SL30s25 e SL30s50, o sistema de reforço promoveu um aumento de 10% e 16% na capacidade de carga dos elementos, semelhantes aos obtidos experimentalmente. Finalmente, no caso das lajes SL45s25 e SL45s50, incrementos na capacidade de carga de 9% e 12% foram estimados, enquanto os valores experimentais demonstram aumentos de 4% e 10%, respectivamente.

Sendo assim, para se assegurar um aumento significativo da capacidade de carga, o sistema de reforço também deve ser aplicado na região de momentos positivos (zona de aplicação da carga).

A Figura 7 apresenta a relação entre a força média aplicada e a percentagem de redistribuição momento, η , para a Série SL15. É visível que, após a força de fendilhação (\bar{F}_{fend}) a redistribuição de momento diminuiu até a formação da rótula plástica na região de momento negativo (\bar{F}_y^{Neg}), seguido por um aumento de η até a formação de rótulas plásticas nas regiões de momentos positivos (\bar{F}_y^{Pos}). A diminuição de η deve-se à diminuição da rigidez causada pela formação e propagação de fissuras nesta zona.

Quando a rótula plástica se forma na região de momento negativo, a consequente perda de rigidez força a migração dos momentos negativos para as regiões de momentos positivos resultando no aumento de η .

O gráfico da Figura 7 mostra também a redução de η com o aumento da percentagem de laminados de CFRP. Na formação da rótula plástica na região de momentos positivos os seguintes valores de η foram obtidos: 18.8%, 4.6%, -1.8% para SL15, SL15s25, SL15s50; 38.4%, 26.0%, 18.7% para SL30, SL30s25, SL30s50; 52.9%, 42.9%, 35.7% para SL45, SL45s25, SL45s50. Quando as extensões na superfície do betão atingiram o valor de 3.5 ‰ na região de aplicação da força, os seguintes valores foram obtidos: 17.5%, -3.9%, -14.8% para SL15, SL15s25, SL15s50; 36.4%, 25.3%, 14.92% para SL30, SL30s25, SL30s50; 53.0%, 42.8%, 30.8% para SL45, SL45s25, SL45s50.

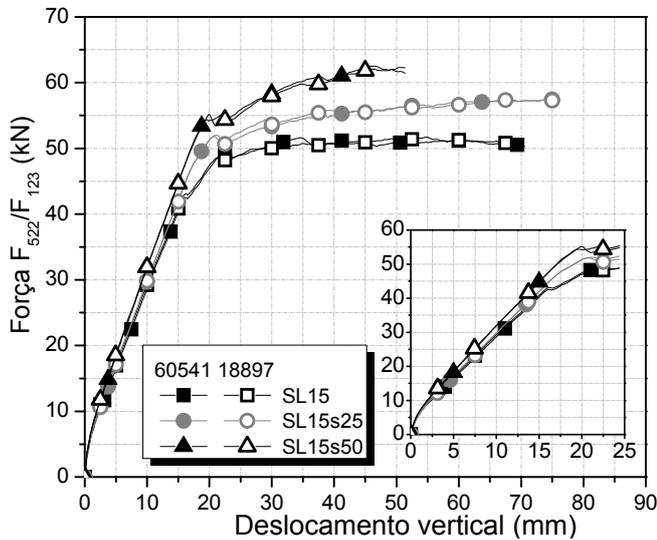


Figura 3 – Força vs. deslocamento – Série SL15.

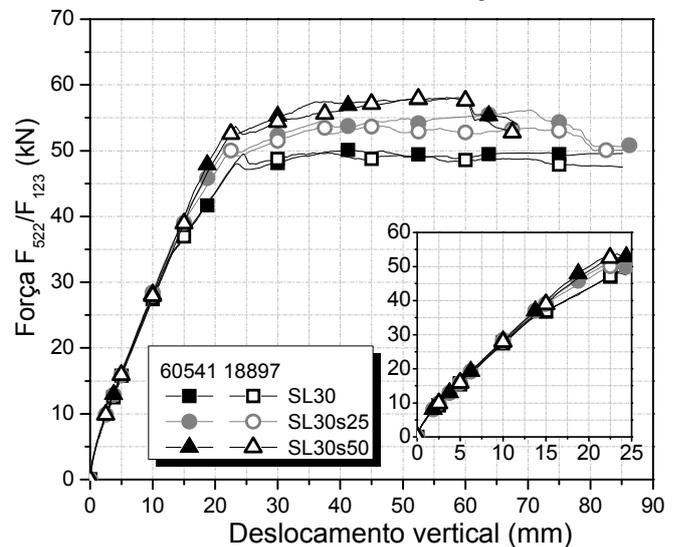


Figura 4 – Força vs. deslocamento – Série SL30.

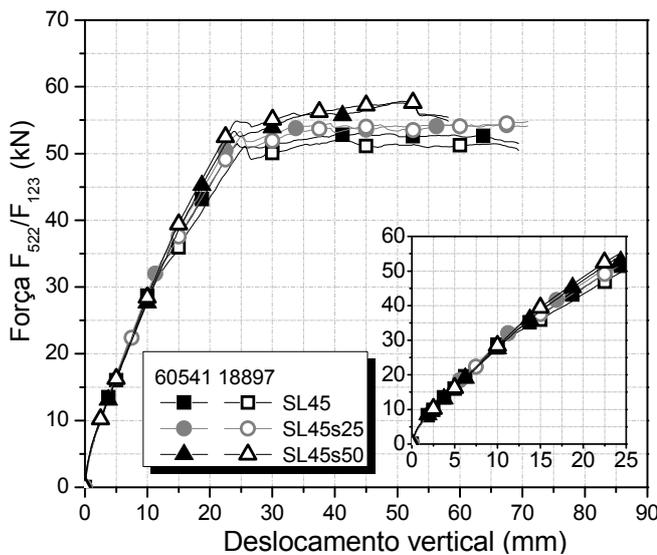


Figura 5 – Força vs. deslocamento – Série SL45.

Tabela 3 – Resultados do programa experimental.

Faixas de laje	ΔM_{alvo}^- (%)	\bar{F}_{max} (kN)	$\bar{R}_{L, \bar{F}_{max}}$ (kN)	$\bar{R}_{C, \bar{F}_{max}}$ (kN)	ΔM_{Exp}^- (kN.m)
SL15	-	51.36	17.66	67.39	22.46
SL15s25	25	57.60 (12.15%)	16.70	81.80	33.88 (50.84%)
SL15s50	50	62.36 (21.42%)	17.46	89.79	38.42 (71.06%)
SL30	-	49.84	19.12	61.44	16.24
SL30s25	25	54.87 (10.09%)	18.92	71.91	23.84 (46.80%)
SL30s50	50	58.09 (16.55%)	18.74	78.70	28.85 (77.64%)
SL45	-	52.55	21.63	61.85	13.01
SL45s25	25	54.49 (3.69%)	20.94	67.10	17.65 (35.66%)
SL45s50	50	57.79 (9.97%)	20.82	73.94	22.61 (73.79%)

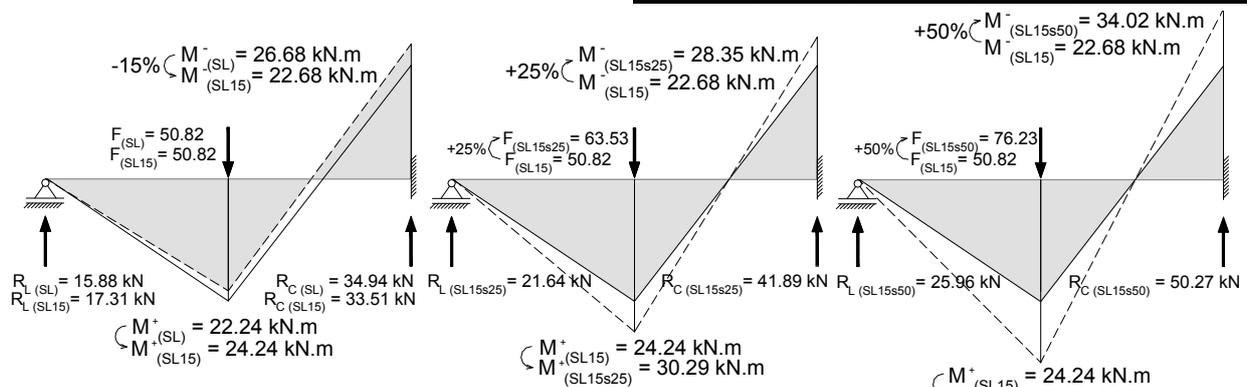


Figura 6 – Diagramas de momentos elásticos da Série SL15: (a) SL15, (b) SL15s25 e (c) SL15s50.

Tabela 4 – Distribuição elástica de momentos e a correspondente variação da força aplicada nas lajes ensaiadas.

Faixas de laje	$M_{Estatico}^+$ (kN.m)	$M_{Estatico}^-$ (kN.m)	ΔM^- (kN.m)	ΔF (kN)	F (kN)	M_{Rd}^+ (kN.m)	M_{Rd}^- ⁽¹⁾ (kN.m)	ΔM_{Rd}^- ⁽²⁾ (kN.m)	$M_{Rd,N}^+$ ⁽³⁾ (kN.m)
SL	22.24	26.68	-----	-----	50.82	-----	-----	-----	-----
SL15	24.24	22.68	-----	-----	50.82	25.16	-----	-----	25.16
SL15s25	30.29	28.35	5.67	12.71	63.53	25.16	29.12	6.44	33.56
SL15s50	36.35	34.02	11.34	25.41	76.23	25.16	33.69	11.01	39.61
SL30	26.23	18.68	-----	-----	50.82	26.97	-----	-----	26.97
SL30s25	32.79	23.35	4.67	12.71	63.53	26.97	24.38	5.70	34.65
SL30s50	39.35	28.02	9.34	25.41	76.23	26.97	29.05	10.37	40.42
SL45	28.23	14.68	-----	-----	50.82	29.60	-----	-----	29.60
SL45s25	35.29	18.35	3.67	12.70	63.53	29.60	18.56	3.88	36.34
SL45s50	42.35	22.02	7.34	25.41	76.23	29.60	21.18	6.50	41.66

⁽¹⁾ Com base em formulação proposta pela norma ACI 440; ⁽²⁾ $\Delta M_{Rd}^- = M_{Rd}^- - M_{Estatico}^-$; ⁽³⁾ lajes com reforço na região de momentos positivos.

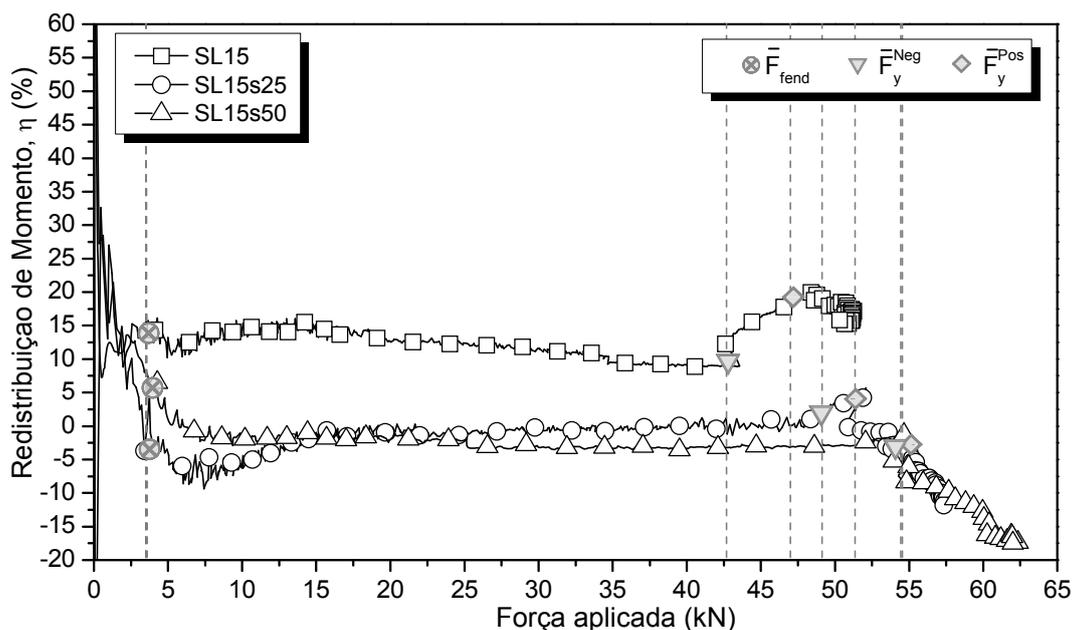


Figura 7 – Percentagem de redistribuição de momento, η , para as lajes da série SL15.

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

Com o objectivo de calibrar e validar os modelos numéricos, procedeu-se à realização de simulações numéricas dos ensaios experimentais previamente apresentados. 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 betão, o comportamento não-linear de compressão do betão, o comportamento elasto-plástico do aço e do comportamento elástico-linear dos laminados de CFRP. De acordo com o

modelo numérico escolhido, a laje de betão 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 betão, 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 8(a) apresenta-se a relação entre o deslocamento 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 e betão, como mostram as Figuras 8(b) a 8(d).

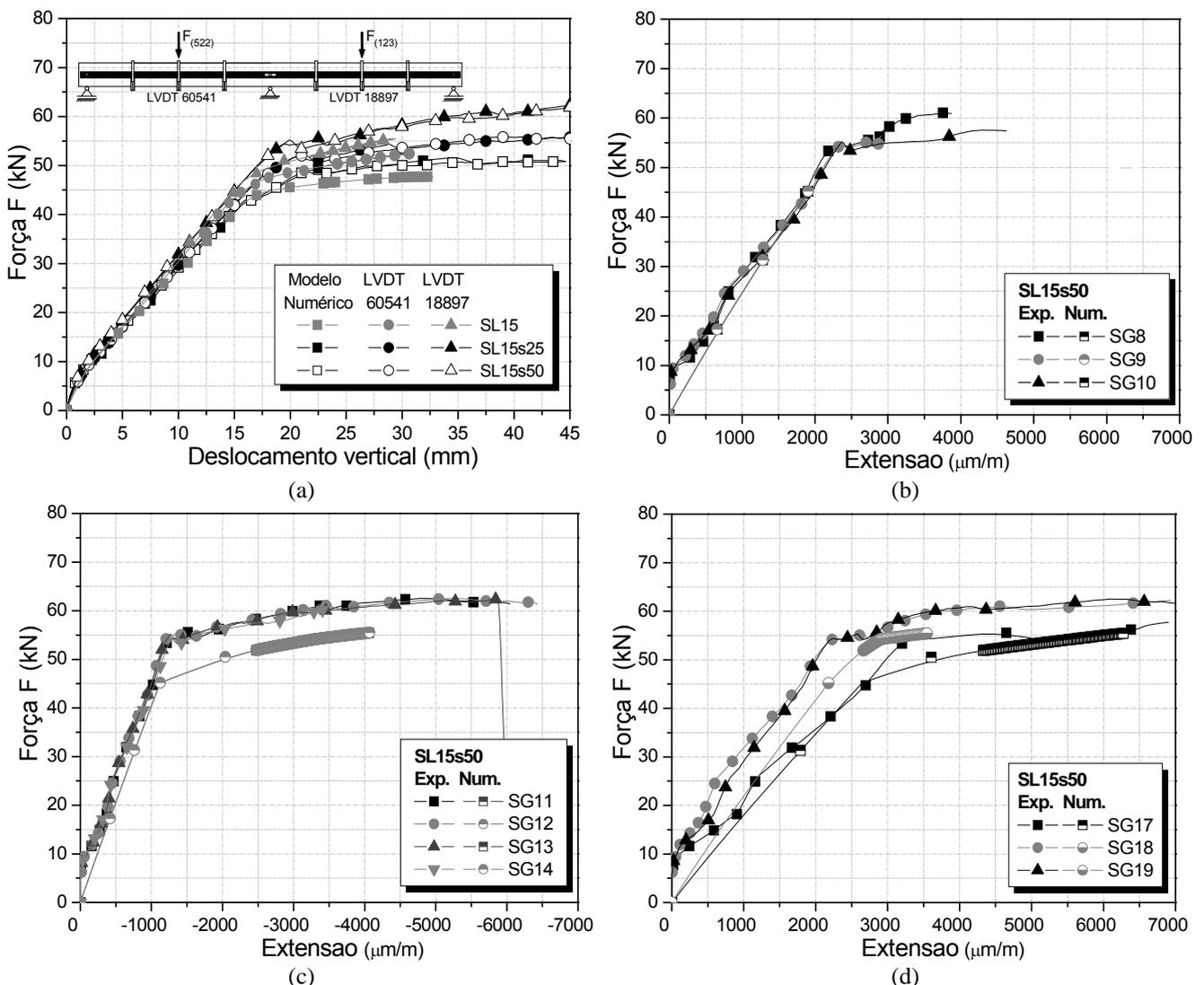


Figura 8 – Relações Força vs. deslocamento vertical/extensões para faixas de laje da Série SL15(a) e SL15s50(b).

4 OPTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE REFORÇO

4.1 Arranjo do sistema de reforço

Após a validação dos modelos numéricos, uma nova configuração para o sistema de reforço, visando o aumento da capacidade de carga e redistribuição de momentos, foi proposta, onde também são instalados laminados de CFRP nas regiões de aplicação da força (momentos positivos). Utilizando as recomendações do ACI 440 (2007), as configurações ilustradas na Figura 9 para as secções carregadas foram concebidas, e os laminados de CFRP foram instalados de acordo com o arranjo apresentado na Figura 10. O comprimento total dos laminados nas regiões de momento positivo variou de 1080 a 1460 mm, centrado na secção de aplicação da carga. A disposição da armadura longitudinal e o posicionamento dos laminados na região de momentos negativos são as mesmas adoptadas nas lajes apresentadas no programa experimental anteriormente exposto. Neste caso, o momento positivo ($M_{Rd,N}^+$) considerado no dimensionamento do sistema de reforço preenche os requisitos impostos na última coluna da Tabela 4.

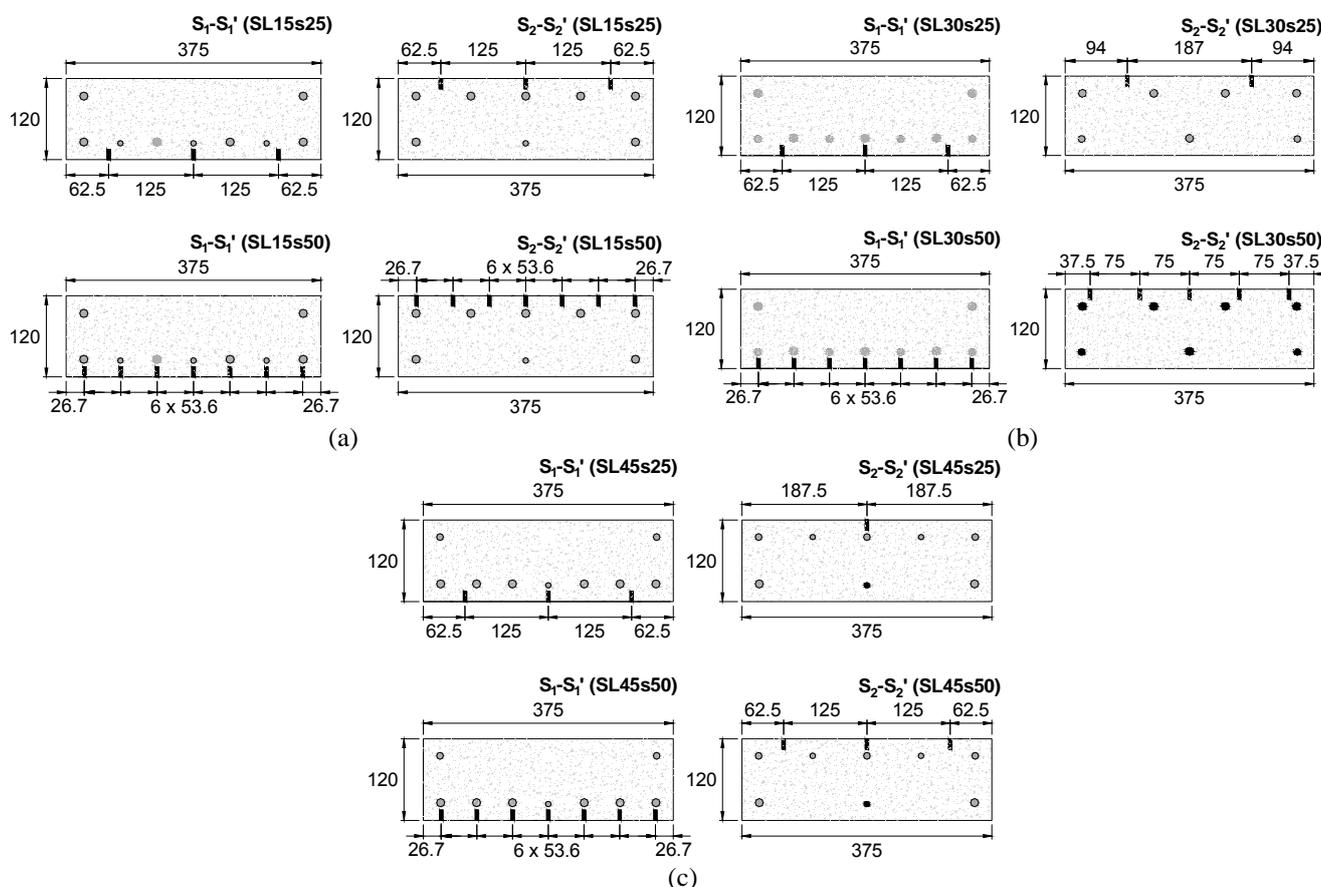


Figura 9 – Características do sistema de reforço das series (a) SL15, (b) SL30 e (c) SL45.

4.2 Simulações numéricas

Para a simulação do comportamento das lajes reforçadas com laminados de CFRP quer na secção de momentos positivos quer na de negativos, foram utilizadas propriedades semelhantes às adoptadas nos modelos constitutivos para as simulações das lajes testadas experimentalmente. Com base no trabalho desenvolvido por Stevens (1987), que considera, em secções fendilhadas, que a armadura longitudinal tem instalada uma tensão superior à tensão média desenvolvida entre fissuras, e tendo em conta os valores médios de tensões e extensões obtidos nos ensaios experimentais, factores de redução das propriedades do aço foram aplicados e posteriormente introduzidos nos modelos numéricos:

$$\sigma_{ced} = \sigma_{ced}^{exp} - 3\Delta\sigma_{ycrit}; \sigma_u = \sigma_u^{exp} - \Delta\sigma_{ycrit}; \Delta\sigma_{ycr} = (75 / \phi_s) f_{ct} \quad (\text{Equação 1})$$

onde σ_{ced} e σ_u são os valores registados experimentalmente para a tensão de cedência e tensão última do aço, respectivamente, f_{ct} é a tensão de tracção no betão em MPa e ϕ_s é o diâmetro do varão (ou diâmetro equivalente) em mm.

A malha de elementos finitos e as condições de apoio e de carregamento mantiveram-se idênticas às das simulações do programa experimental.

A relação entre a força aplicada e a deformação a meio vão nas secções carregadas para as três séries de faixas de laje são apresentadas na Figura 11. É possível perceber que o reforço, quando aplicado nas regiões de momentos positivos e negativos, é muito eficaz em termos de aumento da capacidade de carga em todas as faixas de lajes simuladas.

A Tabela 5 apresenta um resumo dos resultados numéricos no momento de formação da rótula plástica na região de momentos positivos (na secção de carregamento, S1-S1').

Nesta tabela F_y é a força no momento de formação da rótula plástica, ε_s é a extensão da armadura longitudinal, F força registada quando as extensões de compressão na superfície do betão atingiram o valor de 3.5 ‰, ΔF incremento da força e $\rho_{l,eq}$ é a percentagem de armadura equivalente, calculada por meio da Equação 2. Nesta equação, A_s é a área de armadura longitudinal, b é a largura da secção analisada, d_s e d_f representam a distância da armadura de tracção e do reforço à fibra mais comprimida da secção, respectivamente, A_f é a área do reforço, E_s e E_f são os módulos de elasticidade da armadura de tracção e do sistema compósito, respectivamente.

$$\rho_{l,eq} = \frac{A_s}{bd_s} + \frac{E_f}{E_s} \frac{A_f}{bd_f} \quad (\text{Equação 2})$$

No momento da cedência da armadura longitudinal em S1-S1' o aumento percentual da capacidade de carga fornecida pelo sistema de reforço à flexão utilizado foi o seguinte: 13% e 25% para SL15s25 e SL15s50, 12% e 24% para SL30s25 e SL30s50; 11% e 24% para SL45s25 e SL45s50. Quando as extensões na superfície do betão atingiram o valor de 3.5 ‰, o aumento da capacidade de carga fornecida pelo reforço à flexão foi: 39% e 71% para SL15s25 e SL15s50 35% e 65% para SL30s25 e SL30s50; 27% e 54% para SL45s25 e SL45s50. Estes valores revelam que o aumento em termos de incremento da capacidade de carga foi atingido.

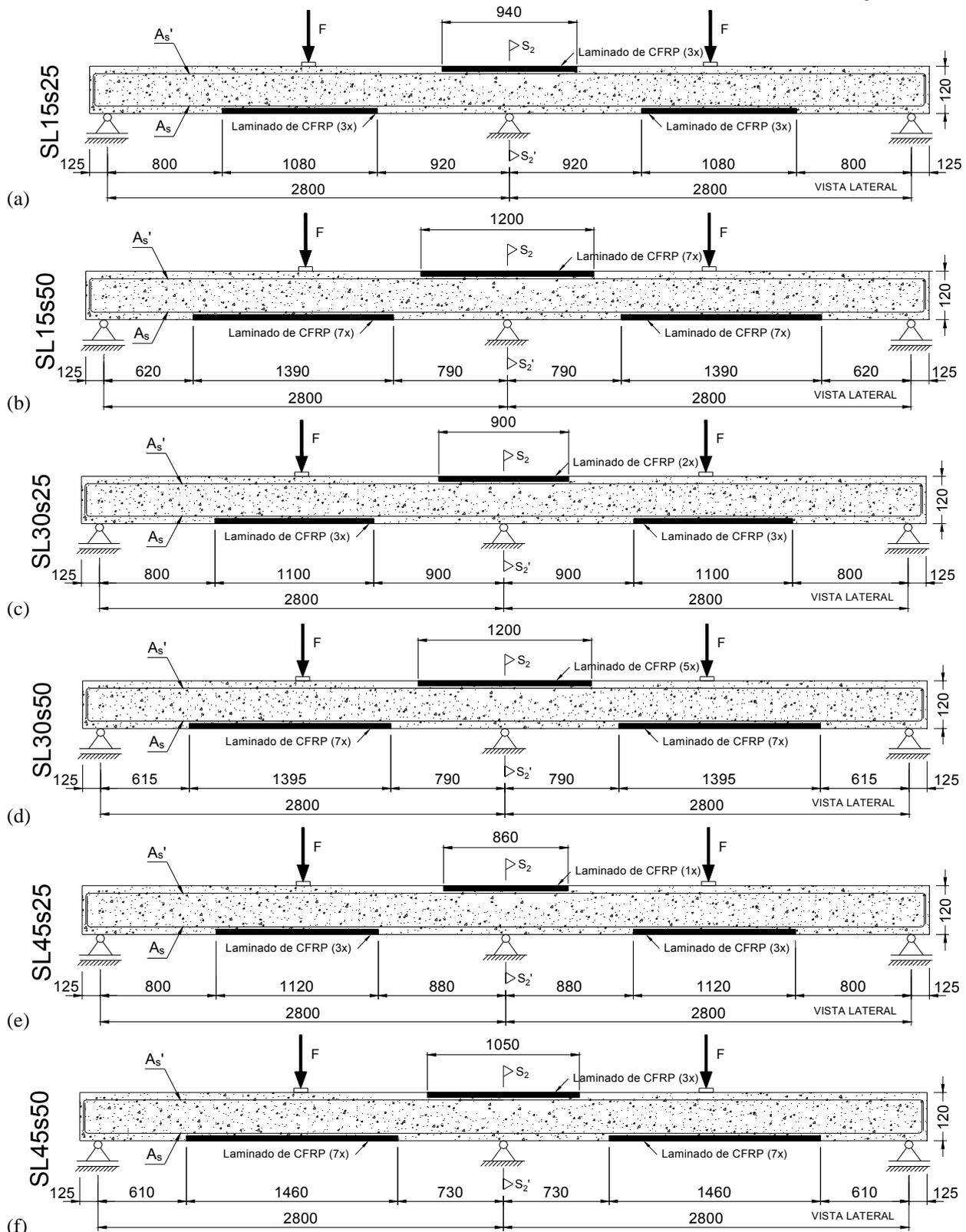


Figura 10 – Posicionamento dos laminados de CFRP nas faixas de laje analisadas numericamente (dimensões em mm).

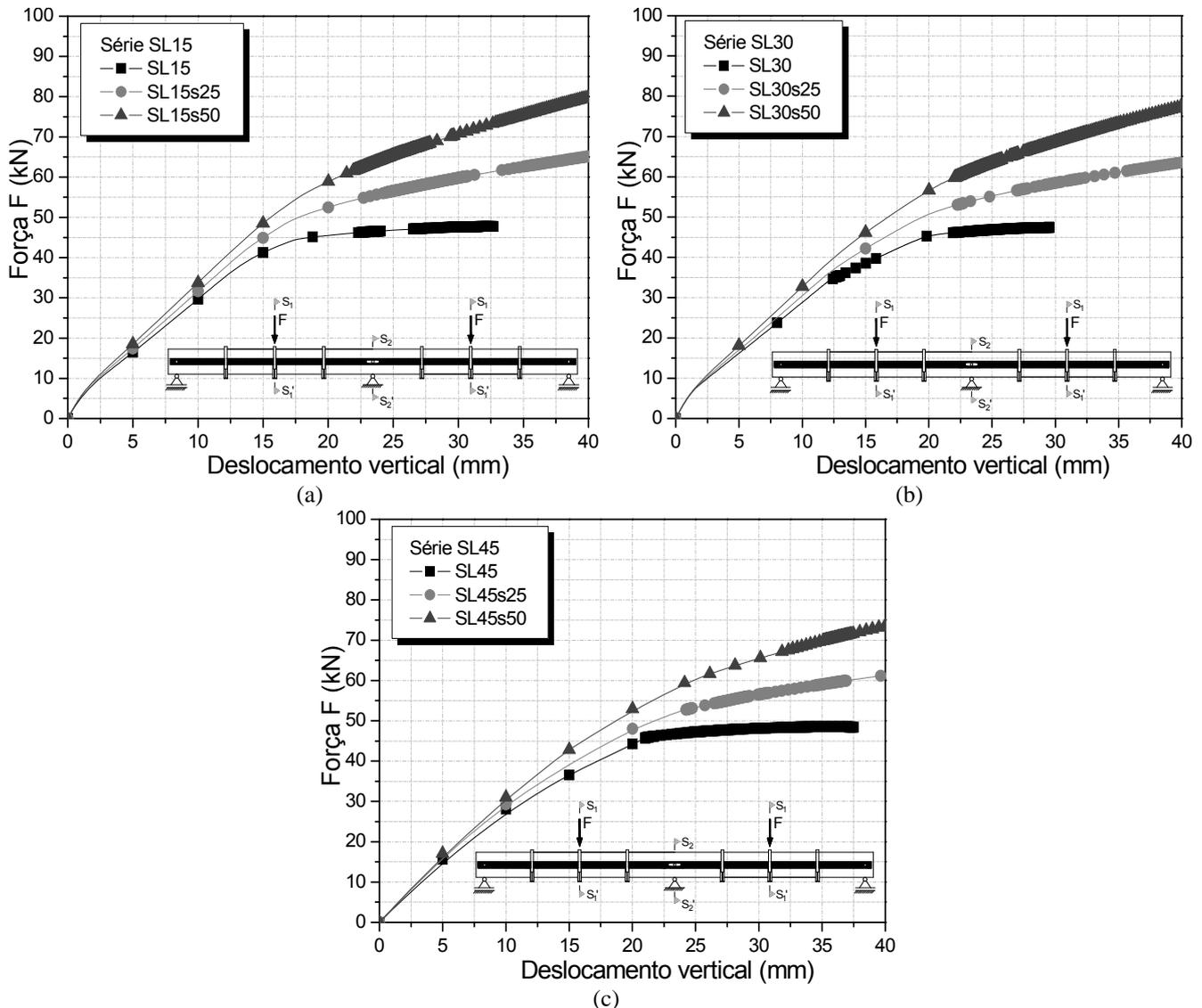


Figura 11 – Força vs. deslocamento para as séries analisadas numericamente:
(a) SL15, (b) SL30 e (c) SL45.

Uma vez que as lajes não possuem armadura de corte, a força máxima de todas as lajes simuladas pode ser limitada pela resistência ao corte (como comprovado num ensaio experimental recentemente realizado [Dalfré e Barros (2009)]).

No momento de formação da rótula plástica na região de momentos positivos foram obtidos os seguintes valores de percentagem de redistribuição momento, η : 10.1%, 6.2% e 3.7% para o SL15, SL15s25, SL15s50; 22.4%, 17.8% e 14.5% para SL30, SL30s25, SL30s50; 40.2%, 36.6% e 31.8% para SL45, SL45s25 e SL45s50. Para uma extensão de 3.5 ‰ na superfície do betão na secção de carregamento, foram obtidos os seguintes valores para η : 11.7%, 7.1% e 5.0% para SL15, SL15s25 e SL15s50; 26.0%, 20.7% e 17.3% para SL30, e SL30s25 SL30s50; 41.0%, 38.2% e 32.9% para SL45, SL45s25 e SL45s50.

Tabela 5 – Resultados obtidos via análise numérica para a secção de aplicação da força.

Séries	Rótula plástica na aplicação da carga			$\varepsilon_c = -3.5\text{‰}$				Laminados de CFRP				
	F_y (kN)	ε_s (‰)	$\frac{F_y}{F_{y.ref}}$ (%)	F (kN)	ΔF (kN)	ε_s (‰)	$\frac{F}{F_{ref}}$ (%)	S1-S1	ρ_l, eq (%)	S2-S2	ρ_l, eq (%)	
SL15	SL15	44.44	2.37	-----	47.55	-----	13.27	-----	-----	1.71	-----	1.60
	SL15s25	50.40	2.60	13.41	66.23	18.68	10.15	39.28	3	1.78	3	1.68
	SL15s50	55.61	2.11	25.13	81.53	33.98	7.76	71.46	7	1.88	7	1.77
SL30	SL30	44.02	2.17	-----	47.42	-----	12.20	-----	-----	1.85	-----	1.28
	SL30s25	49.32	2.20	12.04	63.86	16.44	9.50	34.67	3	1.93	2	1.33
	SL30s50	54.70	2.14	24.26	78.30	30.88	7.50	65.12	7	2.02	5	1.41
SL45	SL45	45.85	2.10	-----	48.40	-----	11.38	-----	-----	2.07	-----	0.95
	SL45s25	50.91	2.45	11.03	61.28	12.88	8.19	26.61	3	2.14	1	0.98
	SL45s50	56.63	2.29	23.51	74.32	25.92	6.74	53.55	7	2.24	3	1.03

5 Conclusões

Num estudo recentemente realizado sobre o reforço à flexão de lajes contínuas de betão armado reforçadas segundo a técnica NSM, valores inferiores aos esperados em termos de aumento da capacidade de carga e de redistribuição momento foram obtidos. Este programa experimental foi analisado em profundidade no presente artigo e concluiu-se que as configurações de reforço à flexão adoptadas não foram as mais apropriadas, justificando o reduzido desempenho da técnica NSM para este tipo de estruturas.

Por intermédio dos resultados experimentais obtidos, um programa de computador baseado no MEF foi utilizado para prever o comportamento deste tipo de estruturas até o seu colapso. Uma vez validado, as configurações de reforço foram optimizados e a eficácia da NSM em termos de aumento da capacidade de carga foi comprovada. Além disso, comprovou-se que com a adopção de um sistema de reforço adequadamente projectado, níveis satisfatórios de redistribuição de momento podem ser atingidos até ao colapso das estruturas contínuas reforçadas com laminados de CFRP.

6 Agradecimentos

Este trabalho pertence ao programa de investigação "CUTINEMO - Carbon fiber laminates applied according to the near surface mounted technique to increase the flexural resistance to negative moments of continuous reinforced concrete structures", financiado pela FCT, PTDC/ECM/73099 / 2006. Os autores expressam o seu agradecimento às empresas S&P, Empreiteiros Casais e Artecater. 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.

7 Referências

- ACI Committee 440. (2007). "**ACI 440 - Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures**", American Concrete Institute.
- Arduini, M., Tommaso, D. A. e Nanni, A. (1997). "**Brittle Failure in FRP Plate and Sheet Bonded Beams**", ACI Structural Journal, 94 (4), pp. 363-370.
- Ashour, A. F., El-Rafaie, S. A. e Garrity, S. W. (2004). "**Flexural strengthening of RC continuous beams using CFRP laminates**", Cement and Concrete Composites, No. 26, pp. 765-775.
- Barros, J.A.O. and Fortes, A.S. (2005). "**Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits**", Journal Cement and Concrete Composites, Vol. 27(4), pp. 471-480.
- Barros, J.A.O., Pereira, E.N.B., Gouveia, A.V., Azevedo, A.F.M. (2007). "**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.
- Barros, J.A.O., Dalfré, G.M. e Dias, J.P. (2008). "**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.
- Blaschko, M. and Zilch, K. (1999). "**Rehabilitation of concrete structures with CFRP strips glued into slits**", Proceedings of 12th International Conference on Composite Materials, Paris, France, July.
- Bonaldo, E. (2008). "**Composite materials and discrete steel fibres for the strengthening of thin concrete structures**", PhD Thesis, University of Minho, Guimarães, Portugal.
- Bonaldo, E., Barros, J.A.O. e Lourenço, P.J.B. (2008). "**Efficient strengthening technique to increase the flexural resistance of existing RC slabs**", Journal of Composites for Construction, Vol. 12(2), pp. 149-159.
- Casadei, P., Nanni, A., Galati, N., Ibell, T. e Denton, S. (2003). "**Moment redistribution in continuous CFRP-strengthened concrete members: experimental results**", Proceedings of International Conference Composites in Construction - CCC2003, Cosenza, Italy, September.
- Dalfré, G.M. e Barros, J.A.O. (2009). "**Movies of the SL15s25 slab of the second group of the NSM flexural strengthened continuous RC slabs**". (<http://www.civil.uminho.pt/mrtest>)
- El-Hacha, R. e Rizkalla, S.H. (2004). "**Near-surface-mounted fiber-reinforced polymer reinforcements for flexural strengthening of concrete structures**", ACI Structural Journal, Vol. 101(5), pp. 717-726.
- Kotynia, R. (2006). "**Analysis of reinforced concrete beams strengthened with near surface mounted FRP reinforcement**", Archives of Civil Engineering, LII 2, 305-317.
- Liu, I. S. T., Oehlers, D. J. e Seracino, R. (2006). "**Tests on the ductility of reinforced concrete beams retrofitted with FRP and steel near-surface mounted plates**", Journal of Composites for Construction, Vol. 10, No. 02.
- Nanni, A., Di Ludovico, M. e Parretti, R. (2004). "**Shear strengthening of a PC bridge girder with NSM CFRP rectangular bars**", Advances in Structural Engineering, 7(4), 97-109.
- Stevens, N. J. (1987). "**Analytical modelling of reinforced concrete subjected to monotonic and reversed loadings**", Publication No. 87-1, ISBN 0-7727-7088-3, University of Toronto, January.