

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

Flexural Strengthening of continuous RC slab strips using NSM CFRP laminates

Gláucia Dalfré (1) e Joaquim Barros (2)

(1) MSc; Doutoranda em Engenharia de Estruturas - ISISE - Universidade do Minho; Professora Visitante - UNILA

(2) Professor Catedrático, ISISE - Universidade do Minho

ISISE - Depto de Engenharia Civil - Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães Portugal
Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA), Av. Tancredo Neves, 6731 Foz do Iguaçu Brasil

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 17 faixas de lajes de dois tramos, divididas em dois grupos de acordo com a configuração de reforço: Grupo H, composto por lajes reforçadas com laminados de CFRP aplicados segundo a técnica NSM na região de momento negativo; Grupo HS, constituído por lajes reforçadas com laminados de CFRP em ambas as regiões de momentos negativos e positivos. Este trabalho tem por objetivo verificar a possibilidade de aumentar a capacidade de carga das faixas de lajes em 25% e 50%, mantendo níveis de redistribuição de momentos de 15%, 30% e 45%. O programa experimental é descrito e os resultados obtidos são apresentados e analisados neste trabalho.

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 consisted of seventeen two span slab strips, grouped in two series depending on the strengthening scheme: H series, where H is the notation to identify the slabs strengthened with NSM CFRP laminates exclusively applied in the hogging region; HS series, where HS is the notation to identify the slabs strengthened with NSM CFRP laminates applied in both hogging and sagging regions. This work aims to verify the possibility of increasing the load carrying capacity of the slab strips in 25% and 50%, maintaining moment redistribution levels of 15%, 30% and 45%. The experimental program is described and the obtained results are presented and analyzed in this paper.

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), tem sido objeto de estudo nos últimos anos, tendo-se revelado promissora no reforço à flexão [BARROS e FORTES (2005), DE LORENZIS et al. (2000), CAROLIN (2003), EL-HACHA e RIZKALLA (2004), LIU et al. (2006), NORDIN (2003) e BONALDO et al. (2008)] e ao corte [BARROS e DIAS (2006), DIAS e BARROS (2008), DIAS e BARROS (2010) e ISLAM (2009)] de estruturas de betão. Embora a utilização de Polímeros Reforçados com Fibras (FRPs) para fins de reforço seja um campo em amplo crescimento e apresenta benefícios em certas aplicações, sua utilização acarreta alguns inconvenientes, tais como a rotura violenta dos laminados devido ao seu comportamento linear e elástico, e a diminuição da ductilidade dos elementos, comprometendo assim a capacidade de redistribuição de momentos da estrutura após o seu reforço. Esta perda de ductilidade tem levado diversas normas a proibirem a utilização dos conceitos de redistribuição de momentos em estruturas reforçadas com FRP.

De entre os diversos estudos realizados sobre ductilidade e reforço à flexão com FRPs, poucos englobaram a utilização de vigas e lajes contínuas, que são os elementos predominantemente presentes nas estruturas e obras de engenharia civil. Além disso, refira-se que grande parte dos programas experimentais dedicados à análise do comportamento de elementos contínuos relatam o uso da técnica de reforço EBR (acrónimo para Externally Bonded Reinforcement) [ASHOUR et al. (2004), EL-REFAIE et al. (2003), GRACE et al. (2004), AKBARZADEH BENGAR e MAGHSOUDI (2010) e VASSEUR (2009)], enquanto a literatura referente ao reforço segundo à técnica NSM ainda é escassa [LIU (2005), LIU et al. (2006) e BONALDO (2008)]. Isto constitui uma importante limitação que este trabalho visa superar, através do estudo do comportamento estrutural quando se faz uso de laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento, aplicados de acordo com a técnica de reforço NSM. Onze faixas de laje foram reforçadas com laminados de CFRP visando o incremento da capacidade de carga em 25% ou 50%. Para além da capacidade de carga destes elementos, a redistribuição de momentos também será discutida neste artigo.

2 Programa Experimental

De forma a avaliar a influência da técnica de reforço NSM no incremento da capacidade de carga e na redistribuição de momentos em elementos contínuos de BA, um programa experimental composto por dezassete faixas de laje com dois vãos e dimensões de 120x375x5875 mm³ foi realizado (Figura 1). 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 betão de recobrimento segundo a técnica NSM. A notação adoptada na identificação de cada laje é SLxsy-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), respectivamente. Detalhes das secções transversais das faixas de lajes são apresentadas na Figura 2, enquanto a Tabela 1 apresenta a geometria, armadura longitudinal e detalhes do sistema de reforço das faixas de laje.

Grupo H

Este grupo é composto por faixas de laje de referência (SL15-H, SL30-H e SL45-H) e seis faixas de lajes reforçadas com laminados de carbono aplicados segundo a técnica NSM. Laminados de CFRP foram aplicados na região de momentos negativos visando o incremento da capacidade de carga da laje de referência em 25% e 50%. Estas faixas de lajes possuem as designações de SL15s25-H, SL30s25-H, SL45s25-H e SL15s50-H, SL30s50-H, SL45s50-H, respectivamente. Neste grupo foram utilizados laminados de CFRP com secção transversal igual a $1.4 \times 10 \text{ mm}^2$.

Grupo HS

Este grupo é composto pelas faixas de laje de referência (SL15-HS, SL30-HS e SL45-HS) e por cinco faixas de laje reforçadas (SL15s25-HS, SL30s25-HS, SL45s25-HS, SL30s50-HS e SL45s50-HS). Laminados de CFRP, com secções transversais de $1.4 \times 10 \text{ mm}^2$ e $1.4 \times 20 \text{ mm}^2$, foram aplicados em ambas as regiões de momentos negativos e positivos.

2.1 Configuração de ensaio e instrumentação

Os deslocamentos verticais foram medidos por intermédio de seis transdutores de deslocamento (LVDTs) posicionados ao longo do comprimento das lajes (ver Figura 3). 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 Figuras 4 a 6. Onze extensómetros [Figuras 4(a-b), 5(a-b) e 6(a-b)] foram instalados na armadura longitudinal, sendo sete na região de momento negativo (SG1 a SG7) e quatro nas regiões de momento positivo (SG8 a SG11). Seis extensómetros [Figuras 4(c), 5(c) e 6(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 (SG12 a SG15) e os restantes dois na região do apoio central (SG16 e SG17). Finalmente, nove extensómetros foram instalados em um dos laminados de CFRP [SG18 a SG26, Figuras 4(d-e), 5(d-g) e 6(d-g)] de modo a avaliar as extensões desenvolvidas ao longo do reforço.

Dois tipos de ensaios de flexão sob cinco pontos de carga foram realizados. No primeiro solicitaram-se as faixas de laje até a rotura (todos os modelos do grupo H e as lajes de referência do grupo HS). O segundo corresponde ao carregamento de faixas de lajes

previamente à aplicação do reforço de CFRP, de modo a atingirem um determinado deslocamento vertical (faixas de laje SL15s25-HS, SL30s25-HS, SL30s50-HS, SL45s25-HS e SL45s50-HS), que corresponde a 50% do deslocamento vertical que causa a cedência da armadura longitudinal na região de momentos negativos na faixa de laje de referência. Quando o deslocamento vertical era alcançado, um sistema de reacção temporário era aplicado a fim de manter a deformação da faixa de laje durante o período necessário ao seu reforço (Figura 7). Para o controlo do deslocamento vertical, relógios medidores foram usados para o ajuste do sistema de reacção temporário, quando necessário. Após a cura do adesivo (que, em geral, requereu cerca de duas semanas), o sistema de reacção temporário era removido, enquanto a carga era transferida para a laje. Por fim, na segunda fase do ensaio solicitaram-se as faixas de laje até a rotura.

2.2 Propriedades dos materiais

As Tabelas 2 e 3 incluem os valores obtidos nos ensaios de caracterização das principais propriedades dos materiais utilizados no programa experimental. A avaliação da resistência à compressão e do módulo de elasticidade do betão foi efectuada experimentalmente aos 28 dias. Para tal, de acordo com a LNEC-E397 (1993), efectuaram-se ensaios de compressão uniaxial sobre cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Nas faixas de laje ensaiadas utilizaram-se armaduras de três tipos de varões de aço nervurado (varões com diâmetro de 8, 10 e 12 mm), cujas principais propriedades foram avaliadas experimentalmente por intermédio de ensaios de tracção uniaxial efectuados segundo o estipulado na ASTM A370 (2002). Laminados de CFRP, fornecidos pela "S&P Clever Reinforcement Ibérica Company", foram utilizados e suas propriedades foram obtidas por intermédio da realização de ensaios de tracção uniaxial de seis provetes segundo a ISO 527-1 (1993) e ISO 527-5 (1993). Para a caracterização do comportamento à tracção do adesivo epóxi, ensaios de tracção uniaxial foram realizados em conformidade com os procedimentos descritos na norma ISO 527-2 (1993). Valores de módulo de elasticidade de 7.91 GPa (56%) e de resistência à tração de 19.19 MPa (159%) foram obtidos, onde os valores entre parênteses correspondem ao coeficiente de variação.

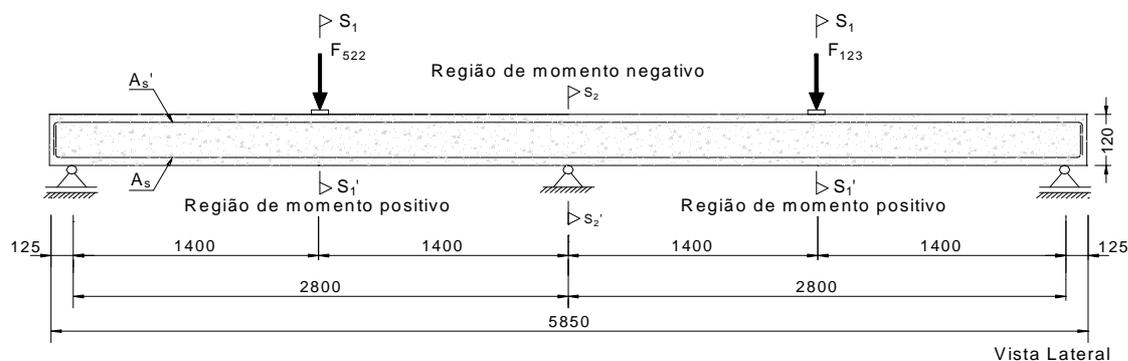


Figura 1 – Características dos provetes ensaiados (A_s' - armadura de flexão alojada junto à face superior; A_s – armadura de flexão alojada junto à face inferior da laje; dimensões em mm).

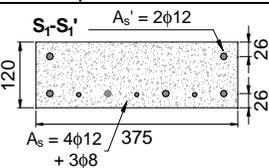
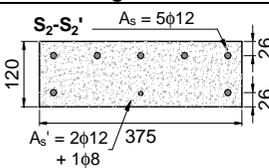
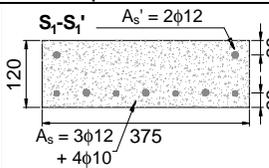
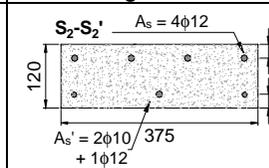
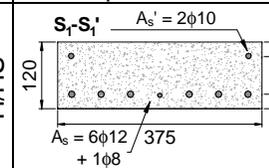
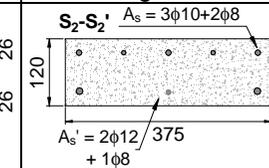
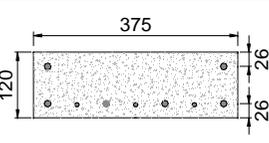
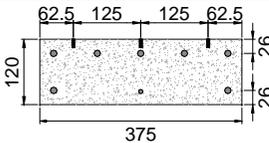
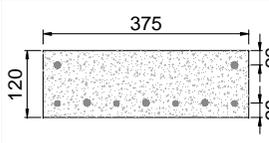
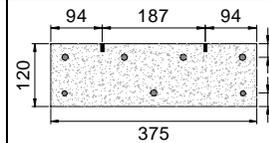
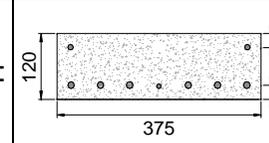
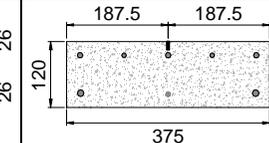
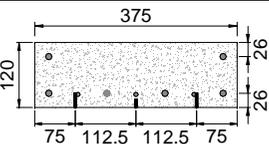
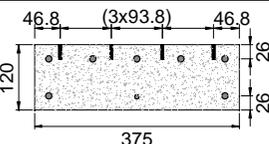
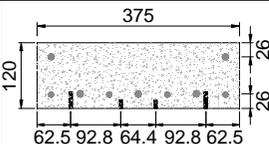
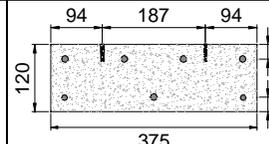
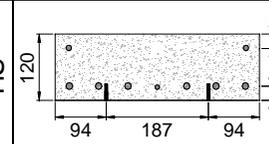
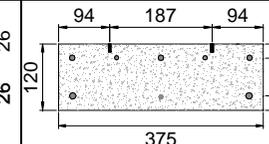
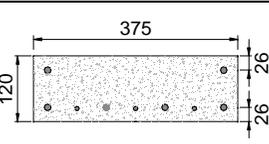
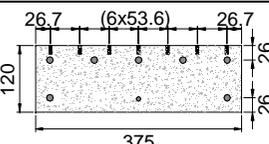
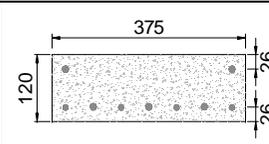
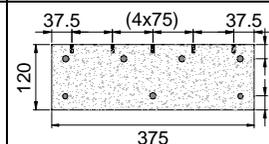
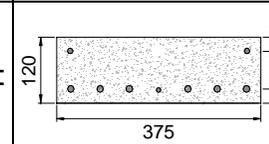
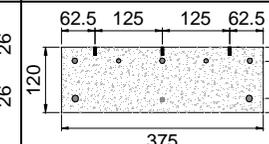
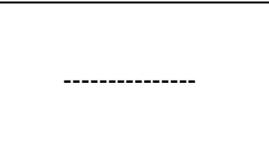
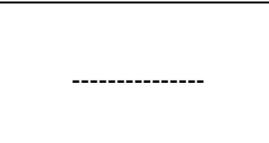
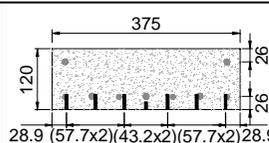
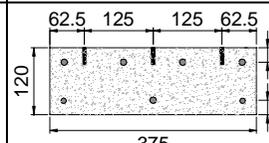
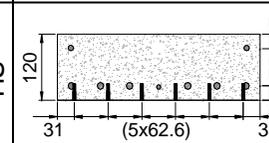
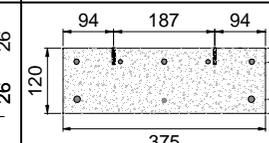
| Série SL15 | | | Série SL30 | | | Série SL45 | | |
|------------|---|---|------------|--|---|------------|---|---|
| ID | Região de momentos positivos | Região de momentos negativos | ID | Região de momentos positivos | Região de momentos negativos | ID | Região de momentos positivos | Região de momentos negativos |
| SL15 |  |  | SL30 |  |  | SL45 |  |  |
| SL15s25 |  |  | SL30s25 |  |  | SL45s25 |  |  |
| SL15s50 |  |  | SL30s50 |  |  | SL45s50 |  |  |
| |  |  | SL30s50 |  |  | SL45s50 |  |  |
| |  |  | SL30s50 |  |  | SL45s50 |  |  |

Figura 2 – Detalhes das séries SL15-H/HS, SL30-H/HS e SL45-H/HS (Dimensões em mm)

Tabela 1 – Geometria, armadura longitudinal e detalhes do sistema de reforço das faixas de laje.

| ID | η | Incremento da capacidade de carga | Seção transversal S1-S1' | Número de laminados de CFRP em S1-S1' | $\rho_{l,eq}^S$ (%) | Seção transversal S2-S2' | Número de laminados de CFRP em S2-S2' | $\rho_{l,eq}^H$ (%) |
|----------|--------|-----------------------------------|---|---|---------------------|---|---------------------------------------|---------------------|
| Grupo H | 15% | 0% | $A_s' = 2\phi 12\text{mm}$ $A_s = 4\phi 12\text{mm} + 3\phi 8\text{mm}$ | 0 | 1.71 | $A_s = 5\phi 12\text{mm}$ $A_s' = 2\phi 12\text{mm} + 1\phi 8\text{mm}$ | 0 | 1.60 |
| | | 25% | | 0 | 1.71 | | $3 \times 1.4 \times 10 \text{ mm}^2$ | 1.68 |
| | | 50% | | 0 | 1.71 | | $7 \times 1.4 \times 10 \text{ mm}^2$ | 1.80 |
| | 30% | 0% | $A_s' = 2\phi 12\text{mm}$ $A_s = 3\phi 12\text{mm} + 4\phi 10\text{mm}$ | 0 | 1.85 | $A_s = 4\phi 12\text{mm}$ $A_s' = 2\phi 10\text{mm} + 1\phi 12\text{mm}$ | 0 | 1.28 |
| | | 25% | | 0 | 1.85 | | $2 \times 1.4 \times 10 \text{ mm}^2$ | 1.34 |
| | | 50% | | 0 | 1.85 | | $5 \times 1.4 \times 10 \text{ mm}^2$ | 1.42 |
| | 45% | 0% | $A_s' = 2\phi 10\text{mm}$ $A_s = 6\phi 12\text{mm} + 1\phi 8\text{mm}$ | 0 | 2.07 | $A_s = 3\phi 10\text{mm} + 2\phi 8\text{mm}$ $A_s' = 2\phi 12\text{mm} + 1\phi 8\text{mm}$ | 0 | 0.95 |
| | | 25% | | 0 | 2.07 | | $1 \times 1.4 \times 10 \text{ mm}^2$ | 0.98 |
| | | 50% | | 0 | 2.07 | | $3 \times 1.4 \times 10 \text{ mm}^2$ | 1.03 |
| Grupo HS | 15% | 0% | $A_s' = 2\phi 12\text{mm}$ $A_s = 4\phi 12\text{mm} + 3\phi 8\text{mm}$ | 0 | 1.71 | $A_s = 5\phi 12\text{mm}$ $A_s' = 2\phi 12\text{mm} + 1\phi 8\text{mm}$ | 0 | 1.60 |
| | | 25% | | $1 \times 1.4 \times 10 \text{ mm}^2 + 2 \times 1.4 \times 20 \text{ mm}^2$ | 1.85 | | $4 \times 1.4 \times 20 \text{ mm}^2$ | 1.83 |
| | 30% | 0% | $A_s' = 2\phi 12\text{mm}$ $A_s = 3\phi 12\text{mm} + 4\phi 10\text{mm}$ | 0 | 1.85 | $A_s = 4\phi 12\text{mm}$ $A_s' = 2\phi 10\text{mm} + 1\phi 12\text{mm}$ | 0 | 1.28 |
| | | 25% | | $2 \times 1.4 \times 10 \text{ mm}^2 + 2 \times 1.4 \times 20 \text{ mm}^2$ | 2.02 | | $2 \times 1.4 \times 20 \text{ mm}^2$ | 1.39 |
| | | 50% | | $1 \times 1.4 \times 10 \text{ mm}^2 + 6 \times 1.4 \times 20 \text{ mm}^2$ | 2.22 | | $3 \times 1.4 \times 20 \text{ mm}^2$ | 1.45 |
| | 45% | 0% | $A_s' = 2\phi 10\text{mm}$ $A_s = 6\phi 12\text{mm} + 1\phi 8\text{mm}$ | 0 | 2.07 | $A_s = 3\phi 10\text{mm} + 2\phi 8\text{mm}$ $A_s' = 2\phi 12\text{mm} + 1\phi 8\text{mm}$ | 0 | 0.95 |
| | | 25% | | $2 \times 1.4 \times 20 \text{ mm}^2$ | 2.20 | | $2 \times 1.4 \times 10 \text{ mm}^2$ | 1.00 |
| | | 50% | | $6 \times 1.4 \times 20 \text{ mm}^2$ | 2.43 | | $2 \times 1.4 \times 20 \text{ mm}^2$ | 1.06 |

$\rho_{l,eq} = A_{sl} / (bd_s) + (A_f E_f / E_s) / (bd_f)$

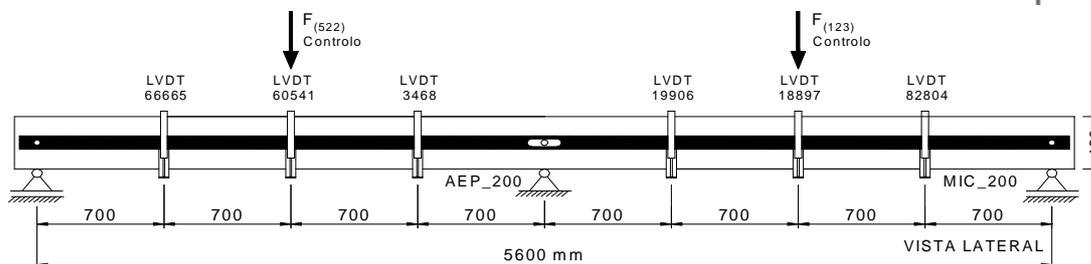


Figura 3 – Posicionamento de LVDTs (dimensões em mm).

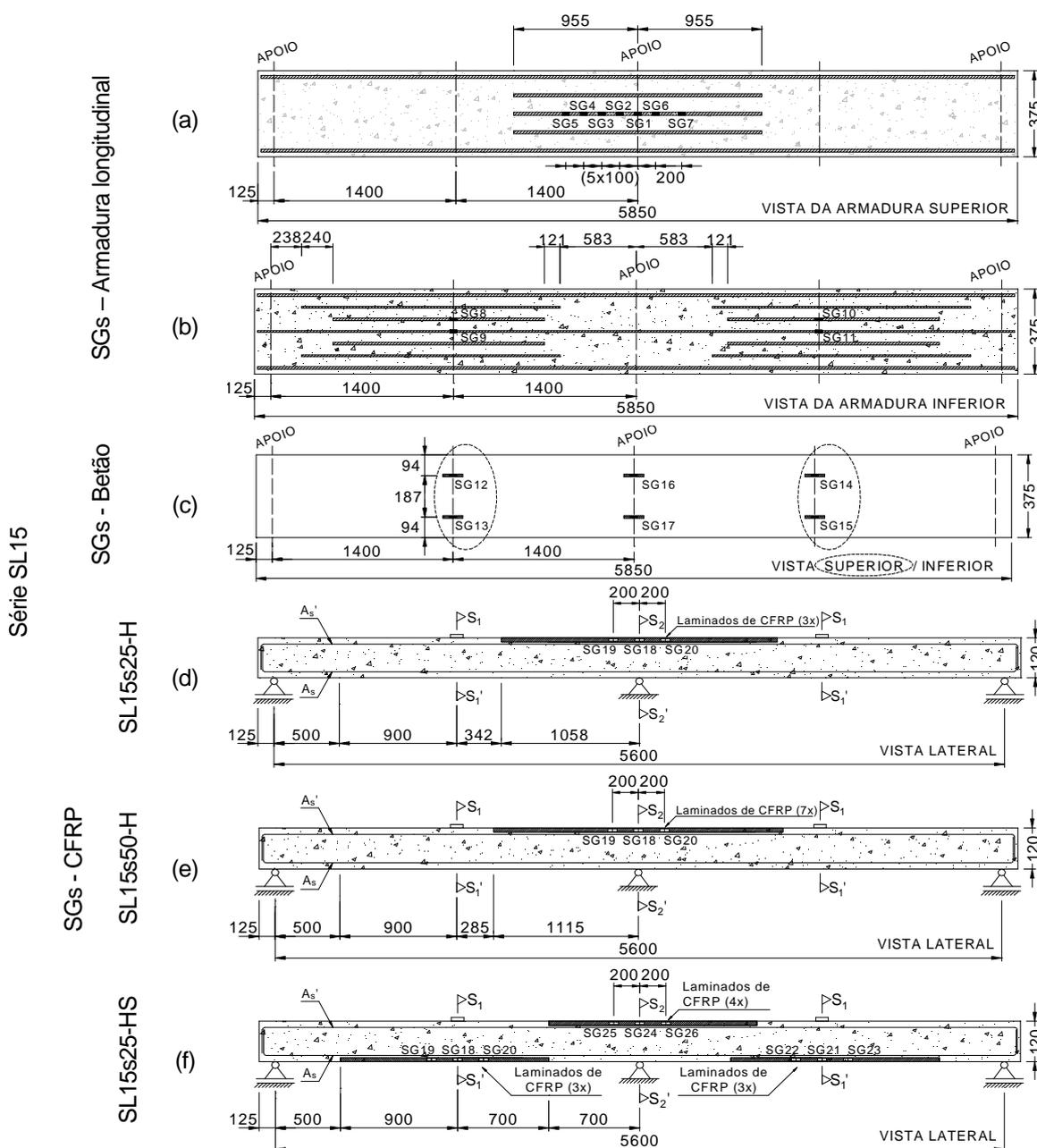


Figura 4 – Posicionamento de (a-b) extensômetros nas armaduras longitudinais, (c) betão, (d-f) laminados de CFRP para as faixas de laje reforçada da série SL15 (dimensões em mm).

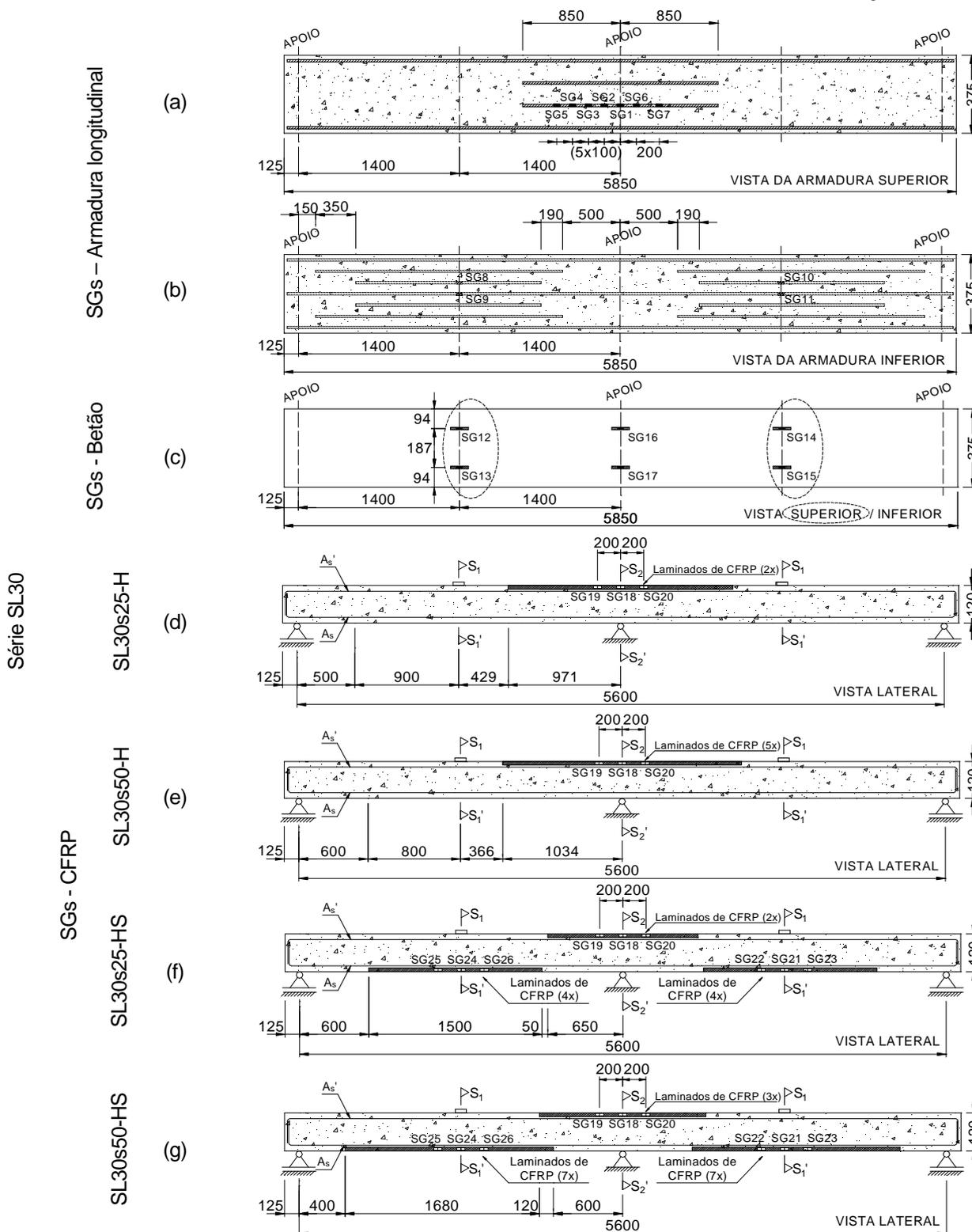


Figura 5 – Posicionamento de (a-b) extensômetros nas armaduras longitudinais, (c) betão, (d-g) laminados de CFRP para as faixas de laje reforçada da série SL30 (dimensões em mm).

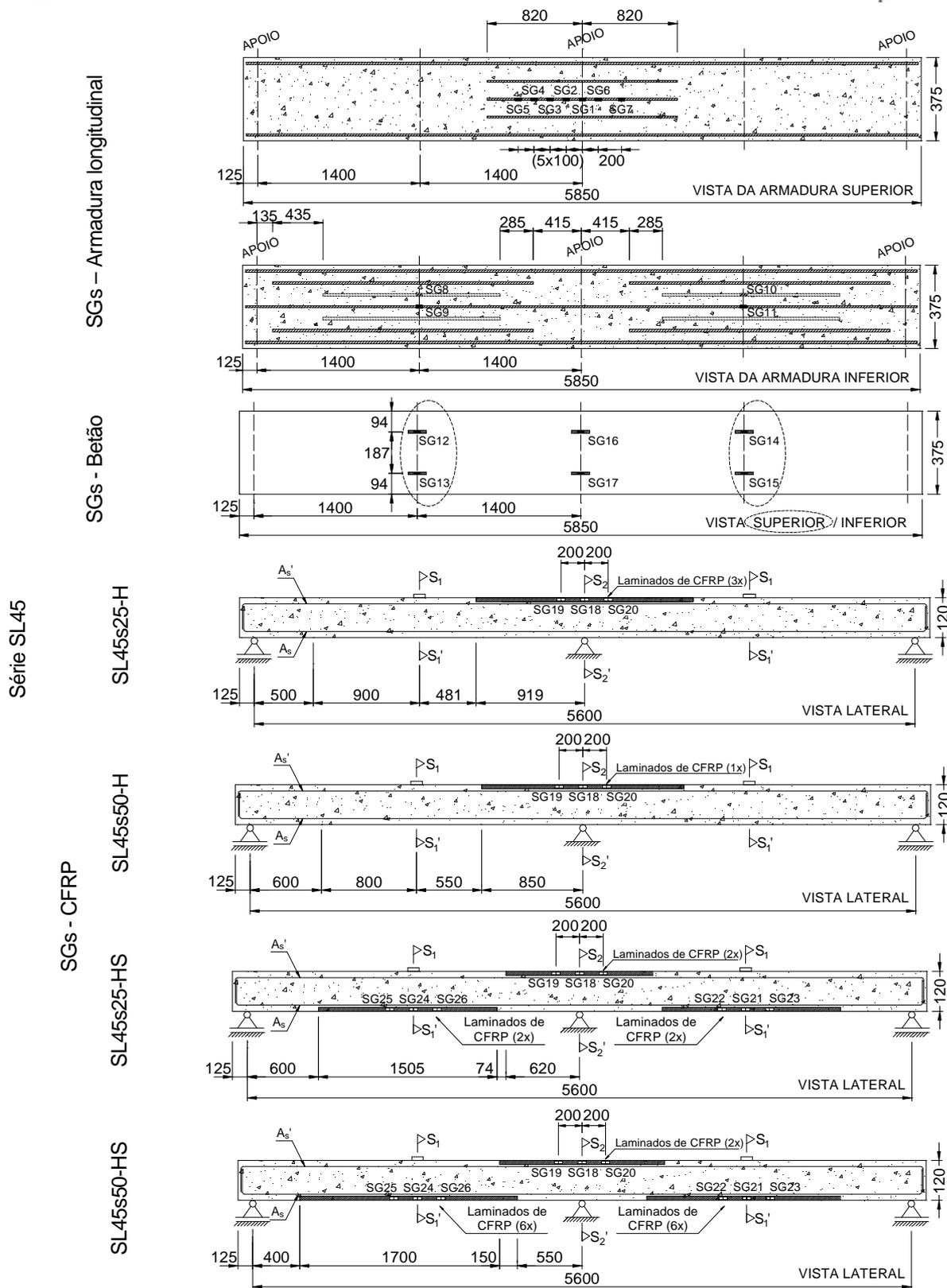


Figura 6 – Posicionamento de (a-b) extensômetros nas armaduras longitudinais, (c) betão, (d-g) laminados de CFRP para as faixas de laje reforçadas da série SL45 (dimensões em mm).

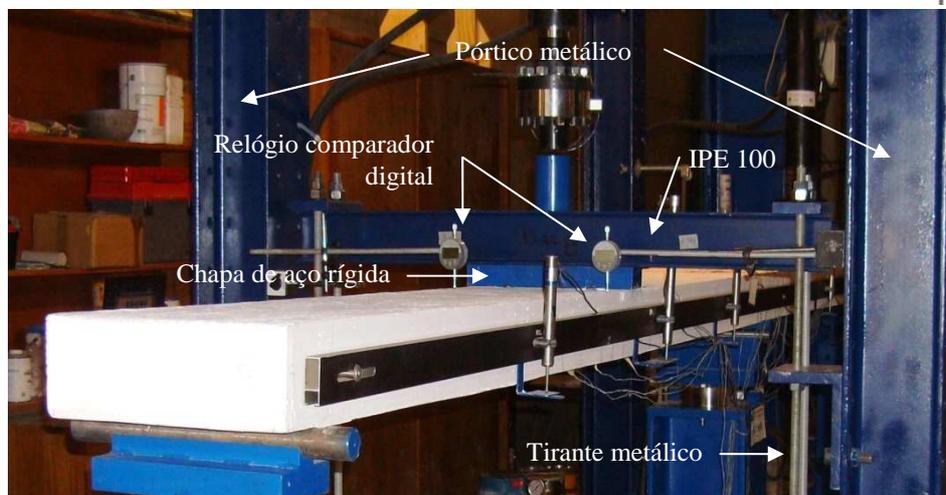


Figura 7 – Detalhes do sistema utilizado para sustentar e controlar o deslocamento vertical na região de aplicação da força das faixas de laje do grupo HS a serem reforçadas.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas do betão.

| Séries | f_{cm} (MPa) | |
|--------|----------------|--------------|
| | Série H | Série HS |
| SL15 | 40.07 (0.59) | 26.37 (1.06) |
| SL30 | 35.99 (0.51) | 28.40 (1.61) |
| SL45 | 41.41 (0.22) | 42.38 (0.03) |

(valor) = Desvio-padrão in MPa, f_{cm} = Valor médio da tensão de rotura do betão à compressão, E_c = Módulo de Elasticidade

Tabela 3 – Propriedades mecânicas da armadura longitudinal e dos laminados de CFRP.

| Armadura longitudinal | | | | | Laminados de CFRP | | | |
|-----------------------|--|---|--------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|---------------------|--|
| 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) | Altura da secção transversal (mm) | Tensão última (N/mm ²) | Extensão última (%) | Módulo de Elasticidade (kN/mm ²) |
| 8 | 200.80 (2.33%) | 421.35 (0.53%) | 0.0023 (2.65%) | 578.75 (0.36%) | 10 | 2867.63 (3.07%) | 17.67 (3.04%) | 159.30 (3.15%) |
| 10 | 178.24 (2.48%) | 446.95 (3.25%) | 0.0027 (0.45%) | 575.95 (0.34%) | | | | |
| 12 | 198.36 (2.77%) | 442.47 (2.87%) | 0.0024 (0.19%) | 539.88 (1.84%) | | | | |

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

3 Apresentação e análise dos resultados

Os resultados obtidos no programa de ensaios realizado serão apresentados e discutidos de forma a focar os seguintes aspectos: eficácia do reforço de CFRP em termos de capacidade de carga; eficácia do reforço de CFRP em termos de redistribuição de momentos. Na Figura 8 apresentam-se as curvas força média ($F = (F_{522} + F_{123})/2$) versus deslocamento vertical na secção solicitada [ver Figura 1(a)].

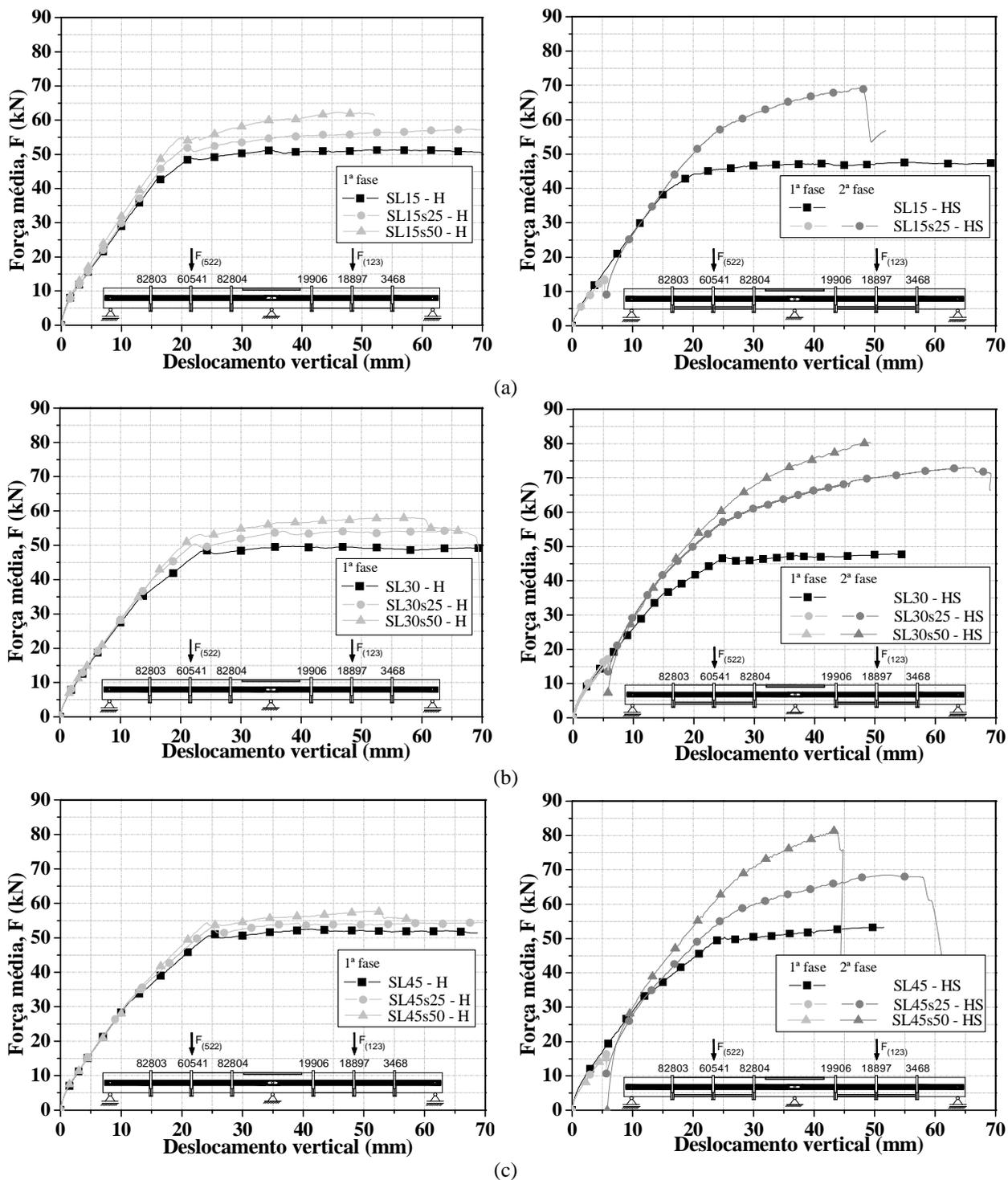


Figura 8 – Relações força média vs. deslocamento vertical nas faixas de laje das séries SL15-H/HS, SL30-H/HS e SL45-H/HS.

A Tabela 4 apresenta um resumo dos resultados experimentais no momento de esmagamento do betão na região de momentos negativos (apoio central, S2-S2') e na região de momentos positivos (na secção de carregamento, S1-S1'). Nesta tabela, F_{cu}^H e F_{cu}^S são as forças registadas quando as extensões de compressão na superfície do betão atingiram o valor de 3.5 ‰ nas regiões H e S, respectivamente; u_{cu}^H e u_{cu}^S são os deslocamentos verticais registados para F_{cu}^H e F_{cu}^S ; $\epsilon_{c,max}^S$ e $\epsilon_{c,max}^H$, $\epsilon_{s,max}^S$, $\epsilon_{s,max}^H$ e $\epsilon_{f,max}^S$ e $\epsilon_{f,max}^H$ são as extensões no betão, armadura longitudinal e nos laminados de CFRP para F_{cu}^H e F_{cu}^S , respetivamente. Apresentam-se ainda os indicadores da redistribuição de momentos (η) e da eficácia das soluções de reforço ao corte adotadas em termos de aumento da capacidade máxima de carga (IR). Uma análise geral aos dados da Tabela 4 e à Figura 8 permite constatar 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 analisadas.

Para o grupo H, no momento do esmagamento do betão em S1-S1', o aumento percentual da capacidade de carga fornecida pelo sistema de reforço à flexão utilizado foi o seguinte: 8.05% e 19.79% para SL15s25-H e SL15s50-H; 5.94% e 9.11% para SL30s25-H e SL30s50-H; 2.87% e 8.49% para SL45s25-H e SL45s50-H. Quando as extensões na superfície do betão atingiram o valor de 3.5 ‰ em S2-S2', o aumento da capacidade de carga fornecida pelo reforço à flexão foi: 7.57% e 19.29% para SL15s25-H e SL15s50-H; 7.65% e 11.09% para SL30s25-H e SL30s50-H; 4.03% e 8.69% para SL45s25-H e SL45s50-H. Para o grupo HS, no momento do esmagamento do betão em S1-S1', o aumento percentual da capacidade de carga fornecida pelo sistema de reforço à flexão utilizado foi o seguinte: 29.47% para SL15s25-HS; 28.54% e 39.95% para SL30s25-HS e SL30s50-HS; 20.59% e 49.77% para SL45s25-HS e SL45s50-HS. Quando as extensões na superfície do betão atingiram o valor de 3.5 ‰ em S2-S2', o aumento da capacidade de carga fornecida pelo reforço à flexão foi: 36.11% para SL15s25-HS; 29.84% e 49.44% para SL30s25-HS e SL30s50-HS; 24.42% e 37.24% para SL45s25-HS e SL45s50-HS. Estes valores revelam que o aumento em termos de incremento da capacidade de carga foi alcançado.

Com relação a redistribuição de momentos, quando a extensão na superfície do betão atingiu o valor de 3.5 ‰ em S1-S1' foram obtidos os seguintes de η para o grupo H: 8.55%, -9.63% e -21.53% para o SL15-H, SL15s25-H, SL15s50-H; 29.14%, 15.26% e 6.24% para SL30-H, SL30s25-H, SL30s50-H; 46.12%, 36.59% e 23.21% para SL45-H, SL45s25-H e SL45s50-H. Para uma extensão de 3.5‰ na superfície do betão na secção de carregamento (S2-S2'), foram obtidos os seguintes valores para η : 0.92%, -10.74% e -25.32% para SL15-H, SL15s25-H e SL15s50-H; 26.37%, 15.40% e 5.01% para SL30-H, SL30s25-H e SL30s50-H; 43.25%, 35.68% e 22.45% para SL45-H, SL45s25-H e SL45s50-H.

Quando as extensões na superfície do betão atingiram o valor de 3.5‰ em S1-S1' no grupo HS foram obtidos os seguintes de η : 6.76% para o SL15s25-HS; 14.00%, 18.21% e 24.98% para SL30-HS, SL30s25-HS, SL30s50-HS; 34.17%, 38.18% e 42.89% para SL45-HS, SL45s25-HS e SL45s50-HS. Para uma extensão de 3.5‰ na superfície do betão na secção de carregamento (S2-S2'), foram obtidos os seguintes valores para η : 6.20% para SL15-HS; 19.94%, 21.45% e 29.89% para SL30-HS, SL30s25-HS e SL30s50-HS; 39.21%, 41.69% e 44.10% para SL45-HS, SL45s25-HS e SL45s50-HS.

Tabela 4 – Resultados obtidos para a secção de aplicação da força (S1-S1’).

| Esmagamento do betão na região de momentos negativos ($\epsilon_{cu}^H = 3.5\%$) | | | | | | | | | | Esmagamento do betão na região de momentos positivos ($\epsilon_{cu}^S = 3.5\%$) | | | | | | | | |
|--|--------------------|--------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------|-----------|--|--------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------|-----------|
| Slab strip ID | F_{cu}^H (kN) | u_{cu}^H (mm) | $\epsilon_{c,max}^S$ (‰) | $\epsilon_{s,max}^S$ (‰) | $\epsilon_{s,max}^H$ (‰) | $\epsilon_{f,max}^H$ (‰) | $\epsilon_{f,max}^S$ (‰) | η (%) | IR (%) | F_{cu}^S (kN) | u_{cu}^S (mm) | $\epsilon_{c,max}^H$ (‰) | $\epsilon_{s,max}^S$ (‰) | $\epsilon_{s,max}^H$ (‰) | $\epsilon_{f,max}^H$ (‰) | $\epsilon_{f,max}^S$ (‰) | η (%) | IR (%) |
| SL15-H | 49.21 | 25.58 | -1.79 | 3.66 | 2.46 | ----- | ----- | 8.55 | ----- | 50.60 | 32.17 | -5.13 | 3.86 | 2.49 | ----- | ----- | 0.92 | ----- |
| SL15s25-H | 53.17 | 27.37 | -2.32 | 0.62 | 2.87 | 7.82 | ----- | -9.63 | 8.05 | 54.43 | 33.97 | -4.97 | 0.70 | 2.93 | 9.81 | ----- | -10.74 | 7.57 |
| SL15s50-H | 58.95 | 31.92 | -3.07 | 3.12 | 2.75 | 7.64 | ----- | -21.53 | 19.79 | 60.36 | 37.80 | -4.38 | 3.85 | 2.93 | 8.87 | ----- | -25.32 | 19.29 |
| SL30-H | 48.51 | 24.55 | -1.86 | 2.76 | 4.45 | ----- | ----- | 29.14 | ----- | 48.89 | 31.48 | -5.14 | 0.37 | 5.89 | ----- | ----- | 26.37 | ----- |
| SL30s25-H | 51.39 | 28.59 | -2.47 | 2.61 | 2.64 | 7.35 | ----- | 15.26 | 5.94 | 52.63 | 32.15 | -4.06 | 2.57 | 2.66 | 8.58 | ----- | 15.40 | 7.65 |
| SL30s50-H | 52.93 | 25.05 | -2.29 | 4.23 | 2.88 | 8.13 | ----- | 6.24 | 9.11 | 54.31 | 28.94 | -4.12 | 2.25 | 2.98 | 9.27 | ----- | 5.01 | 11.09 |
| SL45-H | 50.89 | 25.42 | -1.91 | 1.70 | m.d. | ----- | ----- | 46.12 | ----- | 51.31 | 33.03 | -4.97 | 0.90 | m.d. | ----- | ----- | 43.25 | ----- |
| SL45s25-H | 52.35 | 24.28 | -1.73 | 1.15 | m.d. | 9.64 | ----- | 36.59 | 2.87 | 53.38 | 33.36 | -5.13 | 2.33 | m.d. | 11.92 | ----- | 35.68 | 4.03 |
| SL45s50-H | 55.21 | 31.70 | -3.03 | 1.96 | m.d. | 9.33 | ----- | 23.21 | 8.49 | 55.77 | 33.76 | -3.70 | 2.06 | m.d. | 9.80 | ----- | 22.45 | 8.69 |
| SL15-HS | 43.81 | 19.70 | -1.95 | 2.43 | 3.40 | ----- | ----- | (na) | ----- | 45.55 | 24.69 | -6.53 | 14.63 | 9.51 | ----- | ----- | (na) | ----- |
| SL15s25-HS | 56.72 | 24.04 | -2.25 | m.d. | m.d. | 4.47 | 2.38 | 6.76 | 29.47 | 62.00 | 30.35 | -4.59 | m.d. | m.d. | 6.10 | 5.07 | 6.20 | 36.11 |
| SL30-HS | 41.28 | 19.74 | -1.88 | 2.37 | 2.84 | ----- | ----- | 14.00 | ----- | 46.14 | 30.51 | -6.25 | 2.84 | 2.87 | ----- | ----- | 19.94 | ----- |
| SL30s25-HS | 53.06 | 21.88 | -2.38 | 2.75 | 2.42 | 6.52 | 2.52 | 18.21 | 28.54 | 59.91 | 28.54 | -5.09 | 4.42 | 2.51 | 8.46 | 5.59 | 21.45 | 29.84 |
| SL30s50-HS | 57.77 | 22.85 | -2.35 | 2.40 | 2.24 | 2.39 | 2.58 | 24.98 | 39.95 | 68.95 | 30.94 | -4.98 | 0.82 | 2.06 | 4.69 | 4.61 | 29.89 | 49.44 |
| SL45-HS | 43.52 | 19.42 | -1.82 | 2.35 | 2.66 | ----- | ----- | 34.17 | ----- | 50.24 | 29.87 | -5.61 | 2.29 | 2.85 | ----- | ----- | 39.21 | ----- |
| SL45s25-HS | 52.48 | 23.06 | -1.48 | 3.77 | 6.52 | 8.74 | 2.04 | 38.18 | 20.59 | 62.51 | 34.56 | -6.04 | 1.47 | 5.20 | 11.78 | 6.83 | 41.69 | 24.42 |
| SL45s50-HS | 65.18 | 25.92 | -3.23 | m.d. | 6.65 | 8.64 | 2.97 | 42.89 | 49.77 | 68.95 | 28.33 | -3.95 | m.d. | 6.10 | 9.25 | 4.03 | 44.10 | 37.24 |

(na) – não é apresentada uma vez que as reacções não foram registadas devido a um deficiente funcionamento do sistema de aquisição de dados durante o ensaio da faixa de laje; m.d. – SG danificado

4 Conclusões

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

5 Agradecimentos

Este trabalho pertence ao programa de investigação "PrePam", PTDC/ECM/114511/2009, financiado pela FCT. Os autores expressam o seu agradecimento às empresas S&P, Secil (Unibetão, Braga) e Artecater. O primeiro autor manifesta também o seu agradecimento ao apoio financeiro da (FCT), bolsa SFRH/BD/69818/2010.

6 Referências

ACI COMMITTEE 440. **Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures**. ACI440.2R-08, Reported by ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich, 80 pp; 2008.

AKBARZADEH BENGAR, H.; MAGHSOUDI, A.A. **Experimental investigations and verification of debonding strain of RHSC continuous beams strengthened in flexure with externally bonded FRPs**. Materials and Structures Journal, 10.1617/s11527-009-9550-7, 2010.

ASHOUR, A. F.; EL-REFAIE, S.A.; GARRITY, S.W. **Flexural strengthening of RC continuous beams using CFRP laminates**. Cement & Concrete Composites, 26(7): 765 – 775, 2004.

ASTM A370. **Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products**. American Society for Testing and Materials, 52pp; 2002.

BARROS, J.A.O.; FORTES, A.S. **Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits**. Journal Cement and Concrete Composites, 27(4): 471-480, 2005.

BARROS, J.A.O.; DIAS, S.J.E. **Near surface mounted CFRP laminates for shear strengthening of concrete beams**. Cement & Concrete Composites, 28(3): 276–292, 2006.



Anais do 54º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2012
Outubro / 2012



@ 2012 - IBRACON - ISSN 2175-8182

BONALDO, E.; BARROS, J.A.O.; LOURENÇO, P.B. **Efficient strengthening technique to increase the flexural resistance of existing RC slabs.** Journal of Composites for Construction, 12(2): 149-159, 2008.

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

CAROLIN, A. **Carbon fibre reinforced polymers for strengthening of structural elements.** Doctoral Thesis, Lulea Univ. of Technology, Lulea, Sweden; 2003.

DE LORENZIS, L.; NANNI, A.; LA TEGOLA, A. **Strengthening of Reinforced Concrete Structures with Near Surface Mounted FRP Rods.** Bibl. International Meeting on Composite Materials, PLAST 2000, Milan, Italy, May 9-11, 2000.

DIAS, S.J.E.; BARROS, J.A.O. **Shear strengthening of T cross section reinforced concrete beams by near surface mounted technique.** Journal Composites for Construction, 12(3): 300-311, 2008.

DIAS, S.J.E.; BARROS, J.A.O. **Performance of reinforced concrete T beams strengthened in shear with NSM CFRP laminates.** Engineering Structures, 32(2): 373-384, 2010.

EL-HACHA, R.; RIZKALLA, S.H. **Near-surface-mounted fiber-reinforced polymer reinforcements for flexural strengthening of concrete structures.** ACI Structural Journal, 101(5): 717-726, 2004.

EL-REFAIE, S. A.; ASHOUR, A. F.; GARRITY, S. W. **Sagging and hogging strengthening of continuous reinforced concrete beams using CFRP sheets.** ACI Structural Journal, 100(4): 446-453, 2003.

FIB - BULLETIN 14. **Externally bonded FRP reinforcement for RC structures.** Technical report by Task Group 9.3 FRP, 130 pp; 2001.

GRACE, N.F.; RAGHEB, W.F.; ABDEL-SAYED, G. **Strengthening of Cantilever and Continuous Beams using New Triaxially Braided Ductile Fabric.** ACI Structural Journal, 101: 237-244, 2004.

ISLAM, A.K.M.A. **Effective methods of using CFRP bars in shear strengthening of concrete girders.** Engineering Structures, 31(3): 709-714, 2009.

ISO 527-1. **Plastics - Determination of tensile properties - Part 1: General principles.** International Organization for Standardization (ISO), Genève, Switzerland, 9 pp; 1993.



Anais do 54º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2012
Outubro / 2012



@ 2012 - IBRACON - ISSN 2175-8182

ISO 527-5. **Plastics - Determination of tensile properties - Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites.** International Organization for Standardization (ISO), Genève, Switzerland, 9 pp; 1993.

ISO 527-2. **Plastics - Determination of Tensile Properties - Part 2: Test Conditions for Moulding and Extrusion Plastics.** International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland, 5 pp; 1993.

LUI, I.S.T. **Intermediate crack debonding of plated reinforced concrete beams.** PhD Thesis, School of Civil and Environmental Engineering, The University of Adelaide, Adelaide, Australia; 2005.

LIU, I.S.T.; OEHLERS, D.J.; SERACINO, R. **Tests on the ductility of reinforced concrete beams retrofitted with FRP and steel near-surface mounted plates.** Journal of Composites for Construction, 10(2): 106-114, 2006.

LNEC-E397. **Concrete - Assessment of the elasticity modulus under uniaxial compression.** Laboratório Nacional de Engenharia Civil (in Portuguese); 1993.

NORDIN, H. **Flexural strengthening of concrete structures with prestressed near surface mounted CFRP rods.** Licentiate Thesis, Lulea Univ. of Technology, Lulea, Sweden; 2003.

VASSEUR, L. **Nonlinear behavior of continuous concrete beams strengthened with Externally Bonded FRP Reinforcement.** Doctoral Thesis, Ghent University, Ghent, Belgium; 2009.