

Estudos numéricos de lajes de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP pré-esforçados



Luís Correia¹



José Sena-Cruz²



Paulo França³

RESUMO

A utilização de laminados de CFRP (*Carbon Fibre Reinforced Polymer*) pré-esforçados no reforço de estruturas de betão armado (BA) permite combinar os benefícios da técnica EBR (*Externally Bonded Reinforcement*) com as vantagens associadas ao pré-esforço externo. Com o objetivo de investigar e compreender o comportamento a curto e a longo-prazo de lajes de BA reforçadas com laminados de CFRP pré-esforçados segundo a técnica EBR, um extenso programa experimental foi desenvolvido no âmbito do projeto de investigação FRPreDur (PTDC/ECM-EST/2424/2012). Nesse programa experimental quatro lajes de betão armado foram ensaiadas monotonicamente até à rotura, com recurso a ensaios quasi-estáticos, nomeadamente: (i) uma laje de referência; (ii) uma laje reforçada com um laminado de CFRP segundo a técnica EBR; e (iii, iv) duas lajes reforçadas com um laminado de CFRP pré-esforçado. Nas lajes pré-esforçadas foram usados dois sistemas de ancoragens (um em cada laje): o sistema de ancoragem mecânica (MA – “Mechanical Anchorage”) e o método do gradiente (GA – “Gradient Anchorage”) da força.

Estas lajes foram posteriormente simuladas com o software de elemento finitos DIANA 10.2®. Aspectos como as relações força *versus* deslocamento a meio vão, força *versus* extensão no laminado de CFRP, na armadura e no betão, padrão de fissuração e abertura de fendas, foram considerados na aferição da qualidade das simulações efetuadas. Após a calibração do modelo numérico foi efetuado um estudo paramétrico para avaliar a influência dos seguintes parâmetros na eficácia destes sistemas de reforço: (i) nível de pré-esforço e (ii) área de laminado.

Os resultados da campanha experimental e das simulações numéricas são analisados e discutidos no âmbito do presente trabalho.

Palavras-chave: CFRP; Pré-esforço; Reforço; Simulações numéricas.

¹ISISE, Dept. de Engenharia Civil, Univ. do Minho, Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal; e-mail: lcorreia@civil.uminho.pt

²ISISE, Dept. de Engenharia Civil, Univ. do Minho, Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal; e-mail: jsena@civil.uminho.pt

³CERis, ICIST e CCCEE, Universidade da Madeira, Colégio dos Jesuítas, Portugal; e-mail: pfranca@uma.pt

1. INTRODUÇÃO

Atualmente utilizam-se compósitos de CFRP (*Carbon Fibre Reinforced Polymer*) no reforço de estruturas de betão armado (BA) devido ao seu peso próprio reduzido, elevada resistência e rigidez e devido à sua elevada durabilidade. Normalmente laminados de CFRP são aplicados de acordo com a técnica EBR (*Externally Bonded Reinforcement*), como forma de aumentar a resistência à flexão, através da colagem externa deste material de reforço sobre o elemento estrutural a reforçar. O uso do pré-esforço combina os benefícios da técnica EBR com as vantagens associadas com o pré-esforço externo, nomeadamente: (i) redução das deformações e da largura de fendas; (ii) atraso no aparecimento de fendas e no início da cedência das armaduras; (iii) uso mais eficiente do betão e do material FRP; (iv) redução do risco de descolagem prematura do FRP; (v) aumento da capacidade resistente da estrutura (flexão e corte); (vi) pode ser utilizado de forma a compensar perdas no pré-esforço interno; e (vii) apresenta maior durabilidade devido a utilização exclusiva de materiais que não sofrem corrosão [1], [2].

Geralmente em estruturas pré-esforçadas segundo a técnica EBR, os CFRP apresentam, principalmente junto às extremidades, tensões e gradientes de corte elevados na interface de ligação entre o laminado e o betão. Este problema é mitigado através da aplicação de sistemas de ancoragem adequados nas extremidades dos CFRP pré-esforçados. Dos vários sistemas propostos destacam-se os seguintes: (i) o sistema de ancoragem mecânico (MA – “*Mechanical Anchorage*”); e (ii) o sistema do gradiente da força (GA – “*Gradient Anchorage*”).

A avaliação destes sistemas de ancoragem foi desenvolvida durante o projeto FRPreDur (FCOMP-01-0124-FEDER-028865), no qual foi avaliado o comportamento a curto e longo prazo de lajes pré-esforçadas. No presente trabalho apresentam-se os resultados da simulação numérica a quatro lajes: (i) uma laje de referência; (ii) uma laje reforçada com um laminado de CFRP segundo a técnica EBR; (iii) uma laje reforçada com um laminado de CFRP pré-esforçado com o sistema MA; e (iv) outra laje reforçada com um laminado de CFRP pré-esforçado com o sistema GA. As lajes foram simuladas com recurso ao software de elemento finitos DIANA 10.2®. Os resultados experimentais são comparados com os resultados numéricos. Após a calibração do modelo numérico foi efetuado um estudo paramétrico para avaliar a influência do nível de pré-esforço e geometria do laminado de CFRP na eficácia destes sistemas de reforço.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Provetes e configuração de ensaio

O programa experimental é composto por 4 lajes de betão armado com as características referidas no Quadro 1: (i) uma laje de referência; (ii) uma laje reforçada com um laminado de CFRP segundo a técnica EBR; e (iii, iv) duas lajes reforçadas com um laminado de CFRP pré-esforçado. Nas lajes pré-esforçadas foram usados dois sistemas de ancoragens (um em cada laje): o sistema de ancoragem mecânica (MA – “*Mechanical Anchorage*”) e o método do gradiente (GA – “*Gradient Anchorage*”) da força.

Quadro 1. Programa experimental.

<i>Proвете</i>	<i>Sistema de ancoragem</i>	<i>Laminado de CFRP</i> ($b_f \times t_f$)	<i>Extensão inicial, ε_{fp}</i> [%]
REF	--	--	--
EBR	--	50 mm × 1.2 mm	0.00
MA	MA	50 mm × 1.2 mm	0.42
GA	GA	50 mm × 1.2 mm	0.40

A geometria das lajes e a configuração de ensaio encontram-se ilustradas na Figura 1. As lajes apresentam uma secção transversal com 600 mm de largura por 120 mm de espessura e um comprimento total igual a 2600 mm. A armadura longitudinal era composta por 5 varões de aço nervurado com 8 mm de diâmetro junto à face inferior ($5\phi 8$) e 3 varões de aço nervurado com 6 mm de diâmetro junto à face superior ($3\phi 6$). Foi usada uma armadura transversal constituída por varões em aço com 6 mm de diâmetro, espaçados de 300 mm entre si ($\phi 6@300$) com dupla função: (i) armadura de distribuição da armadura principal e (ii) armadura construtiva. Em todas as lajes reforçadas (EBR, MA e GA) utilizou-se um laminado de CFRP (secção transversal igual a 50×1.2 [mm]) com 2200 mm de comprimento.

Todas as lajes foram ensaiadas monotonicamente até a rotura, sob controlo de deslocamento a meio vão, a uma velocidade de 1.2 mm/min num equipamento servo-controlado. Os ensaios monotónicos foram realizados segundo uma configuração de ensaio de quatro pontos de carga. A instrumentação, representada na Figura 1, inclui 5 LVDTs para medir a evolução da deformação ao longo do eixo longitudinal da laje, quatro extensómetros TML BFLA-5-3 para registar a extensão ao longo do laminado e uma célula de carga para medir a carga aplicada. Mais detalhes sobre estes ensaios poderão ser encontrados em [3].

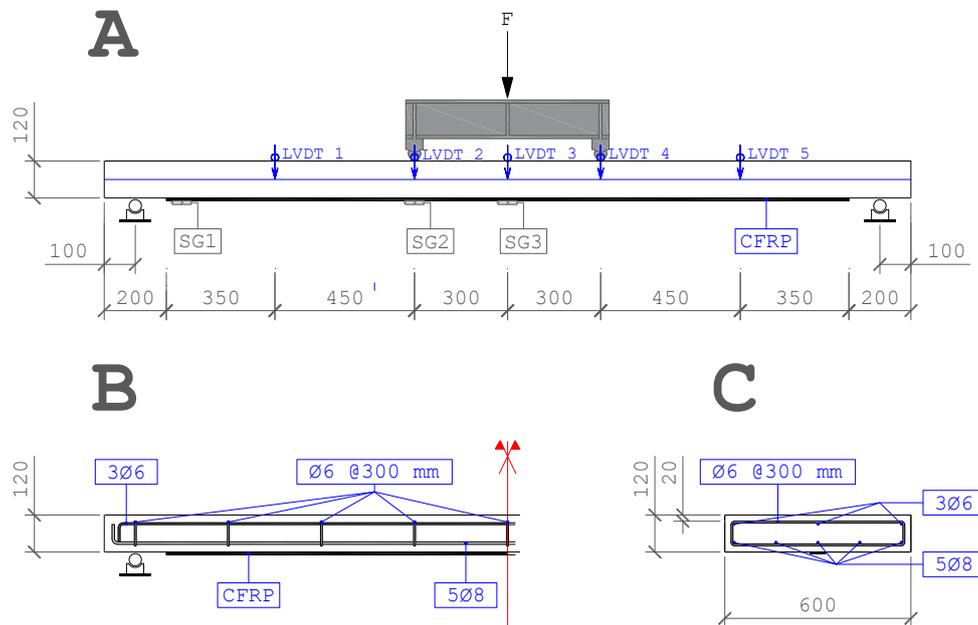


Figura 1. Geometria das lajes e configuração de ensaio: (A) configuração de ensaio; (B) secção transversal. Nota: unidades em [mm]

2.2 Caracterização dos materiais

Os ensaios de caracterização do betão foram realizados à mesma data que os ensaios monotónicos através de ensaios de compressão em 4 provetes cilíndricos (150 mm de diâmetro e 300 mm de altura). A avaliação do módulo de elasticidade (E_c) e da resistência à compressão (f_c) do betão foi realizada em conformidade com as recomendações LNEC E397-1993:1993 [4] e NP EN 12390-3:2011 [5], respetivamente. Obteve-se um valor médio da resistência à compressão de 30.0 MPa ($CoV=2.9\%$) e um valor médio do módulo de elasticidade de 42.2 GPa ($CoV=0.7\%$).

As propriedades mecânicas do aço, nomeadamente o módulo de elasticidade (E_s), tensão de cedência (f_y) e tensão na rotura (f_t), foram avaliadas com recurso a ensaio de tração uniaxial segundo as recomendações da NP EN ISO 6892-1:2012 [6]. Os ensaios foram realizados a quatro amostras de 500 mm de comprimento de cada diâmetro de varão ($\phi 6$ e $\phi 8$). Os valores médios do módulo de elasticidade, das tensões de cedência e tensão de rotura obtidos foram iguais a 206.1 GPa ($CoV=0.4\%$), 519.4 MPa ($CoV=6.1\%$) e 670.2 MPa ($CoV=5.1\%$) para os varões com 6 mm de diâmetro e 235.1 GPa

(CoV=4.6%), 595.9 MPa (CoV=4.1%) e 699.0 MPa (CoV=2.1%) para os varões com 8 mm de diâmetro, respetivamente.

Os laminados de CFRP utilizados neste trabalho experimental (Tipo: *S&P Laminate CFK 150/2000*) são compostos por fibras de carbono unidirecionais (volume superior a 68%) envolvidas numa matriz de vinilester. Seis amostras de 150 mm de comprimento foram ensaiadas à tração segundo a ISO 527-5:1997 [7] na avaliação das propriedades mecânicas deste compósito. Desta caracterização, obteve-se um módulo de elasticidade médio de 164.0 GPa (CoV=3.1%) e uma tensão de rotura média de 2375.9 MPa (CoV=2.5%).

O adesivo utilizado para efeitos de colagem dos laminados CFRP ao betão foi uma resina epóxi com a designação comercial ‘S&P 220 Resin’, produzida pelo mesmo fabricante dos laminados CFRP. Num outro programa experimental realizado pelos autores [8], verificou-se que este epóxi apresenta um módulo de elasticidade de 7.7 GPa (CoV=3.1%) e uma tensão de rotura de 20.7 GPa (CoV=9.9%) após cura de sete dias a 22 °C.

2.3 Sistemas de ancoragem

Conforme foi referido anteriormente, nas lajes pré-esforçadas utilizaram-se dois sistemas de ancoragem distintos: (i) o sistema que recorre a ancoragens mecânicas (MA) e (ii) o sistema que recorre ao gradiente da força (GA). Ambas as técnicas apresentam alguns procedimentos e equipamentos comuns. O sistema MA utiliza chapas de ancoragem metálicas com 270 mm × 200 mm × 20 mm fixas por intermédio de 6 parafusos M16 nas extremidades do laminado. O sistema de ancoragem mecânica pode utilizar uma ou duas ancoragens ativas, dependendo do nível de pré-esforço e comprimento do laminado. Por sua vez, o sistema GA serve-se da característica que o adesivo epoxídico tem de curar rapidamente a altas temperaturas. Ambas as ancoragens do sistema GA são ativas e compostas exclusivamente pelo laminado pré-esforçado e pelo adesivo epoxídico. A duração da aplicação do pré-esforço demora cerca de 24h com o sistema MA e 3h com o sistema GA. Os equipamentos e procedimentos relativos à aplicação da ancoragem mecânica e ancoragem do gradiente da força encontram-se detalhadamente descritos na literatura, nomeadamente [1], [3], [9], [10].

3. MODELAÇÃO NUMÉRICA

A modelação numérica foi realizada recorrendo ao programa comercial de cálculo automático DIANA TNO[®] (versão 10.2). As lajes foram simuladas como um problema em estado plano de tensão. A simetria da geometria das lajes, bem como presente na configuração de ensaio, foi utilizada na simulação de forma a reduzir o tempo de computação. Na Figura 2 é apresentada a geometria, a malha de elementos finitos, a configuração de carregamento e as condições de apoio adotadas nas simulações numéricas para cada uma das lajes. Duas malhas de elementos finitos foram desenvolvidas: uma para a laje REF (ver Figura 2A) e outra para as lajes EBR, MA e GA (ver Figura 2B). A malha de elementos finitos é composta por elementos quadrados de 10 mm de lado. Elementos de linha foram utilizados para simular as armaduras (longitudinais, transversais e CFRP) e elementos de interface foram utilizados para simular a ligação entre o laminado e o betão.

De modo a simular o betão recorreu-se a elementos quadriláteros isoparamétricos de 8 nós em estado plano de tensão (FE CQ16M, Diana[®]). O laminado de CFRP foi modelado através de elementos de cabo 2D de 3 nós (CL6TR, Diana[®]), e para simular a interface entre o laminado e o betão recorreu-se a elementos finitos de interface constituídos por 6 nós (CL12I, Diana[®]). A armadura longitudinal e transversal de aço foi simulada como “armadura embebida”, (EMBEDDED REINFORCEMENT, Diana[®]), que não permite deslocamento relativo entre o betão e a armadura (hipótese de aderência perfeita). Em todas as simulações numéricas, a força foi aplicada de forma indireta através de um deslocamento prescrito no ponto de carga. Tal como nas lajes ensaiadas no laboratório, nas simulações numéricas as lajes foram em primeira fase sujeitas ao peso próprio e ao efeito do pré-esforço, antes da aplicação do carregamento externo.

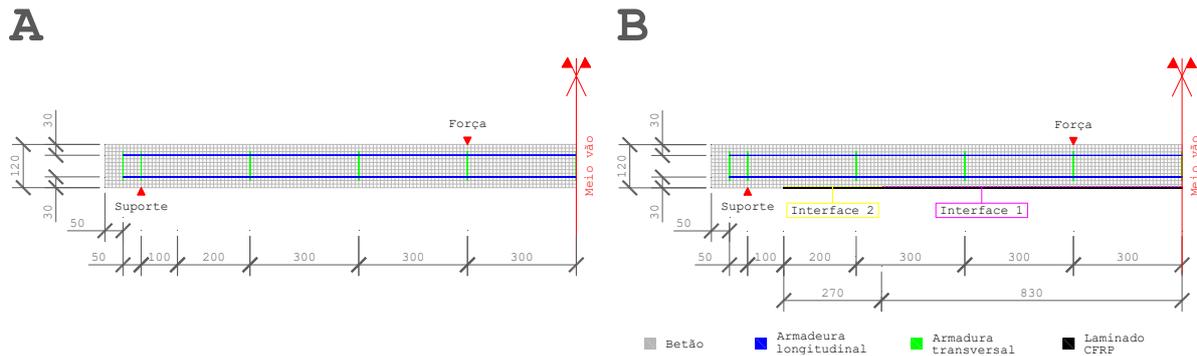


Figura 2. Malha de elementos finitos, geometria, configuração de carregamento e condições de apoio dos modelos numéricos de simulação dos ensaios das lajes: (A) REF; (B) EBR, MA e GA.

3.1 Modelos constitutivos

Diferentes modelos constitutivos foram usados na simulação dos materiais e interfaces entre estes. Na Figura 3 apresenta-se alguma informação sobre estes modelos. Para o modelo elasto-plástico da armadura de aço (longitudinal e transversal) utilizou-se uma lei bilinear. O laminado de CFRP foi modelado com um comportamento elástico linear até à rotura. Note que a tensão de rotura do laminado nas lajes pré-esforçadas foi reduzida de acordo com o pré-esforço aplicado. O modelo de fenda distribuída de orientação fixa (*'Total strain fixed crack model'*, Diana[®]) foi utilizado de forma a descrever o comportamento do betão. Admitiu-se comportamento linear em compressão e comportamento não-linear em tração. O início da fissuração foi governado por um critério de Rankine, sendo o comportamento pós-fissurado simulado com o modelo de Hordijk *et al.* [11]. A lei de interface utilizada para descrever a ligação entre o laminado e o betão segue a proposta de Lu *et al.* [12]. Esta lei de interface foi utilizada ao longo de todo o comprimento do laminado (Interface 1 e 2 na Figura 2B) das lajes EBR e GA. Na laje MA, utilizou-se esta lei de interface ao longo do laminado entre as ancoragens (Interface 1 na Figura 2B). Durante os ensaios monotónicos, verificou-se que a força máxima da laje MA foi atingida quando houve rotura do laminado de CFRP, sem evidência de deslizamento com significado ao nível das ancoragens mecânicas. Tendo em vista esta observação, a interface na zona da ancoragem mecânica (270 mm) foi considerada como linear elástica, com elevada rigidez normal e tangencial (Interface 2 na Figura 2B).

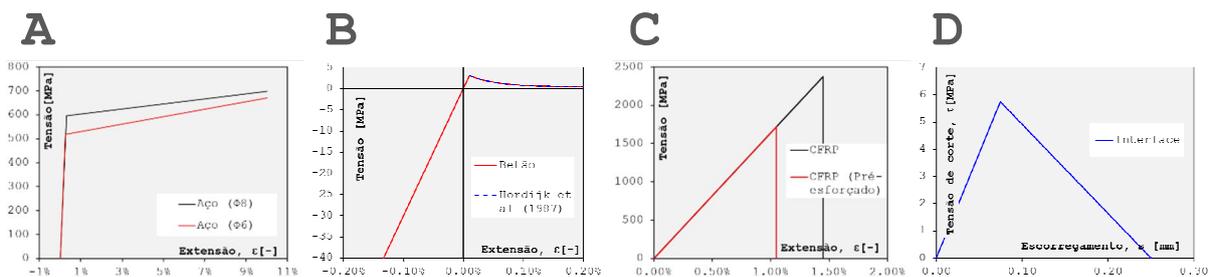


Figura 3. Modelos constitutivos para: (A) a armadura longitudinal e transversal; (B) o betão; (C) o laminado de CFRP; e (D) a interface entre o laminado e o betão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 4 é apresentada a relação entre a força aplicada e o deslocamento a meio vão, obtido nos modelos numéricos (FEM) e nos ensaios laboratoriais (EXP), de modo a avaliar o rigor das simulações efetuadas. Todas as curvas obtidas por via numérica apresentam as três fases observadas na resposta experimental: (i) a fase elástica, caracterizada pela elevada rigidez, em que o betão se encontra não

fissurado; (ii) a fase fendilhada com a redução significativa da rigidez devido à fissuração do betão em tração; (iii) e a última fase, correspondente à plastificação das armaduras longitudinais.

Em geral observa-se uma boa concordância entre os resultados experimentais e os resultados obtidos através dos modelos numéricos, materializados pela adequada previsão da força e deformação a meio vão durante a fase elástica e fase fendilhada, plastificação da armadura longitudinal e carga máxima. No que respeita à laje REF, observa-se que após a cedência das armaduras, o modelo numérico sobrestimou a respetiva carga. Esta limitação está associada, fundamentalmente, ao facto de se ter admitido comportamento linear elástico na simulação do betão em compressão.

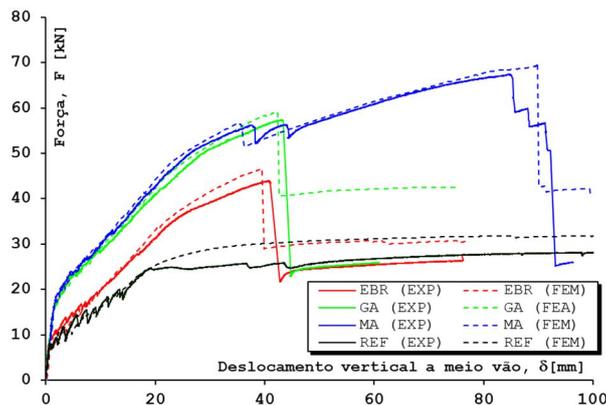


Figura 4. Força versus deslocamento a meio vão.

A carga máxima suportada (F) e o deslocamento a meio vão (δ) registados nos modelos numéricos das lajes EBR, MA e GA ocorreram para ($F=39.90$ kN; $\delta=28.97$ mm), ($F=70.00$ kN; $\delta=89.84$ mm), e ($F=57.70$ kN; $\delta=42.45$ mm), respetivamente. Por sua vez, no ensaio experimental a rotura das lajes EBR, MA e GA ocorreu quando ($F=43.98$ kN; $\delta=30.69$ mm), ($F=67.46$ kN; $\delta=84.74$ mm), e ($F=57.38$ kN; $\delta=43.31$ mm), respetivamente. Verifica-se, portanto, que a diferença entre a carga máxima obtida através da análise numérica e dos ensaios laboratoriais varia entre 9.3% e 0.6%. Nas lajes EBR e GA, a rotura (ver Figura 4) ocorreu na interface laminado/betão, tal como observado experimentalmente. De igual forma, na laje MA, a simulação numérica previu a rotura do CFRP, que tinha sido observada no ensaio laboratorial. Foi também observado numericamente o destacamento do laminado em relação ao betão na laje MA, quando a força aplicada era próxima dos 56 kN. A este destacamento está associada uma queda da força na curva $F-\delta$ que, no caso da simulação numérica, apenas é observada uma única (em virtude do tipo de simulação adotada). A Figura 5 apresenta a variação da extensão no CFRP da laje MA. Para os mesmos níveis de carga observa-se uma distribuição de extensões no laminado semelhante entre a laje ensaiada no laboratório e a respetiva simulação numérica. Através da Figura 5 verifica-se que o destacamento do laminado aconteceu primeiro no lado direito (para a força F_{d1}) e depois no lado esquerdo (F_{d2}). Depois do destacamento total do laminado, o laminado é suportado pelas ancoragens mecânicas e funciona como um cabo externo. No modelo numérico foi possível também simular tal fenómeno.

Para as lajes reforçadas, a variação da extensão no laminado de CFRP a meio vão com a força aplicada é apresentada na Figura 6. A partir desta figura é possível concluir que os modelos numéricos simulam com rigor suficiente as observações experimentais. Os resultados obtidos também permitiram concluir que se observam maiores valores da extensão no CFRP para o caso das lajes pré-esforçadas, o que representa um aproveitamento mais eficiente deste material.

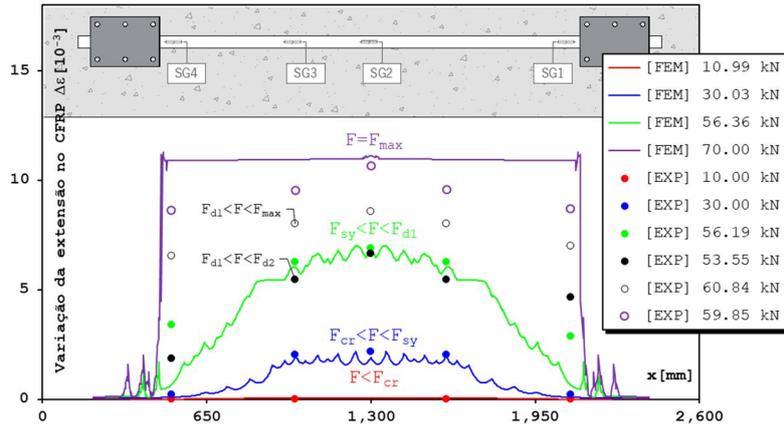


Figura 5. Evolução da extensão no CFRP ao longo do comprimento (x) da laje MA.

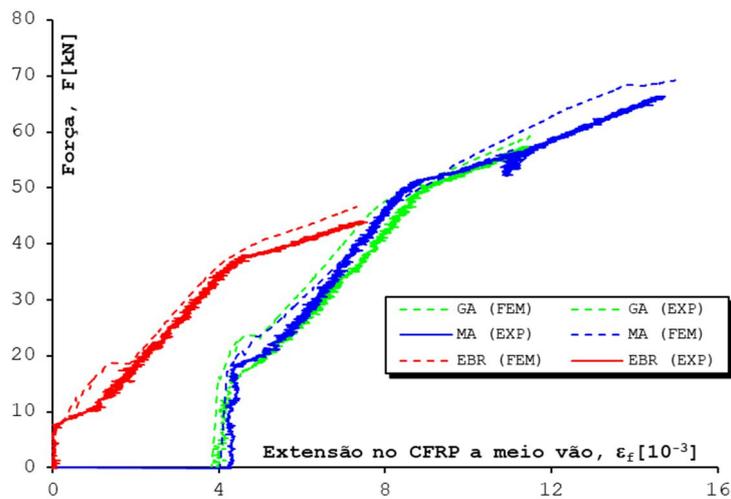


Figura 6. Força versus extensão no laminado a meio vão.

O padrão de fendilhação obtido através da análise numérica está representado na Figura 7. O padrão de fendilhação aqui apresentado foi obtido quando a deformação a meio vão nas quatro lajes era aproximadamente 54.3 mm (passo de carga 500).

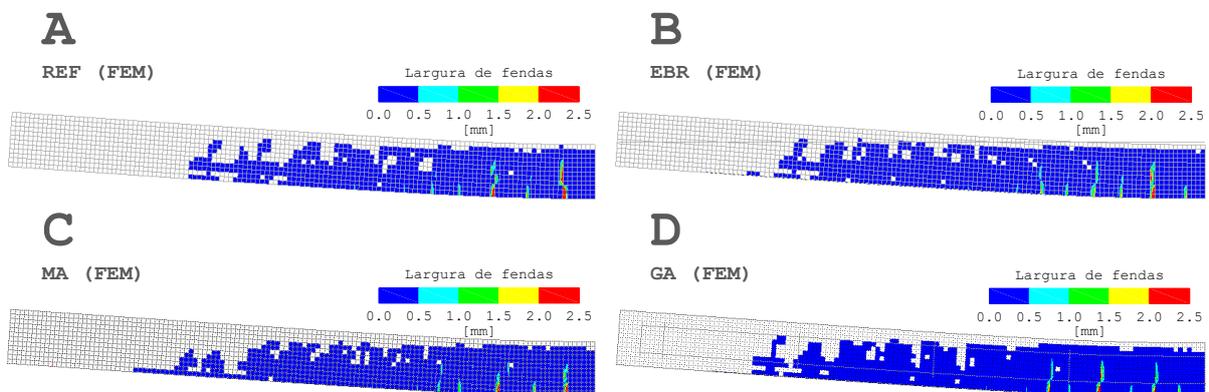


Figura 7. Padrão de fendilhação para as lajes: (A) REF; (B) EBR; (C) MA; e (D) GA.

Para este valor de deformação a meio vão, o laminado já se encontrava destacado no caso das lajes EBR, MA e GA e a armadura longitudinal da laje REF estava plasticada. A abertura de fendas é maior na laje REF, seguindo-se a laje EBR e depois as lajes pré-esforçadas MA e GA. Na análise numérica,

conforme apresentado na Figura 7, o valor de abertura de fendas máximo (fendas situadas junto ao meio vão das lajes) corresponde a 6.7 mm, 4.7 mm, 4.4 mm e 4.4 mm para as lajes REF, EBR, MA e GA, respetivamente. Tal como nas lajes ensaiadas em laboratório, a distância entre fendas é menor nas lajes pré-esforçadas. Verificou-se, através dos ensaios laboratoriais, um espaçamento médio entre fendas igual a 152.4 mm, 114.7 mm, 97.5 mm e 98.5 mm nas lajes REF, EBR, MA e GA, respetivamente. Na análise numérica, o espaçamento entre fendas obtido é aproximadamente igual a 80 mm, 72 mm, 68 mm e 67 mm para as lajes REF, EBR, MA e GA, respetivamente.

5. ESTUDOS PARAMÉTRICOS

A partir do capítulo anterior, foi possível concluir que os modelos numéricos desenvolvidos conseguiram simular com elevado rigor os resultados obtidos experimentalmente. Assim, tendo por base estas simulações realizaram-se estudos complementares de modo a avaliar a influência do nível de pré-esforço e geometria do laminado na resposta estrutural das lajes reforçadas. De referir que neste estudo foram mantidas todas as características geométricas, condições e apoio e características mecânicas dos materiais envolvidos, das simulações das lajes descritas no capítulo anterior. Nas secções que se seguem detalham-se os estudos paramétricos realizados.

5.1 Influência do nível de pré-esforço

A influência do nível de pré-esforço foi estudada no presente trabalho. As duas lajes pré-esforçadas (MA e GA) foram numericamente analisadas para três níveis de pré-esforço: (i) 0.2% de extensão no CFRP; (ii) 0.4% de extensão no CFRP; e (iii) 0.6% de extensão no CFRP. De referir que, de acordo com a bibliografia existente, 0.6% foi considerado como o valor limite de pré-extensão a aplicar a laminados de CFRP no contexto de reforço de estruturas existentes. A relação entre a força e a deformação vertical a meio vão é apresentada na Figura 8. Tal como expectável, quando o nível de pré-esforço aumenta existe um atraso no início da fendilhação do betão e uma diminuição da deformação vertical. O destacamento do laminado ocorre em níveis de deformação semelhantes tanto na laje MA como na GA, independentemente do nível de pré-esforço. Na laje GA, o destacamento do laminado corresponde à rotura do sistema de reforço, contudo na laje MA, as chapas metálicas do sistema MA previnem a rotura prematura do sistema de reforço e permitem que a laje continue a suportar incrementos crescentes de carga. Nesta análise paramétrica verifica-se que o aumento do pré-esforço produz um aumento na rigidez para os diferentes ramos que compõem a resposta. Contudo, devido à natureza do modo de rotura, a laje GA (destacamento do laminado) apresenta uma melhoria mais significativa do que a laje MA (rotura do CFRP). Nesta análise paramétrica dois parâmetros de ductilidade foram calculados: $\mu_F = F_{max}/F_y$ e $\mu_\delta = \delta_{max}/\delta_y$ (F_{max} =força máxima; F_y =força cedência das armaduras; δ_{max} = deslocamento a meio vão para F_{max} ; e δ_y = deslocamento a meio vão para F_y). A laje GA com maior nível de pré-esforço (0.6%) apresenta um aumento da carga de rotura e ductilidade semelhante às restantes, enquanto a laje MA com maior nível de pré-esforço apresenta semelhante carga de rotura (capacidade máxima do CFRP), mas uma menor ductilidade.

Quadro 2. Programa experimental.

<i>Proвете</i>	<i>(EXP)</i>	$\mu_F = F_{max}/F_y$			<i>(EXP)</i>	$\mu_\delta = \delta_{max}/\delta_y$		
		<i>(FEM)</i>	<i>(FEM)</i>	<i>(FEM)</i>		<i>(FEM)</i>	<i>(FEM)</i>	<i>(FEM)</i>
		0.2%	0.4%	0.6%		0.2%	0.4%	0.6%
MA	1.33	1.59	1.42	1.29	3.15	4.27	3.73	2.82
GA	1.14	1.25	1.29	1.25	1.49	1.65	1.89	1.75

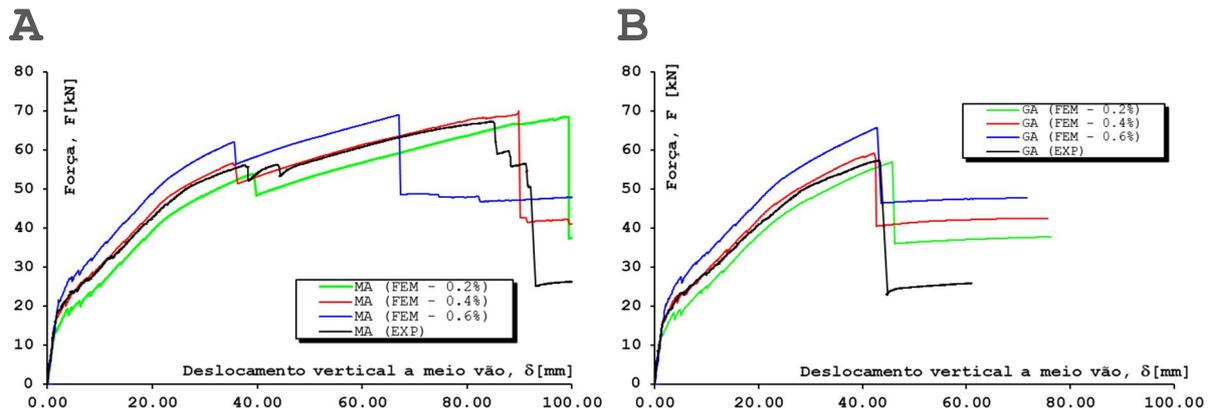


Figura 8. Força *versus* deslocamento a meio vão: (A) laje MA; e (B) GA.

5.2 Influência da geometria do laminado

O estudo paramétrico realizado também incluiu a análise da influência da geometria do laminado. Neste estudo utilizaram-se três geometrias que estão comercialmente disponíveis: (i) 50 mm × 1.2 mm; (ii) 80 mm × 1.2 mm; e (iii) 100 mm × 1.2 mm. Na Figura 9 é apresentada a relação entre a força e o deslocamento a meio vão para as lajes EBR, MA e GA. As lajes MA e GA foram pré-esforçadas com o mesmo nível de extensão no laminado de CFRP (0.4%). Verifica-se que as lajes com os laminados de maior área transversal apresentam maior carga de fendilhação, cedência das armaduras e rotura. Contudo o aumento em 60% da área de reforço (de 50 × 1.2 [mm] para 80 × 1.2 [mm]) correspondeu a um aumento da carga última de 20%, 24%, e 39% nas lajes EBR, MA e GA respetivamente. Por sua vez, o aumento em 100% da área de reforço (de 100 × 1.2 [mm] para 80 × 1.2 [mm]) correspondeu a um aumento da carga última de 47%, 27%, e 48% nas lajes EBR, MA e GA respetivamente. Ambas as lajes pré-esforçadas com o laminado de maior secção transversal (100 mm × 1.2 mm) apresentam uma rotura do sistema quando se esgota a capacidade à tração do laminado (1.4% de extensão). Os resultados da presente análise indicam que o aumento da secção do reforço é mais vantajoso para lajes com o sistema GA do que com o sistema MA. Na laje MA assumiu-se que as ancoragens mecânicas têm a capacidade de suportar as extremidades do laminado até à rotura do mesmo.

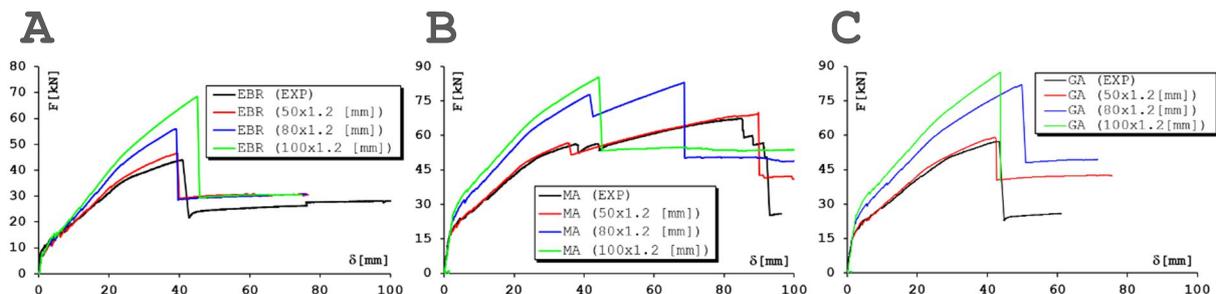


Figura 9. Força *versus* deslocamento a meio vão: (A) EBR; (B) MA; e (C) GA.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho detalhou as simulações numéricas desenvolvidas em lajes de betão armado reforçadas com laminados de CFRP pré-esforçados usando dois sistemas distintos de ancoragem: o sistema que recorre a ancoragens mecânicas (MA – ‘*Mechanical Anchorage*’) e o sistema do gradiente da força (GA – ‘*Gradient Anchorage*’). Deste trabalho foi possível obter as seguintes principais conclusões:

1. Observou-se uma muito boa concordância entre os resultados numéricos e os resultados experimentais, sendo que foi possível simular todos os estados que se observam em lajes de betão armado reforçadas com laminados de CFRP pré-esforçados;

2. As lajes reforçadas EBR e GA apresentam rotura pelo destacamento do laminado;
3. As chapas de ancoragem do sistema MA preveniram a ocorrência de uma rotura prematura, conduzindo a deformações e capacidades de carga mais elevadas;
4. No estudo paramétrico verificou-se que com o aumento do nível de pré-esforço, é possível aumentar a rigidez, carga de fendilhação, cedência das armaduras e rotura. Não obstante, o aumento do nível de pré-esforço aparenta ser mais vantajoso para a laje GA do que na laje MA, devido ao modo de rotura;
5. No estudo paramétrico também se analisou a influência da geometria do laminado. Com o aumento da secção transversal do laminado, existe um melhor comportamento das lajes (maior rigidez, atraso no início da fendilhação do betão/cedência das armaduras, aumento da carga de rotura) EBR, MA e GA.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é apoiado pela FEDER através do Programa Operacional Fatores de Competividade – COMPETE e fundos nacionais, através da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia sob o projeto FRPLongDur POCI-01-0145-FEDER-016900 (FCT PTDC/ECM-EST/1282/2014). Este trabalho é também cofinanciado através do Programa Operacional Fatores de Competitividade e internacionalização (POCI), pelo projeto POCI-01-0145-FEDER-00763. Os autores gostariam também de agradecer todas as empresas que estão envolvidas e têm contribuído para o desenvolvimento do projeto FRPreDur, nomeadamente: S&P Clever Reinforcement Ibérica Lda, S&P Clever Reinforcement Company (Switzerland), Tecnipor - Gomes & Taveira Lda., Vialam – Indústrias Metalúrgicas e Metalomecânicas, Lda., Hilti Portugal - Produtos e Serviços, Lda. O primeiro autor desejava também agradecer a bolsa SFRH/BD/98309/2013, atribuída pela FCT. Este artigo é dedicado ao Tiago Teixeira (1988 – 2015), ex-aluno de doutoramento no ISISE e na Universidade do Minho.

REFERÊNCIAS

- [1] J. Michels, J. J. Sena-Cruz, C. Czaderski, and M. Motavalli, “Structural Strengthening with Prestressed CFRP Strips with Gradient Anchorage,” *J. Compos. Constr.*, vol. 17, no. 5, pp. 651–661, 2013.
- [2] R. El-Hacha, R. G. Wight, and M. F. Green, “Flexural behaviour of concrete beams strengthened with prestressed carbon fibre reinforced polymer sheets subjected to sustained loading and low temperature,” *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 31, no. 2, pp. 239–252, 2004.
- [3] L. Correia, J. Sena-Cruz, J. Michels, P. M. França, E. Pereira, and G. Escusa, “Durability of RC slabs strengthened with prestressed CFRP laminate strips under different environmental and loading conditions,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 125, pp. 71–88, 2017.
- [4] LNEC, “LNEC E397-1993:1993,” 1993.
- [5] IPQ - Instituto Portugues da Qualidade, *NP EN 12390-3:2011*. Caparica, 2011.
- [6] NP EN ISO 6892-1, “Metallic materials - Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature,” *IPQ - Inst. Port. da Qual.*, 2012.
- [7] N. P. E. N. Iso, “ISO 527-5 Plastics - Determination of tensile properties Part 5,” Switzerland, 1997.
- [8] J. Sena-Cruz, J. Michels, C. Czaderski, and M. Motavalli, “Mechanical behavior of epoxy adhesives cured at high temperatures,” *Tech. Rep. no. 880163, EMPA, Switz.*, p. 30, 2012.
- [9] S&P, “Pre-stressed S&P Laminates CFK. Manual for applicators,” Seewen, Switzerland, 2010.
- [10] L. Correia, T. Teixeira, J. Michels, J. A. P. P. Almeida, and J. Sena-Cruz, “Flexural behaviour of RC slabs strengthened with prestressed CFRP strips using different anchorage systems,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 81, pp. 158–170, 2015.
- [11] D. Hordijk, H. Reinhardt, and H. Cornelissen, “Fracture mechanics parameters of concrete from uniaxial tests as influenced by specimen length,” in *SEMRELIM International Conference on Fracture of Concrete and Rock*, 1987, pp. 138–149.
- [12] X. Z. Lu, J. G. Teng, L. P. Ye, and J. J. Jiang, “Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete,” *Eng. Struct.*, vol. 27, no. 6, pp. 920–937, May 2005.