

# LAMINADOS DE CFRP PÓS-TENSIONADOS NO REFORÇO À FLEXÃO DE LAJES DE BETÃO ARMADO COM EXCESSIVA DEFORMABILIDADE



Joaquim Barros

Professor Associado  
ISISE  
Guimarães  
barros@civil.uminho.pt



Lúcio Lourenço

Engenheiro Civil  
CIVITEST  
Braga  
luciolourenco@civitest.pt



Pedro Silva

Engenheiro Civil  
VSL  
Paço de Arcos  
psilva@vslsistemas.pt



Mário Rosado

Engenheiro Civil  
VSL  
Paço de Arcos  
mrosado@vslsistemas.pt

## SUMÁRIO

Neste trabalho são descritos os principais procedimentos de dimensionamento e de aplicação de um sistema de reforço baseado em laminados pós-tensionados em laje vigada de pavimento de betão armado que apresentava deformabilidade excessiva e resistência à flexão deficiente.

**Palavras-chave:** Deformação excessiva; laminados pós-tensionados; reforço à flexão.

## 1. INTRODUÇÃO

Devido à flexibilidade excessiva de lajes em betão armado de um edifício sito em Alcochete, estes elementos estruturais e algumas vigas de apoio às lajes apresentavam deformabilidade considerável e fendas de abertura superior ao permitido pela regulamentação em vigor. Após levantamento das características geométricas e das propriedades dos materiais intervenientes de elementos estruturais representativos da estrutura do edifício procedeu-se ao estudo do reforço das lajes e vigas de apoio por intermédio da aplicação de laminados pós-tensionados de fibras de carbono (CFRP). A opção por esta técnica deve-se ao facto de permitir recuperar parte da deformação instalada nos elementos estruturais em estudo, de garantir que a máxima abertura de fissuras para estados limites de utilização seja inferior à imposta pela regulamentação em vigor e que a resistência à flexão para

estados limites últimos seja superior às exigências de funcionamento estrutural do edifício. Esta técnica requer tempos de execução, em geral, inferiores aos necessários por utilização de técnicas de reforço convencionais e as alterações à arquitetura do edifício são marginais, o que não acontece com técnicas baseadas na utilização de elementos metálicos ou apoios suplementares. Para além disto, os laminados de CFRP são imunes à corrosão. Para que a simulação do comportamento das lajes reforçadas com os laminados pós-tensionados de CFRP fosse a mais correcta possível, e tendo em conta que no momento da aplicação do reforço a laje e as vigas já apresentavam dano por fendilhação do betão, nos estudos efectuados foi adoptado um modelo capaz de simular o comportamento não linear por fendilhação do betão, o comportamento elasto-plástico das armaduras e o comportamento linear e elástico de laminados de CFRP.

Os estudos desenvolvidos no âmbito deste trabalho são resumidos na presente publicação.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Os elementos estruturais foram caracterizados em termos de geometria, quantidade de armadura ordinária e respectivo posicionamento, bem como as características dos materiais que os constituem. O sistema estrutural do pavimento em estudo encontra-se representado na Fig. 1.

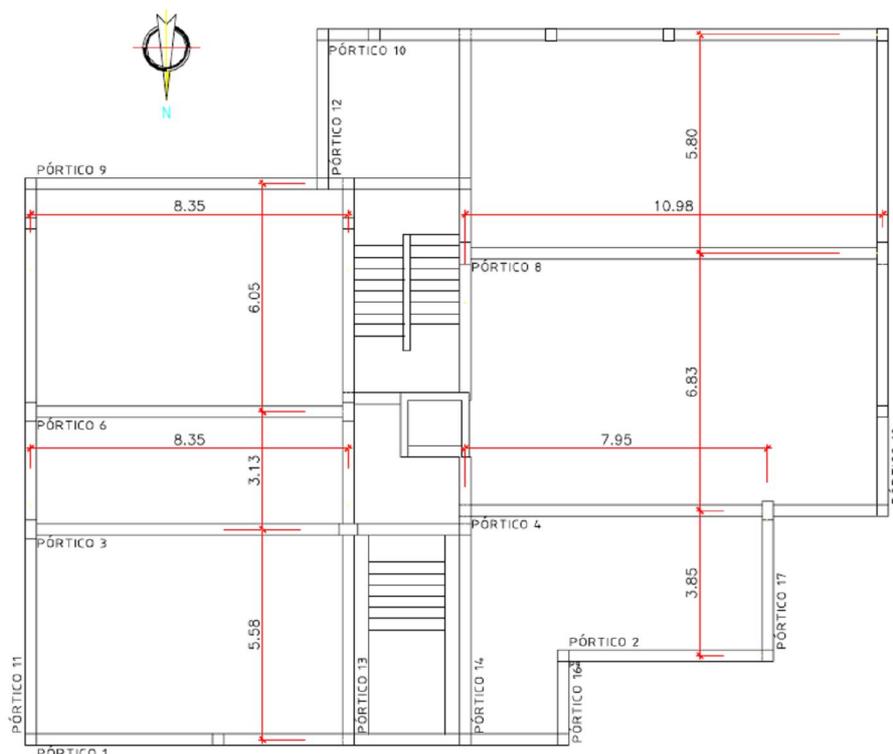


Figura 1. Sistema estrutural do pavimento (dimensões em metros).

Para a caracterização das armaduras existentes recorreu-se a dois métodos: Ferroskan®, onde foi possível o acesso às várias faces do elemento em estudo, não sendo necessárias medições a mais de 12cm de profundidade, e georadar nos restantes casos. Após a recolha dos dados foram produzidas peças desenhadas “as build”, com as dimensões reais das peças e a disposição das armaduras existentes. Para determinar o valor característico da resistência à compressão do betão dos elementos estruturais foram extraídas carotes, as quais foram sujeitas a ensaios de compressão.

### **3. PRÉ-DIMENSIONAMENTO DOS LAMINADOS DE CFRP**

Em fase de pré-dimensionamento do sistema de reforço, as lajes e vigas foram modeladas através do programa de elementos finitos SAP2000. No modelo foram introduzidas as cargas equivalentes ao pré-esforço útil nos laminados e retirados os esforços nos elementos. Os laminados seleccionados têm um módulo de elasticidade de 164 GPa e  $80 \times 1.4 \text{ mm}^2$  de secção transversal. Foi estabelecida uma extensão de 0.6%, o que equivale a 110kN de força por laminado.

O sistema de fixação e a idade da estrutura permitem desprezar as perdas devidas ao atrito, reentrada de cunhas, retracção e fluência. A deformação instantânea do betão é igualmente irrelevante, dada a pouca quantidade de pré-esforço e a continuidade da estrutura. Assim, a força realmente aplicada na estrutura pode, com razoável aproximação, ser considerada igual à força de tensionamento do laminado.

Para o cálculo da resistência dos elementos reforçados com laminados foi usado o programa FRP Lamella 4.1, desenvolvido pela empresa S&P Clever Reinforcement. A verificação da segurança em estado limite último foi efectuada por comparação dos esforços retirados do modelo de elementos finitos com os resultados obtidos com o Lamella 4.1. O programa permite considerar, para além das características dos vários materiais, o estado fendilhado do betão, assim como o nível de carregamento à data de aplicação do reforço.

### **4. MODELOS DE CÁLCULO NA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA ESTRUTURA**

O comportamento das lajes antes e após o reforço foi previsto recorrendo à utilização de dois softwares. Um, designado de DOCROS [1, 2], que permite determinar a relação momento-curvatura e momento-abertura de fissura de uma secção genérica (Fig. 2a), a qual pode ser constituída por diversos tipos de materiais (o programa dispõe de vários modelos constitutivos para simular o comportamento de materiais de matriz cimentícia, de reforços metálicos e de matriz polimérica). A título de exemplo, a Fig. 2 representa uma secção genérica constituída por cinco materiais distintos (M1 a M5). De forma a simular as condições intrínsecas ao processo de reforço de uma estrutura, o modelo permite a activação dos materiais constituintes de uma dada secção em fases distintas. Por exemplo, na secção da Fig. 2a os materiais 1 e 2 (M1 e M2) pertencem à 1ª fase (P1), a camada de reforço em betão reforçado com fibras, FRC, (M3) e o laminado de FRP (M4) são activados na 2ª fase (P2), enquanto as chapas de aço (M5) entram em funcionamento na 3ª fase (P3). Os elementos de reforço de uma dada secção podem ser aplicados sob determinada tensão, de forma a contemplar os casos em que o reforço de uma dada secção passa pela aplicação de laminados e/ou varões de FRP e/ou varões de aço pré- ou pós-tensionados. No caso dos FRP admite-se que, em tracção, apresentam comportamento linear e elástico até à rotura, e que a sua resistência à compressão é nula. O programa dispõe ainda de leis constitutivas para simulação do comportamento de betão reforçado com fibras.

O outro software utilizado, designado FEMIX, versão 4.0 [3], foi utilizado para proceder à análise não linear material do pavimento, antes e após a aplicação do reforço. A conjugação e cruzamento da informação retirada da utilização do DOCROS e do FEMIX permitiu otimizar o sistema de reforço previsto em fase de pré-dimensionamento.

Em resultado das informações obtidas durante os trabalhos de caracterização dos materiais aplicados nas lajes em estudo, admitiu-se que o betão é de classe C20/25 e as armaduras do tipo A400NR.

As acções consideradas para a modelação das lajes foram as previstas no projecto de licenciamento, nomeadamente: peso próprio do elemento estrutural (aproximadamente  $5 \text{ kN/m}^2$ ); paredes divisórias ( $1,8 \text{ kN/m}^2$ ); revestimentos ( $1,5 \text{ kN/m}^2$ ); sobrecarga de utilização ( $2 \text{ kN/m}^2$ ).

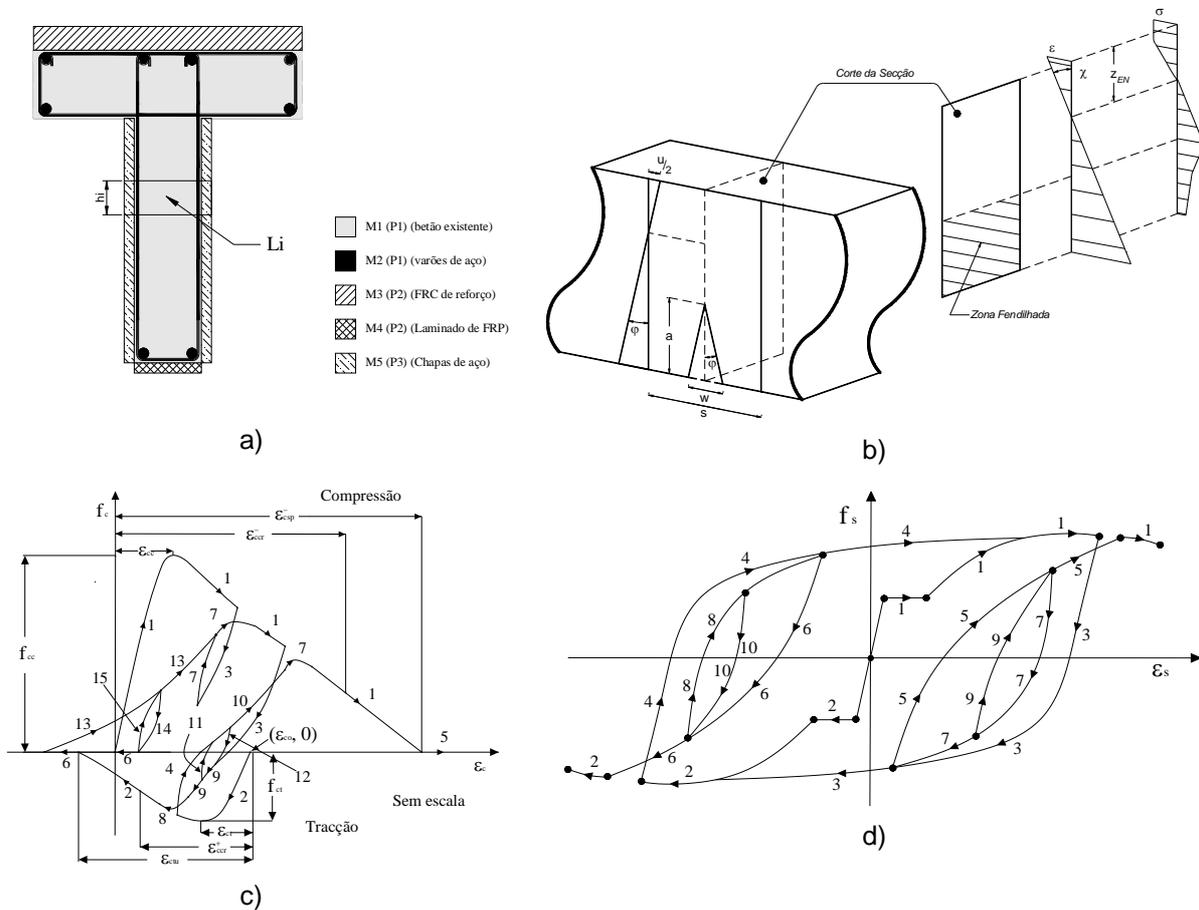


Figura 2. Conceitos subjacentes ao programa de cálculo automático DOCROS: a) secção possível de ser analisada; b) distribuição de extensões, tensões e abertura de fissura; c) lei constitutiva para materiais de matriz cimentícia; d) lei constitutiva para materiais metálicos.

Os panos de laje e as vigas foram discretizadas por elementos de casca 3D de Reissner-Mindlin, com secções divididas em camadas de forma a ser possível simular o comportamento não linear devido à iniciação e propagação de fendas, bem como à existência de armaduras. O cálculo da matriz de rigidez dos elementos finitos e das forças nodais equivalentes ao estado de tensão aplicado nos materiais foi efectuado por utilização de técnica de integração de Gauss-Legendre de 2x2 pontos. Por sua vez, os laminados pós-tensionados foram simulados como elementos de barra 3D. A malha adoptada totaliza 780 elementos e 2487 nós.

Os apoios existentes para o plano da laje são os pilares e a caixa de elevador. Estes elementos estruturais foram simulados recorrendo a apoios elásticos (na direcção vertical). Para simular a rigidez horizontal que a caixa de elevador oferece ao pavimento, foram também introduzidos apoios elásticos horizontais com rigidez equivalente à oferecida pela caixa de elevadores.

## 5. PROJECTO DE REFORÇO

Para o pavimento não reforçado, o campo de deslocamentos verticais previsto para o estado limite de utilização está apresentado na Fig. 3. Como se pode verificar na Fig. 3, com a simulação do comportamento não linear do betão por fendilhação, a flecha máxima prevista é de 25 mm, sem consideração da deformação por fluência do betão. Esta excessiva deformação deve-se, principalmente, a insuficiente inércia das vigas dos pórticos. Em resultado disto, a laje passou a “trabalhar” em condições distintas do assumido no projecto inicial.

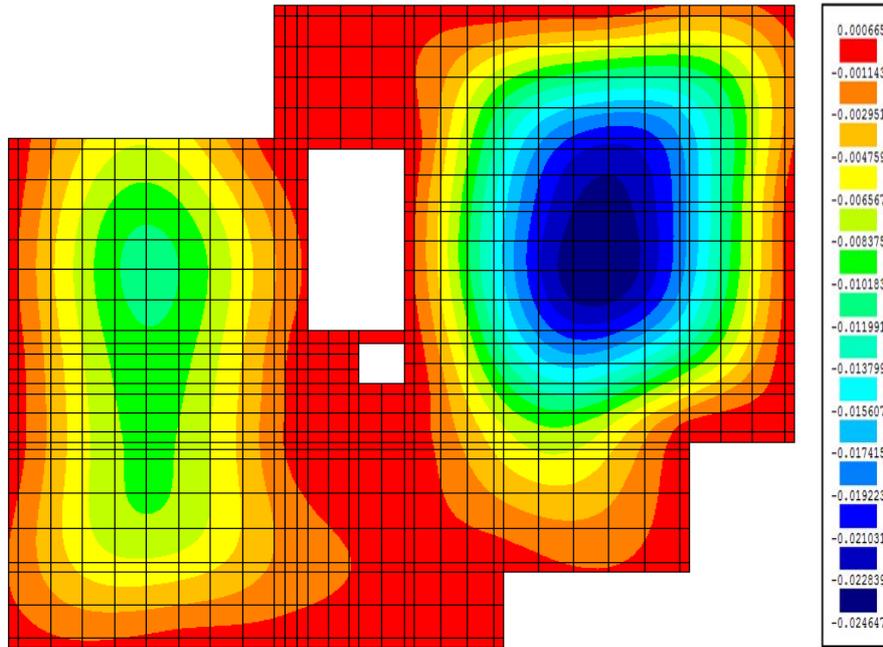
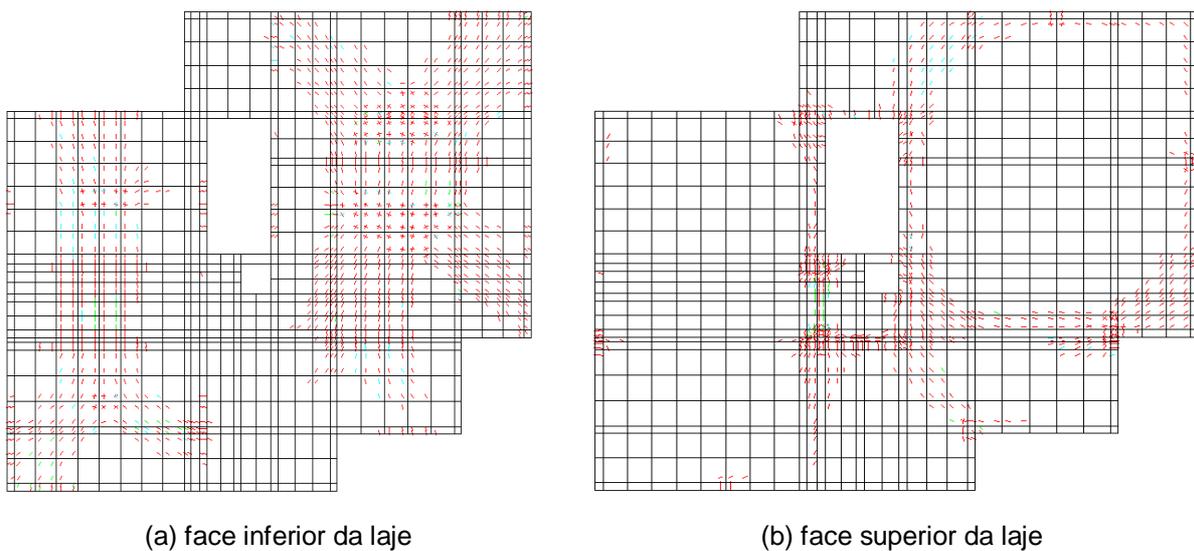


Figura 3. Campo de deslocamentos para estados limites de utilização, considerando o comportamento não linear do betão por fendilhação [m].



(a) face inferior da laje

(b) face superior da laje

Figura 4. Padrão de fendilhação, para estados limites de utilização. Legenda: fendas a cor vermelha: em processo de abertura; fendas a cor verde: em processo de fecho; fendas a cor azul claro: em processo de reabertura.

A Fig. 4 mostra o padrão de fendilhação na face inferior e superior da laje para ELU no caso do pavimento não reforçado, onde é visível a formação de fendas na face inferior em todos os panos do laje, com especial incidência nas zonas centrais das vigas dos Pórticos 3, 4, 6 e 8 (ver Fig. 1) e nas zonas centrais dos panos de laje entre estas vigas. Verifica-se, ainda, a ocorrência de fendilhação na face inferior dos panos de laje entre estes pórticos e os Pórticos 1, 9 e 10 (panos de extremidade).

Tendo em conta a deficiente rigidez do pavimento, a estratégia de reforço passou pela aplicação de laminados pós-tensionados (extensão de 6‰) pois esta permite recuperar cerca de 4 mm em termos de flecha máxima (comparar Figs 3 e 5).

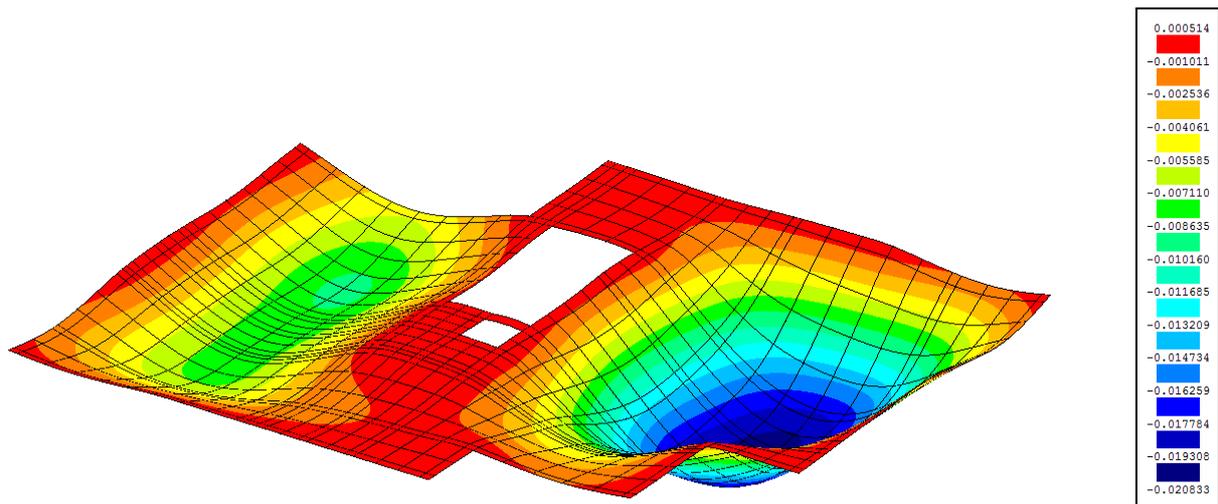


Figura 5. Campo de deslocamento verticais para estados limites de utilização após aplicação dos laminados pós-tensionados [m].

A Fig. 6 mostra que durante a aplicação dos laminados pós-tensionados desenvolve-se um processo de fecho das fendas referidas no parágrafo anterior.

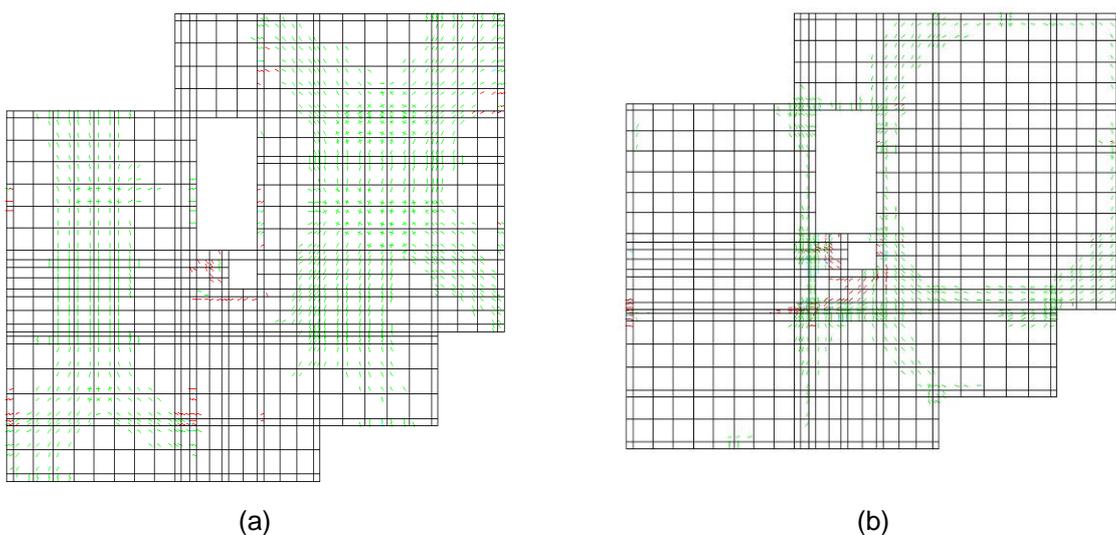


Figura 6. Padrão de fendilhação nas faces (a) inferior e (b) superior do pavimento, para estados limites de utilização após aplicação dos laminados pós-tensionados (a verde: fendas em processo de fecho; a vermelho: fendas em processo de abertura).

Utilizando o software DOCROS obteve-se a relação momento-curvatura para a secção da laje não reforçada e para as secções reforçadas com laminados pós-tensionados a 6.0‰ afastados de 0.5 m, 0.6 m e 0.8 m (ver Fig. 7), encontrando-se os valores dos momentos resistentes no Quadro 1. Da análise destes valores pode-se concluir que o valor de cálculo do momento resistente da laje não reforçada é 30.8 kN.m/m. Quanto aos momentos resistentes da secção dos panos de laje reforçados com laminados pós-tensionados afastados a 0.5 m, 0.6 m e 0.8 m, verifica-se que, quer o momento máximo, como o momento para o limite máximo de extensão recomendado ( $\epsilon_{f,limit} = 9.333\%$ ), são significativamente superiores aos momentos solicitantes de cálculo para estados limites últimos (40 kN.m/m). A descontinuidade verificada nas curvas correspondentes às secções reforçadas deve-se ao efeito da pós-tensão nos laminados. Na avaliação da relação momento-curvatura da secção reforçada teve-se em conta a extensão no betão no momento da aplicação dos laminados, calculada para estados limites de utilização (cargas permanentes não majoradas mais sobrecarga não majorada). Em ambas as curvas admitiu-se nula a contribuição do betão à tracção, e adoptaram-se valores de cálculo para as propriedades do betão e do aço.

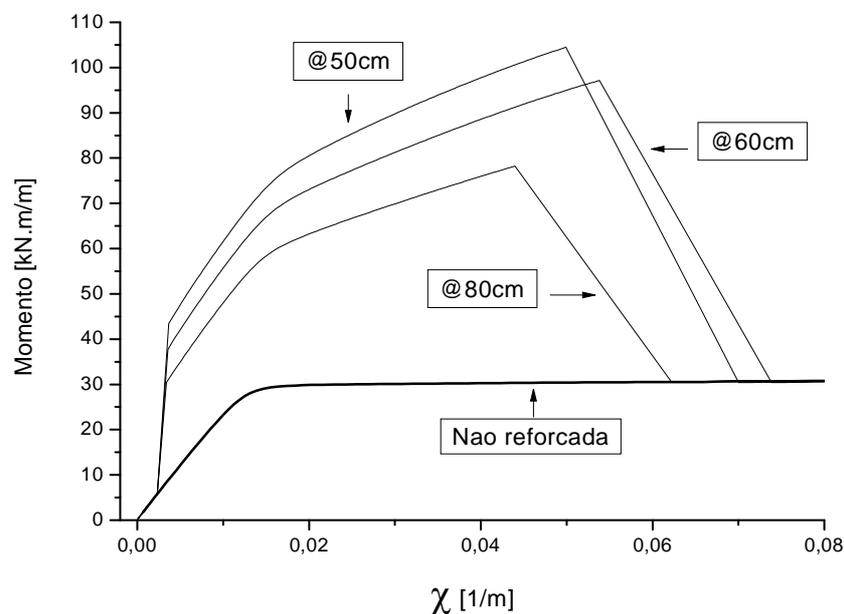


Figura 7. Relação momento-curvatura da secção da laje não reforçada e reforçada com laminados pós-tensionados afastados a 0.5 m, 0.6 m e 0.8 m.

Quadro 1. Momentos resistentes nos panos de laje sem e com reforço.		
Secção	Momento máximo [kN.m/m]	Momento para $\epsilon_{f,limit}=9.333\%$ [kN.m/m]
Não reforçada	30.8	-
Laminados @50cm	104.5	87.4
Laminados @60cm	97.1	78.3
Laminados @80cm	78.2	66.9

Na Fig. 8 apresenta-se a relação momento-curvatura para as vigas reforçadas, incluindo a relação momento-curvatura para a correspondente viga não reforçada (Pi refere-se à viga do pórtico número i, ver Fig. 1). Os valores dos momentos máximos e para  $\epsilon_{f,limit} = 9.333\%$  encontram-se no Quadro 2.

Dado que o máximo valor de cálculo do momento solicitante das vigas dos pórticos é inferior ao valor de cálculo do momento resistente das vigas reforçadas pode-se concluir que o sistema de reforço aplicado garante as verificações para os estados limites últimos de resistência à flexão das vigas. Salienta-se, finalmente, que o presente projecto de reforço também contemplou a adopção de sistemas de reforço ao corte de forma que as vigas reforçadas não apresentem rotura por corte.

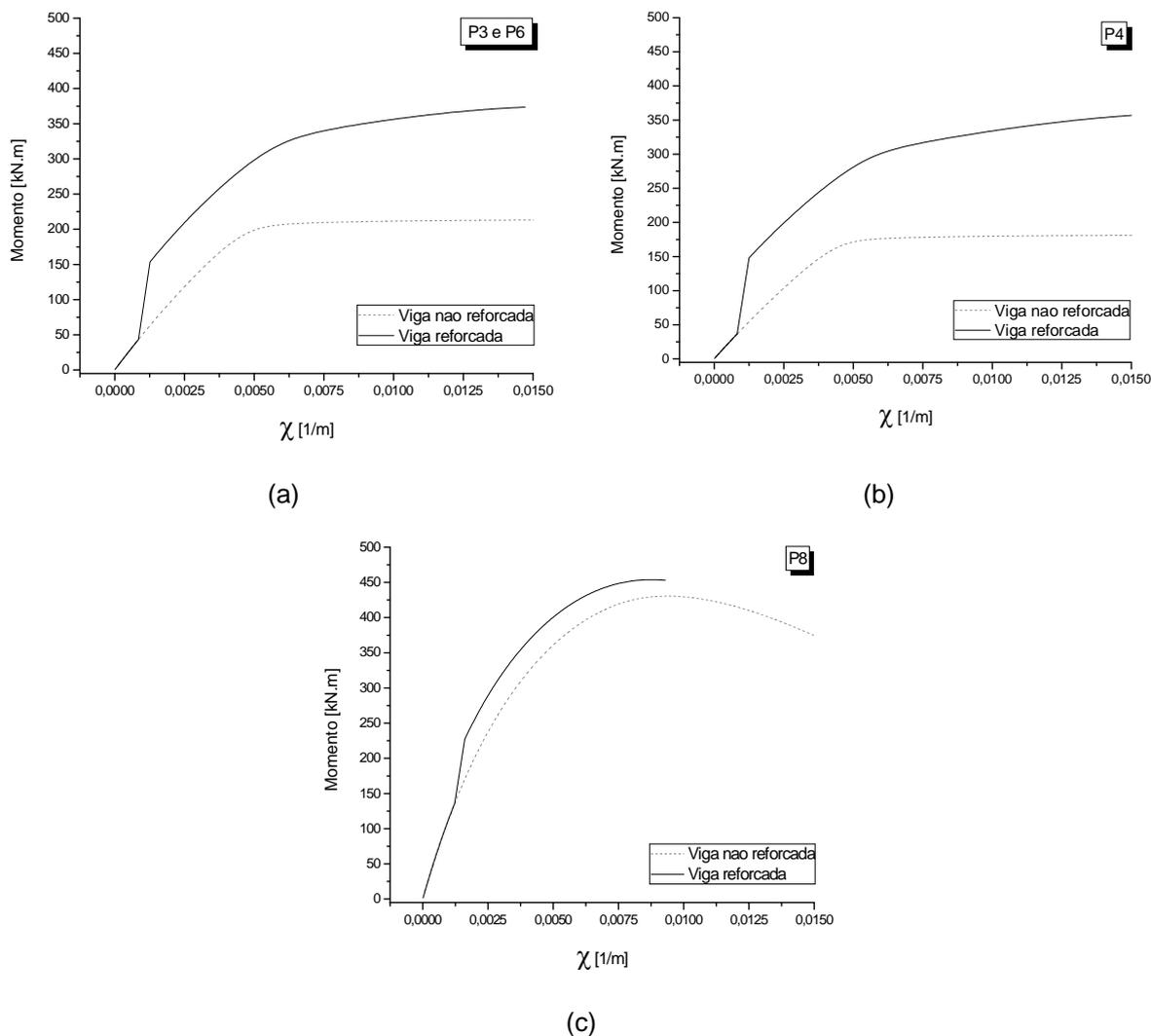


Figura 8. Relação momento-curvatura da secção das vigas: (a) reforçada e não reforçada dos pórticos P3 e P6; (b) reforçada e não reforçada do pórtico P4; (c) reforçada e não reforçada do pórtico P8.

Quadro 2. Momentos solicitantes resistentes da secção das vigas dos pórticos (kN.m).

Pórtico	Momentos solicitantes	Momentos resistentes obtidos com o DOCROS	
		Sem reforço	Com reforço (2 laminados 80 / 1.4 mm)
P3	324.0	213	374
P4	229.5	183	358
P6	302.5	213	374
P8	293.0	431	454
Apoio		78	

## 6. APLICAÇÃO DA SOLUÇÃO DE REFORÇO DE REFORÇO À FLEXÃO

A aplicação do reforço em laminados de CFRP pós-tensionados consistiu em criar e garantir as condições de projecto através de disposições construtivas adequadas.

Relativamente às vigas, as ancoragens dos laminados (Fig. 9) foram dotadas de adaptadores metálicos de ligação (Fig. 10).



Figura 9. Ancoragem de laminados



Figura 10. Adaptadores metálicos de ligação às vigas

O processo de aplicação do reforço consistiu na execução das seguintes tarefas:

- 1) Esmerilagem da superfície do betão por forma a retirar a leitada superficial e expor os inertes;
- 2) Aplicação das chapas metálicas de adaptação das ancoragens às vigas;
- 3) Aplicação das ancoragens (finais e provisórias);
- 4) Limpeza e aplicação de resina sobre os laminados (Fig. 11);
- 5) Aplicação dos laminados e fixação destes nas ancoragens (Fig. 12);
- 6) Montagem de sistema hidráulico (Fig. 13) e deflectómetros para medição de extensões no laminado;
- 7) Aplicação da força especificada em projecto (Fig. 14);
- 8) Aguardar 24h pela cura total da resina;
- 9) Remover as ancoragens provisórias e limpezas finais.



Figura 11. Aplicação de resina nos laminados



Figura 12. Aplicação dos laminados



Figura 13. Montagem do sistema hidráulico



Figura 14. Aplicação da força nos laminados

Relativamente ao reforço das lajes, o processo foi em tudo semelhante ao das vigas não sendo requerida, neste caso, qualquer peça de adaptação das ancoragens.

## 7. CONCLUSÕES

No presente trabalho foram descritos os procedimentos fundamentais adoptados no reforço de uma laje vigada de betão armado que apresentava deformabilidade excessiva e resistência à flexão deficiente. A técnica adoptada, constituída pela aplicação de laminados pós-tensionados de fibras de carbono, revelou-se eficiente para os objectivos estipulados, nomeadamente de recuperação parcial da deformação instalada, diminuição da abertura de fendas, verificação dos estados limites de utilização e estados limites últimos. No projecto de reforço foram utilizadas ferramentas de cálculo automático que permitem simular o comportamento não linear dos materiais da estrutura existente, bem como a contribuição de materiais compósitos aplicados sob determinada tensão e em fase distinta da correspondente aos materiais da estrutura.

## REFERÊNCIAS

- [1] Ribeiro, A.F., Cunha, V.M.C.F., Barros, J.A.O., Antunes, J.A.B., "Modelo de secção para dimensionamento à flexão de estruturas de betão: formulação e manual do programa docros", Relatório 03-DEC/E-25, Dep. Eng<sup>a</sup> Civil, Escola Eng<sup>a</sup>, Universidade do Minho, 59 p., Novembro 2003.
- [2] 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) p. 471-480, 2005.
- [3] J.M. Sena-Cruz, J.A.O. Barros, A.F.M. Azevedo and A. Ventura-Gouveia, Numerical simulation of the nonlinear behavior of RC beams strengthened with NSM CFRP strips, CMNE/CILAMCE, FEUP, Porto, Portugal, 13-15 June, 2007.