



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



@ 2012 - IBRACON - ISSN 2175-8182

## **Edifícios de Habitação e Comércio Em Lajes Fungiformes de Betão Auto-compactável Reforçado Com Fibras de Aço**

*Residential and commercial buildings of elevated steel fibre reinforced self-compacting concrete slabs*

Joaquim Barros (1), Hamidreza Salehian (2), Miguel Pires (3) e Delfina Gonçalves (4)

*(1) Professor Catedrático, ISISE - Universidade do Minho*

*(2) MSc, Doutorando em Engenharia de Estruturas, ISISE - Universidade do Minho*

*(3) Engº Civil, CASAIS*

*(4) Engª Civil, CiviTest*

*ISISE - Departamento de Engenharia Civil - Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058  
Guimarães Portugal*

*CASAIS Engenharia e Construção S.A. - Mire de Tibães, Braga, Portugal*

*CiviTest - Vila Nova de Famalicão, Portugal*

### **Resumo**

A utilização de fibras de aço no reforço de estruturas de betão é tão mais competitiva quanto maior é o grau de indeterminação estática da estrutura e maior é o número de componentes de tensão que se desenvolve no seu interior. As lajes apoiadas em pilares ou em estacas (aqui designadas por lajes elevadas) fazem parte deste tipo de estruturas, em que o grau de indeterminação estática é dependente do número de pilares/estacas, e cinco componentes de tensão se desenvolvem, três dos quais conduzem a esforços de membrana e flexão e os restantes dois a esforços de corte para fora do plano da laje. Quando se utiliza betão reforçado com uma percentagem volumétrica entre 1 a 1.5% de fibras de aço de elevada esbelteza (65 a 80), BRFA, é possível realizar BRFA com relativa elevada resistência pós-fendilhação que assegura a este tipo de estruturas um nível de carga última bem mais elevado do que a sua carga de início de fendilhação. De facto, os benefícios que o reforço das fibras garantem ao nível da resistência da secção da estrutura são amplificados ao nível da capacidade de carga da estrutura devido aos mecanismos de reforço das fibras que atravessam as fissuras e à capacidade de redistribuição de tensões pós início da fendilhação proporcionado pela redundância de apoios deste tipo de estrutura.

Conjugando os benefícios derivados do reforço das fibras com os intrínsecos ao carácter de auto-compactabilidade do betão, é possível obter um material de elevado desempenho aqui designado por betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (BACRFA). O comportamento de lajes de BACRFA apoiadas em pilares é investigado neste trabalho por intermédio da aplicação da teoria das linhas de rotura (TLR) na previsão da capacidade de carga registada em ensaiados experimentais realizados com lajes apoiadas em pilares. Após verificação do bom desempenho do modelo, são efetuados estudos paramétricos para estimar as potencialidades do BACRFA para este tipo de sistema estrutural. Finalmente um protótipo de edifício construído à escala 1/4 em BACRFA foi construído, sendo apresentados os resultados preliminares dos ensaios de carga efetuados.

*Palavras-Chave: Betão Reforçado com Fibras, Lajes Elevadas, Teoria das Linhas de Rotura*



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



@ 2012 - IBRACON - ISSN 2175-8182

## Abstract

The use of steel fibres for the reinforcement of concrete structures is as competitive as higher is the support redundancy, and as many stress components develop in the structure. Slabs supported on piles or columns (here designated by elevated slabs) are this type of structures, where the statically indeterminate degree is dependent on the number of columns/piles, and five stress components are installed, three of which lead to membrane force and bending moment components, and the other two out-of-plane stresses generate the shear force components. When using relatively high content of steel fibres (1 to 1.5% in volume) of large aspect ratio (65 to 80), steel fibre reinforced concrete (SFRC) of quite significant post-crack residual tensile strength can be built, able of providing an ultimate moment much higher than its cracking moment. The benefits guaranteed by the fibre reinforcement at the cross section level are amplified at the structural level due to the stress redistribution provided by the support redundancy character of this type of structures, and by the reinforcement mechanisms assured by fibres bridging the cracks, leading to an ultimate load carrying capacity for the SFRSC slab that is much larger than the load at crack initiation. Adding the benefits of fibre reinforcement to those derived from the self-consolidating character of a self-compacting concrete (SCC), a high performance structural material can be obtained, here designated by steel fibre reinforced self-compacting concrete (SFRSCC). The behaviour of SFRSCC slab supported on columns is investigated in the present work by applying the yield line theory (YLT) to available data generated from real scale tests and performing parametric studies in order to evidence the influence of relevant parameters for the effectiveness of this innovative structural system. A SFRSCC was developed, its relevant properties were characterized, and it was used to build a ¼ scale elevated steel fibre reinforced concrete (ESFRC) slab system prototype. The results of the first phase of the loading test program are presented.

*Keywords: fibre reinforced concrete, elevated slab, yield line theory*

## 1 Introdução

Tirando partido das vantagens do ponto de vista do comportamento estrutural proporcionadas pela redundância de apoios de lajes apoiadas em pilares, e das que derivam da elevada resistência residual pós-fendilhação de betão reforçado com percentagem volumétrica de fibras de aço entre 1 a 1.5%, tem sido recentemente explorada a utilização de betão reforçado com fibras de aço (BRFA) para a construção deste tipo de estrutura [Destrée (2004)]. Este tipo de lajes tem sido designado por lajes elevadas em betão reforçado com fibras de aço (E-BRFA), e incluem no alinhamento dos pilares, em ambas as direções da laje, uma dada percentagem de armadura convencional, designada por armadura de anti colapso progressivo [Sasani e Sagiroglu (2008)]. A teoria das linhas de rotura (TLR) tem sido muito utilizada no projeto de lajes de BRFA apoiadas em solo [Barros et. al. (2005)]. Recentemente uma formulação baseado na TLR foi desenvolvida para o projeto de E-BRFA [Salehian e Barros (2011)]. Para determinar o momento resistente plástico da secção da E-BRFA, a lei constitutiva do BRFA é definida por intermédio das recomendações do [Model Code (2010)]. Tendo por bases resultados disponíveis de ensaios realizados com protótipos de escala real de E-BRFA, o bom desempenho da formulação baseada na TLR é demonstrado no presente trabalho. Utilizando esta formulação são efetuados estudos paramétricos para evidenciar a influência da espessura da laje e do vão entre pilares na capacidade de carga da E-BRFA. Dado que as fibras de aço são o elemento constituinte do betão com maior densidade, ocorre a tendência para um aumento da percentagem de fibras da face superior para a face inferior da laje, principalmente quando o BRFA é aplicado sob vibração [Barros e Antunes (2003)]. Para simular este efeito é introduzido um fator na formulação desenvolvida, e a sua influência na capacidade de carga deste tipo de estrutura é avaliada. Dado que este efeito pode ter consequências negativas para a capacidade de carga da E-BRFA, no presente trabalho foi desenvolvido um betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (BACRFA), dado que a supressão da tarefa de vibração do betão, para além dos benefícios económicos e de qualidade das condições de trabalho, permite assegurar uma distribuição mais homogénea de fibras ao longo da espessura da laje [Cunha (2010), Oliveira (2010)]. As propriedades do BACRFA desenvolvido foram caracterizadas segundo as recomendações do Model Code 2010 (MC2010), e este BACRFA foi utilizado na construção do protótipo de edifício à escala  $\frac{1}{4}$ , cuja geometria se descreve na Figura 1. A laje elevada em BACRFA (E-BACRFA), de comprimento $\times$ largura $\times$ espessura 3.7 $\times$ 2.1 $\times$ 0.075 m, suporta-se em 12 pilares de secção quadrada com 0.1m de lado. A distância entre pilares na direção X e Y é 1.2 m e 1.0 m, respetivamente.

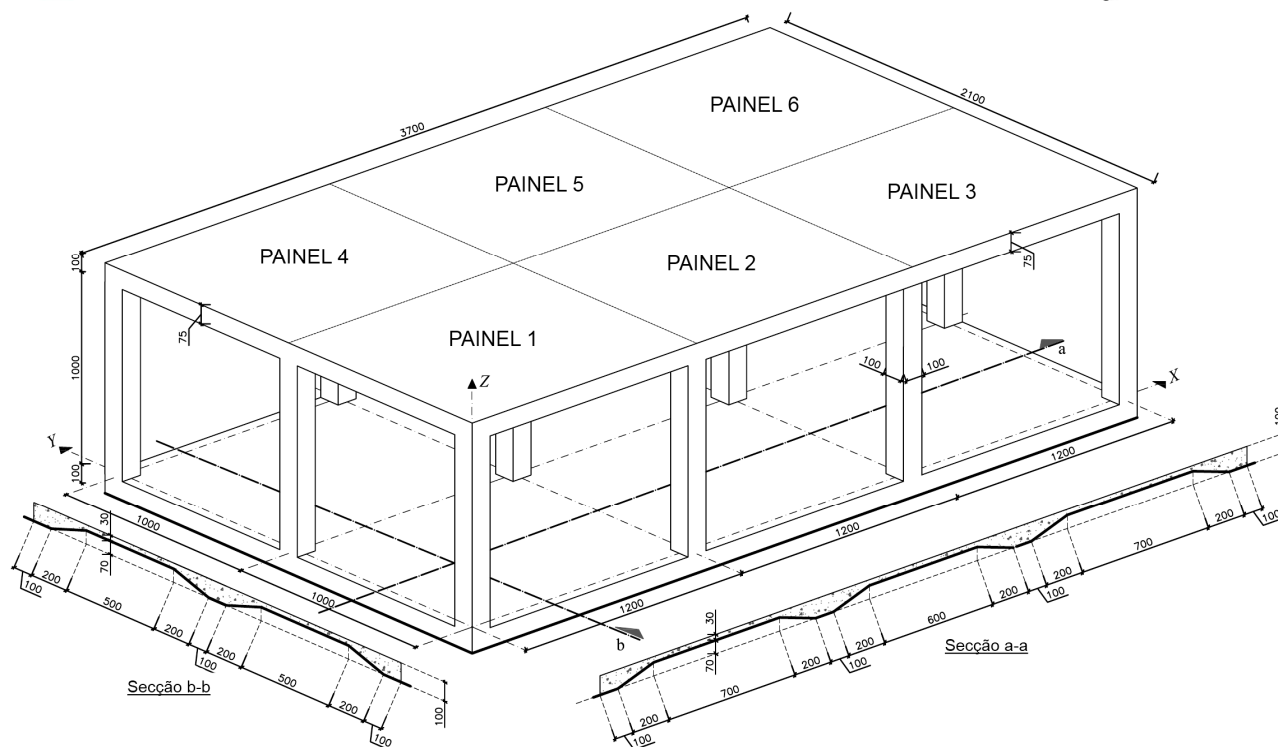


Figura 1 – Geometria do protótipo construído em BACRFA (dimensões em mm).

## 2 Propriedades do BACRFA desenvolvido

### 2.1 Composição

A composição do BACRFA utilizado na construção do protótipo encontra-se indicada na Tabela 1. Este BACRFA foi desenvolvido pela CiviTest e emprega  $90 \text{ kg/m}^3$  de fibras de aço de extremidades dobradas com um comprimento  $l_f$  de 37 mm, um diâmetro,  $d_f$ , de 0.5 mm e uma esbelteza,  $l_f/d_f$ , de 74. De acordo com o fabricante, esta fibra apresenta uma resistência à tração superior a 1100 MPa.

Tabela 1: Composição (por  $\text{m}^3$  de betão) de BACRFA aplicado no protótipo

Cimento (kg)	Água (kg)	Superplastif icante (kg)	Filer calcário (kg)	Cinzas Volantes (kg)	Areia fina de rio (kg)	Areia grossa de rio (kg)	Agregados grãos (kg)	Fibras (kg)
408	150	6.26	395	73	263	658	446	90

### 2.2 Propriedades

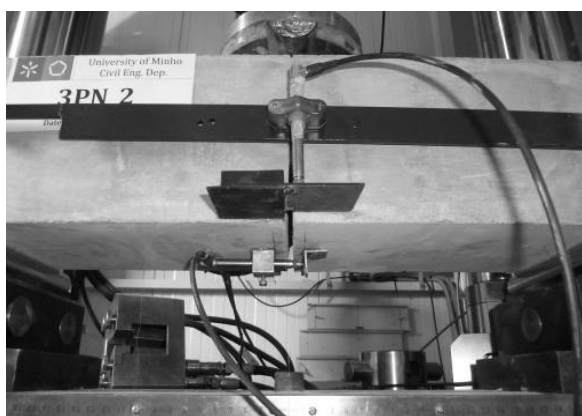
Dos ensaios de compressão realizados aos 28 dias com cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura [EN 206-1 (2000)] obteve-se uma resistência média à compressão de 65.96 MPa e um módulo de Young ( $E_c$ ) de 40.40 GPa. Segundo o MC2010 este BACRFA tem uma



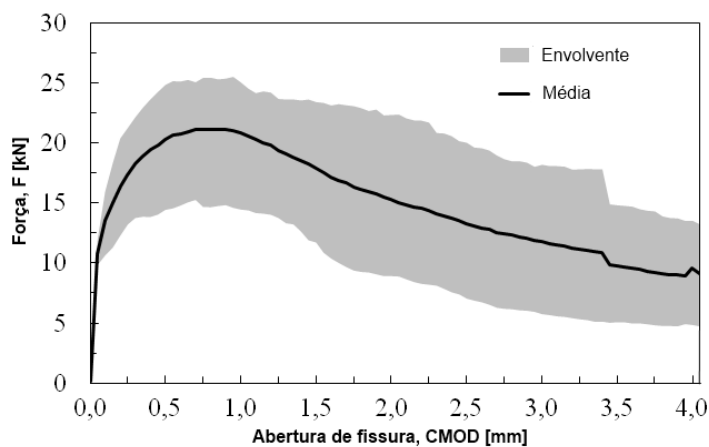
resistência média à tração de 4.30 MPa. O seu comportamento pós fendilhação foi determinado efetuando ensaios de flexão sob três pontos de carga com provetes entalhados de BACRFA, seguindo-se as recomendações do MC2010 (Figura 2a). Este teste fornece a relação entre a força ( $F$ ) aplicada e a abertura de fenda na boca do entalhe do provete (designada por CMOD – crack mouth opening displacement). Com base nas respostas  $F$ -CMOD é possível determinar as resistências residuais  $f_{Rj}$  para CMOD<sub>j</sub> de 0.5, 1.0, 1.5, 2.5 e 3.5 mm, parâmetros estes que caracterizam o comportamento pós-fendilhação do BRF:

$$f_{R,j} = \frac{3F_j L}{2bh_{sp}^2} \quad (1)$$

De acordo com o MC2010 o entalhe a ser executado nestas vigas deve ter 25 mm de profundidade. Todavia, dado o relativo elevado volume de fibras adotado nesta composição ( $V_f=1.1\%$ ), e de forma a limitar a propagação da fissura ao plano do entalhe, a profundidade do entalhe executado nas vigas ensaiadas foi de 60 mm. A envolvente e a curva média F-CMOD registada nos 6 provetes ensaiados encontram-se na Figura 2b, enquanto os valores médios de  $f_{Rj}$  estão apresentados na Tabela 2. Dado que foi necessário efetuar três amassaduras na construção do protótipo, foram preparados 6 provetes, dois por cada amassadura, o que pode ter contribuído para a elevada dispersão de resultados.



a)



b)

Figura 2: Ensaios sob três pontos de carga: a) Configuração do ensaio; b) Relações força- abertura de fenda.

Tabela 2: Parâmetros de resistência residual do BACRFA desenvolvido.

Abertura de fissura (mm)	Valor médio da resistência residual (MPa)
$CMOD_1 = 0.5$	$f_{R1m} = 11.99 (2.2)^*$
$CMOD_2 = 1.5$	$f_{R2m} = 10.34 (2.9)$
$CMOD_3 = 2.5$	$f_{R3m} = 7.28 (3.0)$
$CMOD_4 = 3.5$	$f_{R4m} = 5.52 (2.3)$

\* () Desvio padrão

### 3 Teoria das linhas de rotura

#### 3.1 Formulação

Nesta secção a formulação da teoria das linhas de rotura (TLR) aplicada a E-BRFA é brevemente descrita, encontrando-se a formulação detalhada descrita em outro trabalho [Salehian e Barros (2011)]. Para efeito de projeto deste tipo de estruturas, a capacidade de carga da laje pode ser estimada considerando-se os padrões de linhas de rotura que se podem formar em dois tipos de panos de laje (Figura 3): painel interior com continuidade nos seus bordos; painel de canto com os dois bordos de extremidade considerados simplesmente apoiados e os outros bordos com apoio de continuidade. Na Figura 3a representa-se o padrão de linhas de rotura (LR) que se forma na direção Y quando o painel é submetido a carga uniformemente distribuída por unidade de área ( $q_{sur}$ ). Na direção X o padrão de LR é concetualmente similar, mas a orientação das LR é paralela ao eixo X. Na Figura 3b ilustra-se o padrão de linhas de rotura que se forma quando um “ponto de carga”, distribuído na área relativamente pequena, atua num painel interior. Neste caso forma-se uma linha de rotura negativa (devido a momentos negativos, i.e., extensões de tração e de compressão na face superior e inferior da laje, respetivamente) com desenvolvimento circular centrada no ponto de carga.

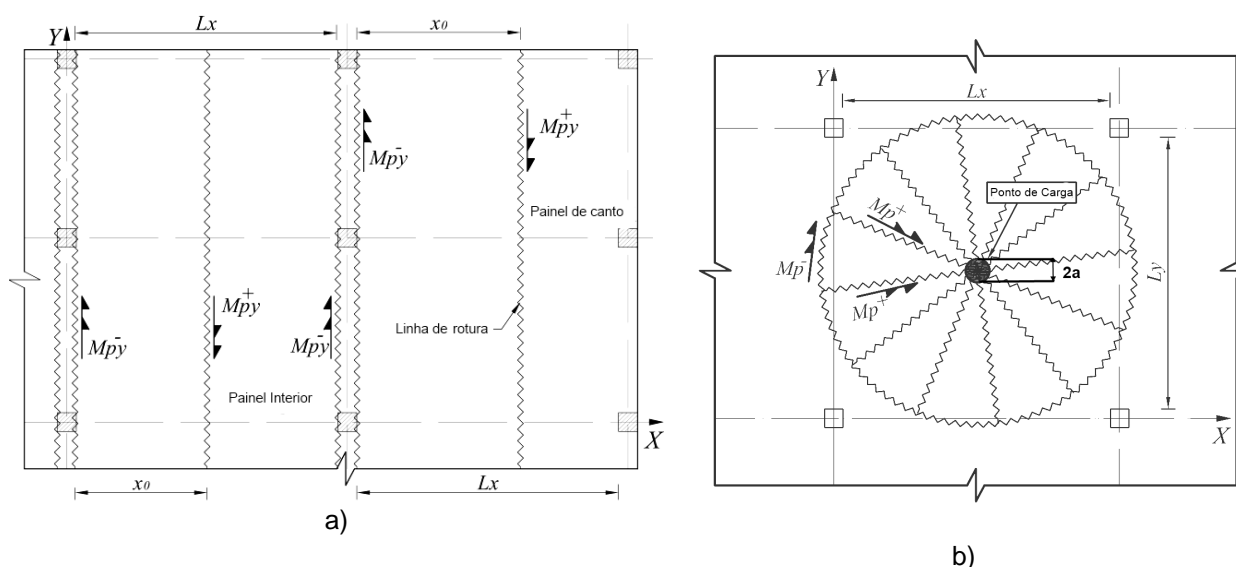


Figura 3: Padrão de linhas de rotura em lajes de BACRFA: a) sob carga uniformemente distribuída, b) sob carga concentrada.

Aplicando a teoria das linhas de rotura obtém-se as seguintes equações [Salehian e Barros (2011)]

$$M_{Py}^+ = \frac{q_{sur} \cdot L_x^2}{2(\sqrt{(1+\phi_h)} + 1)} \quad (\text{Painel de canto, carga distribuída}) \quad (2)$$

$$M_{py}^+ = \frac{q_{sur} \cdot L_x^2}{8(1 + \varphi_h)} \quad (\text{Painel interior, carga distribuída}) \quad (3)$$

$$M_p^+ = \frac{P_{poi} \cdot \left(1 - \frac{2}{3} \frac{a}{R}\right)}{2\pi(1 + \varphi_h)} \quad (\text{Carga pontual}) \quad (4)$$

em que  $\varphi_h$  é o cociente entre o momento plástico resistente negativo e positivo ( $M_{py}^- = \varphi_h M_{py}^+$ ), que, não havendo informação mais credível, pode ser assumido igual nas direções X e Y da laje. A investigação existente neste domínio revela existir uma tendência para um aumento da percentagem de fibras ao longo da profundidade da laje, principalmente quando o BRFA é aplicado com meios de compactação sob vibração [Barros e Antunes (2011)]. Caso se utilize BACRFA, dado não ser necessário recorrer a vibração para sua aplicação, uma maior uniformidade na distribuição das fibras é obtida ao longo da espessura da laje, pelo que  $\varphi_h$  é mais próximo do valor unitário quando se recorrer a BACRFA [Cunha (2010), Oliveira (2010)]. Na Equação (4),  $a$  é o raio da área equivalente onde a carga  $P_{poi}$  está aplicada, e  $R$  é o raio da LR negativa que pode ser obtida através de:

$$R = \sqrt{\frac{L_x L_y}{\pi}} \quad (5)$$

Para determinar o momento plástico resistente,  $M_p$ , duas metodologias podem ser usadas: i) recorrendo aos valores de  $f_{Rj}$  obtidos nos ensaios descritos na Secção 3.2, determina-se a lei constitutiva do BACRFA segundo as recomendações do MC2010 (2011), e por intermédio da utilização de um modelo de secção em camadas [Basto e Barros (2008)] determina-se a relação momento-curvatura da secção da laje; ii) utilizando os resultados obtidos em ensaios com painéis circulares de BACRFA e aplicando a TLR [Salehian e Barros (2011)]. Dado que na presente fase deste programa experimental os painéis circulares de BACRFA preparados ainda não foram ensaiados, será seguida a 1<sup>a</sup> metodologia. Assim, considerando os resultados obtidos nos ensaios das vigas entalhadas sob três pontos de carga (Tabela 2), e adotando a formulação proposta pelo MC2010 (2011), foram obtidas as leis constitutivas representadas na Figura 4, a primeira (Figura 4a) no caso de se utilizarem os valores médios de  $f_{Rj}$ , e a segunda (Figura 4b) caso se opte por valores de cálculo.

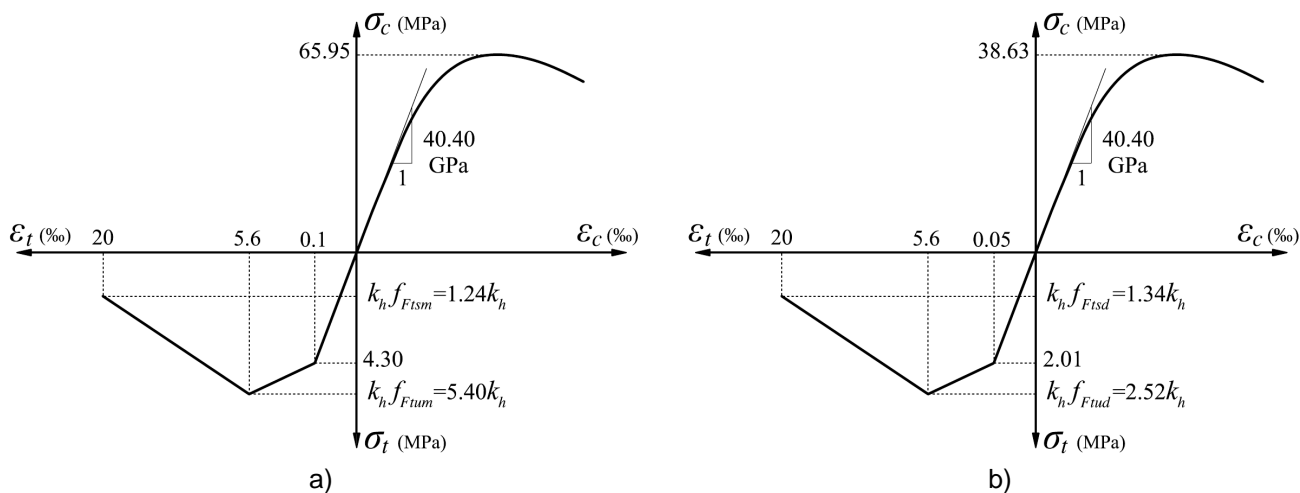


Figura 4: Leis constitutivas para o BACRFA desenvolvido, adotando para  $f_{Rj}$  valores: a) médios, b) cálculo.

Utilizando estas leis constitutivas no programa de cálculo automático DOCROS [Basto e Barros (2008)], a influência da espessura da laje,  $h$ , no valor do momento plástico,  $M_p$ , foi obtida quando se utiliza por valores médios e de cálculo para a caracterização dessas leis (Figura 5).

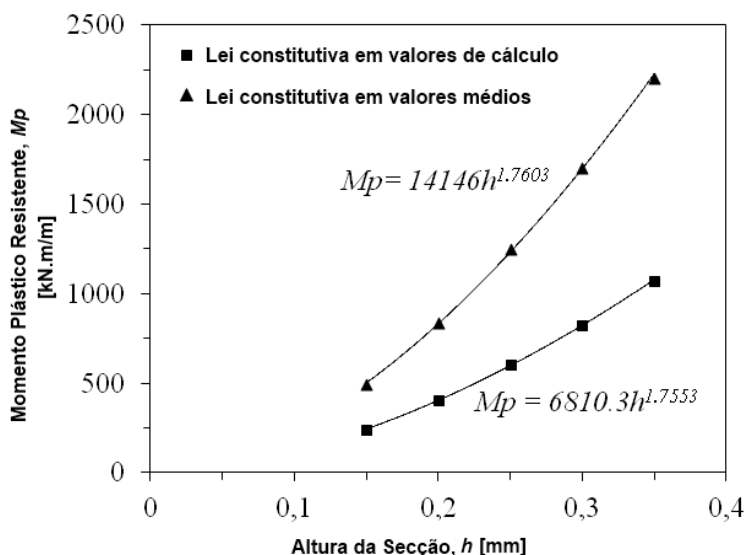


Figura 5: Variação do momento plástico resistente positivo com a altura da secção transversal da laje.

### 3.2 Desempenho do modelo

Para avaliar o desempenho do modelo baseado na TLR aplicado a E-BRFA, a carga última prevista segundo a aplicação da Equação (4) vai ser comparada com os resultados obtidos em dois ensaios com protótipos de E-BRFA de escala real, um executado em



Bissen, Luxemburgo [Espion (2004)], e o outro em Tallinn, na Estónia [Mandl (2008)]. A estrutura ensaiada em Bissen consiste numa laje de BRFA de 0.20m de espessura e 3 vãos de 6.0m cada em ambas as direções X e Y, apoiada em pilares de secção quadrada de 0.3m de lado e 2m de altura livre. A estrutura ensaiada em Tallinn consiste numa laje de BRFA de 0.18m de espessura e 3 vãos de 5.0m cada em ambas as direções X e Y, apoiada em pilares de secção quadrada de 0.3m de lado e 2m de altura livre. Em ambas as estruturas foi utilizado um betão de classe de resistência C30/37 reforçado com 100 kg/m<sup>3</sup> de fibras de aço (TABIX 13/50) de 1.3 mm de diâmetro e 50 mm de comprimento e com 850 MPa de resistência à tração. Em ambas as estruturas foram também aplicados 3 varões de aço de 16 mm na face inferior da laje, nos alinhamentos dos pilares em X e em Y (armadura de anti colapso progressivo). Ambas as lajes foram submetidas a um ponto de carga num painel interior. A área carregada não é indicada nos trabalhos consultados, mas a partir das fotografias existentes nesses trabalhos a área solicitada parece ser quadrada com cerca de 0.3 m de lado. A Figura 6 representa a relação entre a força aplicada e a flecha sob a carga. Dado que a única informação disponível sobre a caracterização do BRFA é a sua classe de resistência (C30/37), o momento plástico resistente será avaliado considerando para definição da lei constitutiva deste BRFA os valores de cálculo obtidos para o BACRFA desenvolvido para o protótipo (Figura 4b). Este é julgado um procedimento aceitável, dado que o valor de cálculo da resistência à compressão,  $f_{cd}$ , do BACRFA do protótipo é similar ao valor médio da resistência à compressão,  $f_{cm}$ , do BRF aplicado naquelas duas estruturas. Para além disto, nestas duas estruturas a quantidade de fibras (100 kg/m<sup>3</sup>) foi ligeiramente superior à quantidade empregue no BACRFA do protótipo (90 kg/m<sup>3</sup>), mas neste último caso as fibras têm maior esbelteza, maior resistência à tração e melhores condições de ligação à pasta envolvente (fibras de extremidades dobradas; e pasta de maior resistência). Na Figura 6 as linhas a tracejado representam a carga pontual de rotura prevista segundo a aplicação da TLR (Equação (4)), podendo-se concluir que a formulação prevê com elevado rigor os resultados registados experimentalmente.

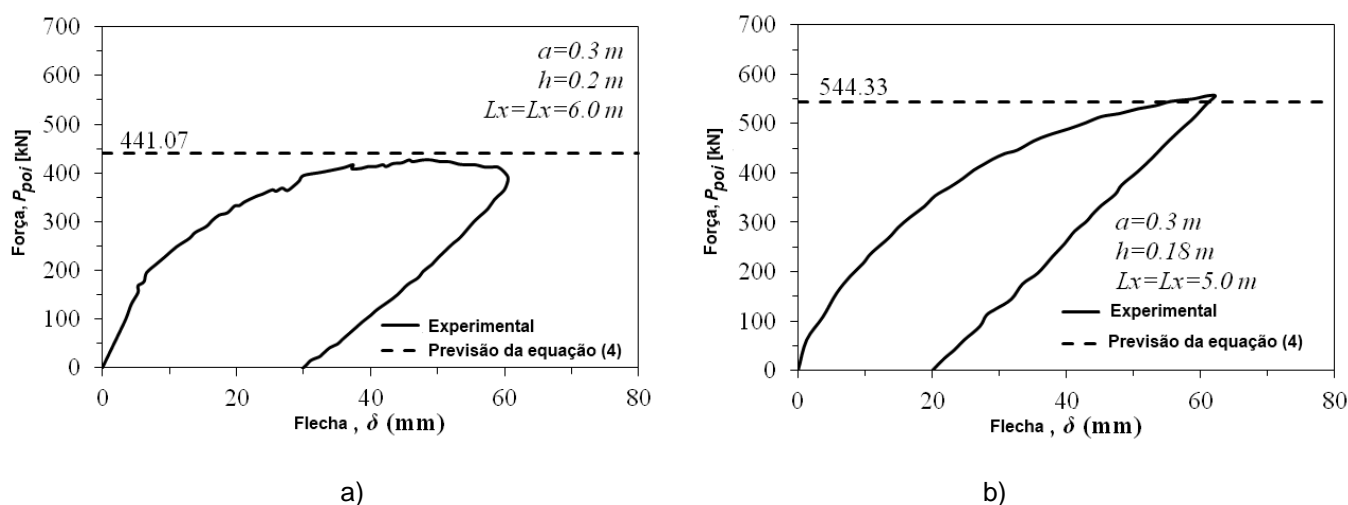


Figura 6: Relação força-flecha para lajes de BRFA submetidas a carga pontual no ensaio realizado em: a) Bissen [Espion (2004)], b) Tallinn [Mandl (2008)].

### 3.3 Estudos paramétricos

Nos estudos paramétricos realizados nesta secção a equação  $M_{pd} = 6810h^{1.755}$  indicada na Figura 5 foi utilizada para a avaliação do valor de cálculo do momento plástico resistente,  $M_{pd}$ . A influência da espessura da laje ( $h$ ) e do seu vão ( $L$ ) na máxima carga distribuída uniformemente por unidade de área possível de aplicar num painel de canto,  $q_{sur.}$ , e no máximo valor de “carga pontual” (distribuída numa área de  $0.3 \times 0.3 \text{ m}^2$ ),  $P_{poi.}$ , encontra-se representada na Figura 7a e 7b, respetivamente, tendo-se adotado  $\phi_h = 1.0$ . A Figura 7a revela a grande influência de  $h$  e  $L$  na  $q_{sur.}$ , enquanto, tal como esperado, o vão da laje tem reduzida influência no  $P_{poi.}$  que pode ser aplicado à laje (Figura 7b). No entanto,  $P_{poi.}$  aumenta significativamente com  $h$ . A máxima carga distribuída por unidade de área é a combinação das cargas permanentes, tais como o peso próprio,  $W_G$ , e outras cargas com carácter permanente ( $q_{PL}$ ), e a carga variável,  $q_{LL}$ :

$$q_{sur.} = \lambda_{PL} q_{PL} + \lambda_{LL} q_{LL} = \lambda_{PL} (W_G + q_{PL}) + \lambda_{LL} q_{LL} \quad (7)$$

em que  $\lambda_{PL}$  e  $\lambda_{LL}$  são fatores de majoração das ações permanentes e variáveis, respetivamente, cujos valores são prescritos pelos códigos de projeto de estruturas. Para o presente estudo considerou-se que a E-BRFA tem espessura  $h=0.2\text{m}$ ,  $q_{PL}=1.5 \text{ kN/m}^2$ ,  $\lambda_{PL}=1.35$ ,  $\lambda_{LL}=1.5$ ,  $W_G=0.2 \times 25 \text{ kN/m}^3=5.0$ , pelo que se obtém para  $q_{sur.}$  os valores de 7.42, 13.2 e 29.69  $\text{kN/m}^2$  para  $L_x = 8, 6$  e  $4\text{m}$ , respetivamente (Figura 7a). Se estes valores forem substituídos na Equação (7) verifica-se que não é possível construir uma laje de 8 m de vão com este BRFA (um valor negativo é obtido para  $q_{LL}$ ), enquanto para as lajes de  $L_x = 6\text{m}$  e  $L_x = 4\text{m}$  é possível aplicar um  $q_{LL}$  de 2.95 e 13.85  $\text{kN/m}^2$ , respetivamente.

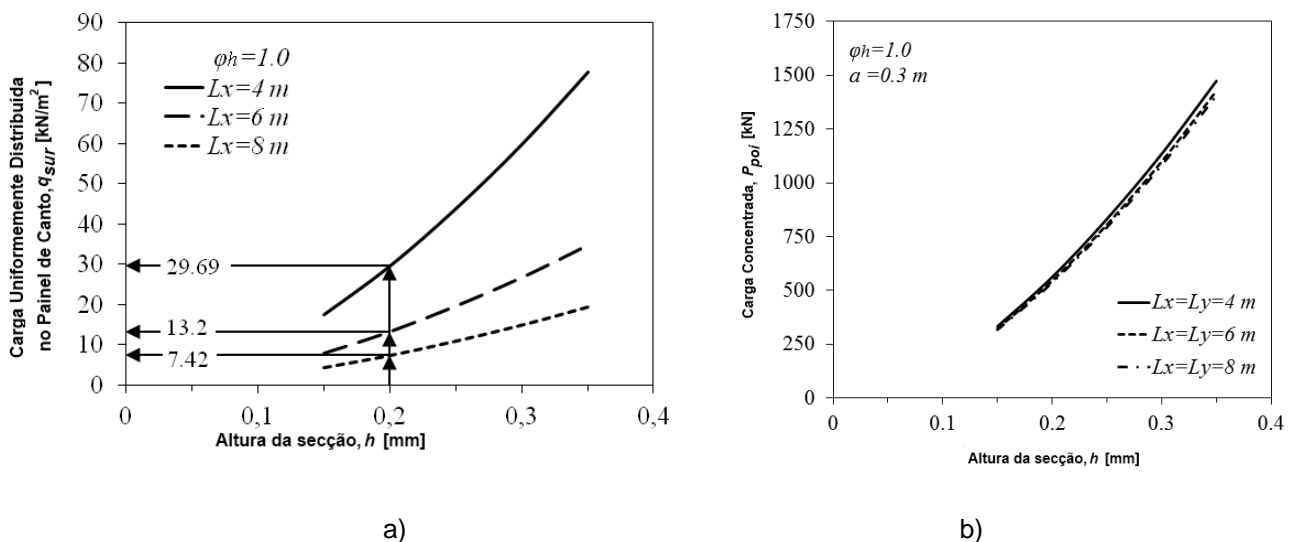


Figura 7: Influência da altura da secção transversal e do vão da laje de BRFA na capacidade de carga para os seguintes carregamentos: a) carga uniformemente distribuída no painel de canto; b) carga concentrada.

A influência do  $\phi_h$  num sistema estrutural de E-BRFA de 6m de vão e com diferentes espessuras de laje encontra-se representada na Figura 8a e 8b para o caso de carga uniformemente distribuída por unidade de superfície num painel de canto e para carga pontual, respetivamente. Ambos os gráficos revelam que  $q_{sur.}$  e  $P_{poi.}$  diminuem com o aumento de  $\phi_h$ , e a tendência de decréscimo é similar em ambos os tipos de carregamento. Para o exemplo de E-BRFA de  $h=0.25$  m,  $L_x=6.0$  m,  $q_{PL}=1.5$  kN/m<sup>2</sup>,  $\lambda_{PL}=1.35$ ,  $\lambda_{LL}=1.5$ ,  $W_G=0.25 \times 25$  kN/m<sup>3</sup> = 6.25 kN/m<sup>2</sup>, quando o  $\phi_h$  diminui de 1.0 para 0.6  $q_{sur.}$  diminui de 26.83 para 21.46 kN/m<sup>2</sup>. Se estes valores forem substituídos na Equação (7) obtém-se os seguintes valores para  $q_{LL}$ : 10.91 e 7.33 kN/m<sup>2</sup>. Dado que o BACRFA garante valores de  $\phi_h$  mais elevados do que o BRFA convencional, o maior custo do BACRFA pode ser compensado pela redução na espessura da laje, aumento do vão da laje, ou aumento da sobrecarga que pode ser aplicada.

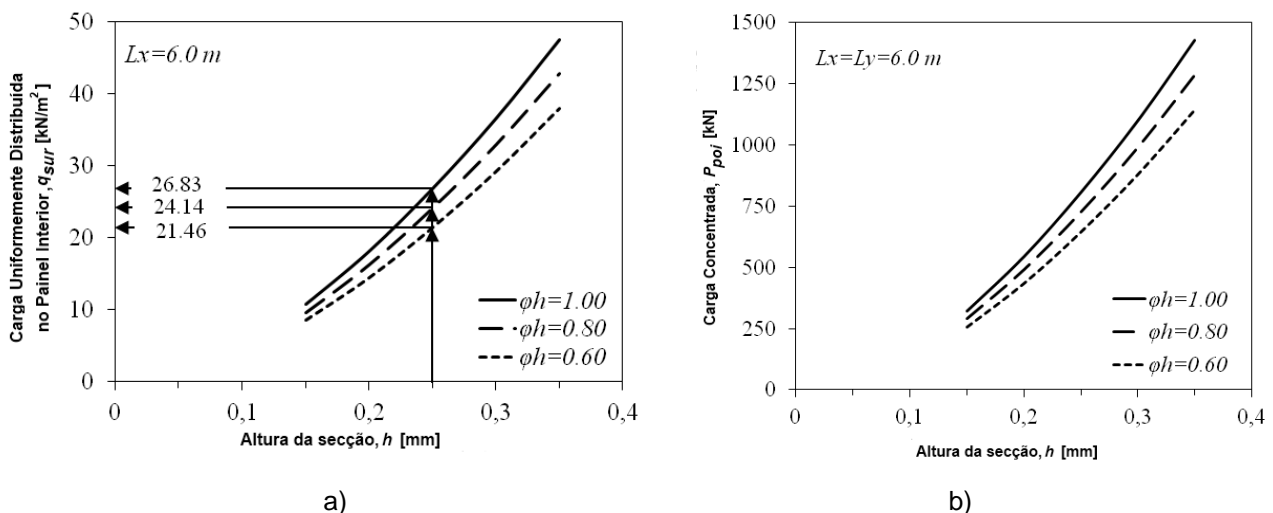


Figura 8: Influência da altura da secção transversal e do fator  $\phi_h$  na capacidade de carga de lajes de BRFA para os seguintes carregamentos: a) carga uniformemente distribuída no painel interior; b) carga concentrada.

## 4 Construção e ensaios preliminares do protótipo

### 4.1 Construção

Nesta secção são descritos os principais passos adotados na construção de protótipo de edifício à escala  $\frac{1}{4}$ , cuja geometria se encontra descrita na Figura 1. Os máximos deslocamentos verticais da laje para carregamentos correspondentes a estados limites de utilização são também apresentados. As principais fases do processo construtivo estão indicadas na Figura 9. As propriedades do BACRFA aplicado na construção desta estrutura foram apresentadas no Capítulo 2. Dez dias antes da betonagem da laje térrea, foi aplicada sobre o solo uma camada de 0.15m de betão simples de baixa resistência de forma a regularizar as condições de apoio da laje térrea de BACRFA e garantir a



geometria pretendida para esta laje (ver Figura 1). De facto, a geometria desta laje foi otimizada executando simulações não linear material com interação solo estrutura através do programa baseado no método dos elementos finitos: FEMIX V4.0. Assim, no alinhamento dos pilares existe uma grelha com uma espessura constante de 0.1m na largura dos pilares, havendo depois uma zona de variação linear de espessura de 0.1m a 0.03m, que se mantém constante na parte central da laje. Esta variação suave de espessura da laje promove a formação de padrão difuso de fendas nos painéis da laje, evitando a localização de macro fendas na transição entre a grelha e os painéis de laje, caso se optasse por uma variação brusca de espessura entre estes dois tipos de elementos. Na segunda fase do processo construtivo foram betonados os pilares com BACRFA, os quais dispunham de 4 varões de aço de 6 mm de diâmetro, sem qualquer armadura convencional de resistência ao corte e/ou confinamento do betão. Devido ao relativo elevado comprimento das fibras (35mm) face ao pequeno comprimento do lado da secção quadrada dos pilares ( $0.1 \times 0.1 \text{ m}^2$ ) e face à reduzida espessura de recobrimento das armaduras dos pilares (cerca de 10mm), foi necessário proceder à aplicação do BACRFA nos pilares sob vibração. Finalmente foi betonada a laje elevada em BACRFA de 0.075m de espessura, a qual não levou qualquer tipo de armadura convencional.

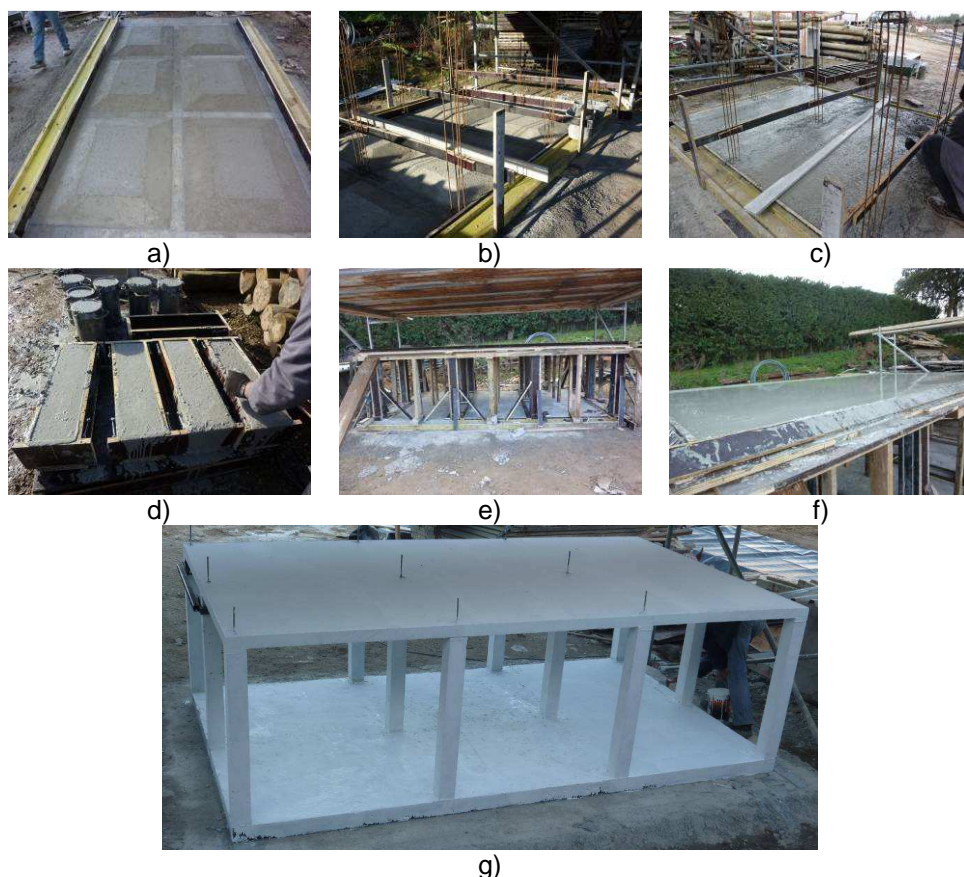


Figura 9: Construção do protótipo: a) Preparação da fundação para a laje de BACRFA apoiada em solo; b) Armaduras dos pilares; c) betonagem da laje apoiada em solo (1ª amassadura); d) Enchimentos dos provetes; e) Betonagem dos pilares (2ª amassadura); f) Betonagem da laje elevada; g) Aspetto final do protótipo após ter sido pintado.

## 4.2 Primeira fase do programa de ensaios

A primeira fase do programa de ensaios do protótipo construído pretende avaliar o comportamento da laje quando submetida a carregamentos correspondentes a estados limites de serviço de edifícios de habitação e comércio. Neste contexto, admitindo-se para  $q_{PL}=1.5 \text{ kN/m}^2$  e  $q_{LL}=2.0 \text{ kN/m}^2$  resulta  $q_{sur.}=3.5 \text{ kN/m}^2$ . Esta carga uniformemente distribuída,  $q_{sur.}$ , foi materializada pela introdução de água em tanques de  $1\text{m}^3$  de capacidade e  $1.1 \times 1.0 \text{ m}^2$  de área, instalados sobre os painéis a serem solicitados (Figura 10a). Uma grelha de perfis metálicos, ligada nas extremidades superiores dos pilares (Figura 10b), foi utilizada para instalação de oito transdutores de deslocamentos (LVDTs) para medir os deslocamentos verticais da laje nos pontos indicados na Figura 10c. O carregamento desta fase foi composto pelos seguintes passos: o painel 2 foi primeiramente carregado com  $q_2=2.09 \text{ kN/m}^2$  ( $0.24 \text{ m}^3$  de água) à razão de  $5\text{N/s}$ ; no segundo passo a carga no painel 2 foi aumentada à razão de  $3\text{N/s}$  até  $q_2=3.51 \text{ kN/m}^2$ ; no terceiro e quarto passo o tanque no painel 3 foi enchido até  $q_3=2.30 \text{ kN/m}^2$  e  $q_3=3.73 \text{ kN/m}^2$ , respetivamente.

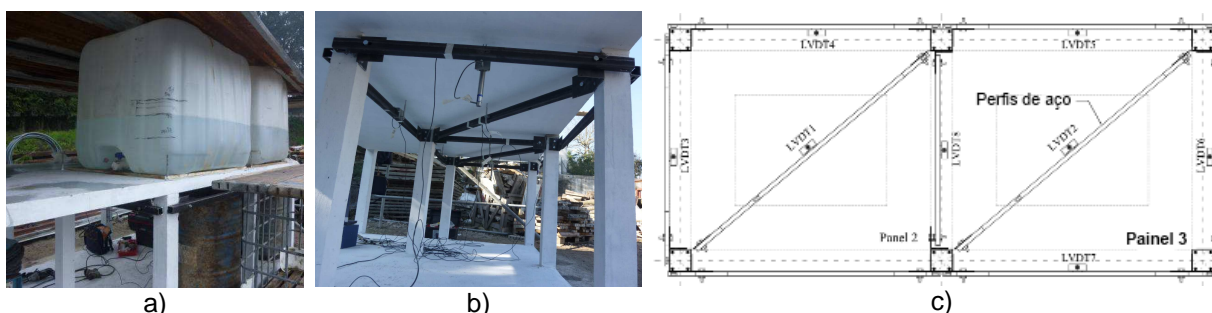


Figura 10: Configuração de ensaio: a) Tanque de água utilizado para materializar a carga, b) Estrutura em aço de apoio aos LVDTs, c) Designação e posição dos LVDTs.

A Figura 11 representa a relação entre a carga aplicada e os deslocamentos registados no centro dos painéis 2 e 3 pelos LVDT1 e LVDT2, respetivamente, durante os quatro passos do carregamento. Nestes gráficos também se inclui a relação carga-flecha prevista pelas simulações numéricas, encontrando-se os correspondentes campos de deslocamentos verticais representados na Figura 12. Notar que a variação de temperatura nos perfis da grelha de suporte dos LVDTs e na laje não foi medida, a qual poderá justificar as irregularidades dos deslocamentos medidos durante estas fases do carregamento, em que os valores registados são muito baixos. Não sendo conhecida essa variação de temperatura não foi considerada nas simulações numéricas. Tal como era expectável, para carregamentos correspondentes a estados limites de utilização o comportamento da estrutura é iminente linear sem formação de qualquer fenda. A E-BACRFA foi simulada por elementos finitos de 8 nós de casca plana (teoria de Reissner-Mindlin) com integração de Gauss-Legendre (G-L) de  $2 \times 2$  pontos de integração (PI), enquanto os pilares e a laje apoiada em solo foi simulada por elementos de volume de 20 nós com  $2 \times 2 \times 2$  PI.



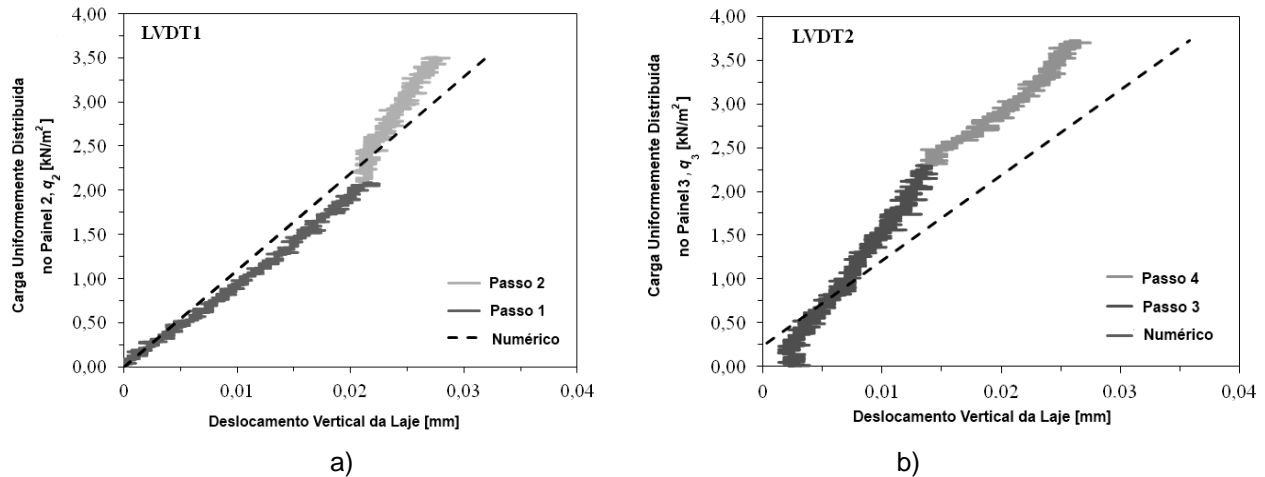


Figura 11: Resposta experimental e numérica entre a carga aplicada e a flecha a meio vão da: a) laje 2; e b) laje 3.

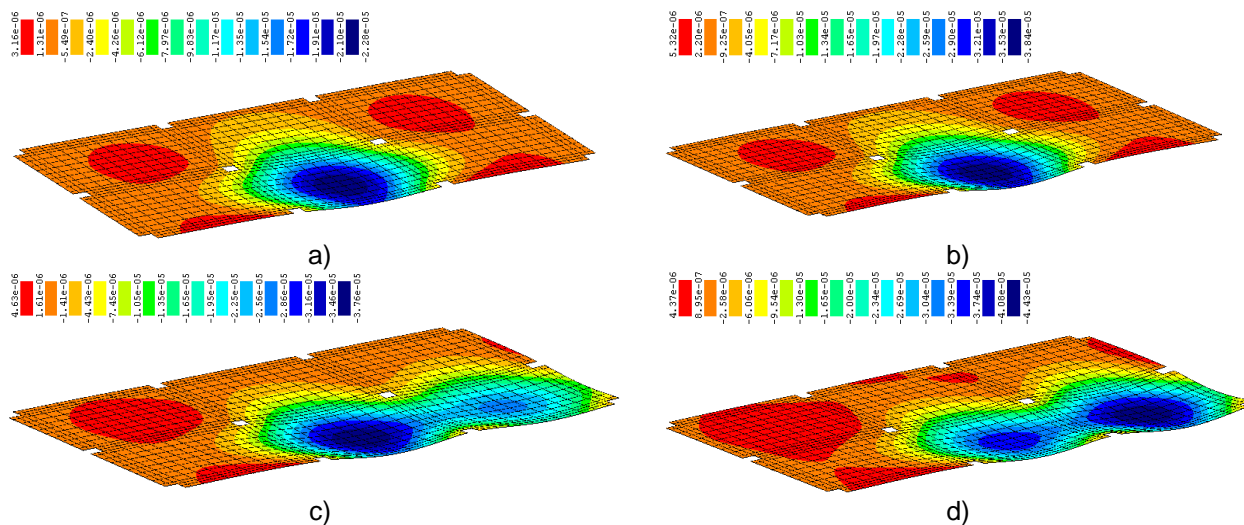


Figura 12: Representação do campo de deslocamentos verticais (m) na laje do protótipo para os quarto passos do processo de carregamento: a) 1º; b) 2º; c) 3º e d) 4º. (unidades em m)

## 5 Conclusões

Neste trabalho foi apresentada uma formulação baseada na teoria das linhas de rotura (TLR) para o dimensionamento de lajes elevadas (apoiadas em pilares) em betão reforçado com fibras de aço (E-BRFA). A boa capacidade preditiva desta formulação foi comprovada utilizando resultados experimentais de ensaios com protótipos de escala real recentemente executados. Executando estudos paramétricos com esta formulação foi avaliada a influência da espessura e do vão da E-BRFA na sua capacidade de carga, tendo-se efetuado alguns exemplos demonstrativos neste contexto. Dado existir a tendência para um aumento da percentagem de fibras ao longo da espessura da laje, foi

introduzido na formulação um parâmetro que pretende ter em conta este efeito. Este efeito foi demonstrado em termos da sua influência na capacidade de carga da E-BRFA, através da execução de estudos paramétricos. A tendência para um aumento da percentagem de fibras ao longo da espessura da laje é maior quando o BRFA é aplicado sob vibração do que no caso em que se utiliza betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (BACRFA). Assim, no presente trabalho foi desenvolvido um BACRFA com propriedades apropriadas para a construção de edifícios de habitação e comércio baseados no conceito de E-BRFA. As propriedades relevantes deste BACRFA foram determinadas experimentalmente seguindo as recomendações do Model Code 2010. Este BACRFA foi utilizado na construção de um protótipo à escala  $\frac{1}{4}$  de um edifício de habitação e/ou comércio, e o seu comportamento foi avaliado para carregamentos correspondentes a estados limites de utilização. Com este protótipo serão efetuados ensaios de fluência sob distintos níveis de carga, e na fase final do projeto a capacidade de carga do protótipo será determinada por ensaios à rotura.

## 6 Agradecimentos

Este trabalho resulta da investigação no âmbito do programa SlabSys-HFRC, PTDC/ECM/120394/2010, financiado pela FCT. Os autores expressam o seu agradecimento às empresas: CASAIS pela execução do protótipo; CiviTest pela conceção e execução do BACRFA; Maccaferri e RADMIX™ pelas fibras aplicadas, e Secil e Sika pelo fornecimento do cimento e superplastificante, respetivamente.

## 7 Referências

- X. DESTRÉE, **Structural application of steel fibres as only reinforcing in free suspended elevated slabs: conditions – Design examples.** Sixth RILEM Symposium on fibre reinforced concrete Varenna/Italy, 2, 1073-1082, (2004).
- M. SASANI AND S. SAGIROGLU, **Progressive collapse of reinforced concrete structures: a multihazard perspective.** ACI Structural J., 105(1), 96-105, (2008).
- J.A.O. Barros, A.V. Gouveia, J.M. Sena-Cruz, A.F.M. Azevedo, and J.A.B. ANTUNES, **Design methods for steel fibre reinforced concrete industrial floors.** Third Int. Conf. Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications, CD, Vancouver, Canada (2005).
- H. SALEHIAN, J.A.O., BARROS, **Design of elevated steel fibre reinforced self-compacting concrete slabs.** Technical report 11-DEC/E-30, Department of Civil Engineering, School Engineering, University of Minho (2011).

**Model Code 2010.** Final draft, fib, (2011).



- J.A.O. BARROS AND J.A.B. ANTUNES, **Experimental characterization of the flexural behaviour of steel fibre reinforced concrete according to RILEM TC 162-TDF recommendations.** RILEM TC 162 TDF Workshop, 77-89, (2003).
- V.M.C.F CUNHA, **Steel fibre reinforced self-compacting concrete: from micro-mechanics to composite behavior.** PhD Thesis, University of Minho, Guimaraes, Portugal, (2010).
- F.L, OLIVEIRA, **Design-oriented constitutive model for steel fibre reinforced concrete.** PhD Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain (2010).
- EN 206-1, **Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity.** European standard, CEN, 69 , (2000).
- M. TAHERI, J.A.O. BARROS, H. SALEHIAN, **A design model for strain-softening and strain-hardening fibre reinforced elements reinforced longitudinally with steel and FRP bars.** Composites - Part B J., 42, 1630-1640, (2011).
- C.A.A., BASTO AND J.A.O., BARROS, **Numeric simulation of sections submitted to bending.** Technical report 08-DEC/E-46, Department of Civil Engineering, School Engineering, University of Minho, Guimaraes, Portugal, (2008).
- L. VANDEWALLE ET AL., **Test and design methods for steel fibre reinforced concrete –  $\sigma$ - $\epsilon$  design method - Final Recommendation.** Materials and Structures, 36(262), 560-567, (2003).
- B. ESPION, **Test report n°33396.** University of Brussels, Belgium, (2004).
- J. MANDL, **Flat slabs made of steel fibre reinforced concrete (SFRC).** CPI worldwide, 1, (2008).