

**3º Congresso Ibéroamericano sobre betão auto-compactável**  
**Avanços e oportunidades**  
*Madrid, 3 e 4 de Dezembro de 2012*

**Edifícios de Habitação e Comércio Em Lajes Fungiformes  
de Betão Auto-compactável Reforçado Com Fibra de Aço**  
*Residential and commercial buildings of elevated steel fibre  
reinforced self-compacting concrete slabs*

**Joaquim Barros**

Professor Catedrático, ISISE – Universidade do Minho.

**Hamidreza Salehian**

Estudante de Doutoramento em Eng<sup>a</sup> de Estruturas, ISISE – Universidade do Minho.

**Miguel Pires**

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

**Delfina Gonçalves**

CiviTest – Pesquisa de Novos Materiais para a Engenharia Civil Lda. – Vila Nova de Famalicão, Portugal.

**RESUMO**

Um protótipo à escala 1/4 de um sistema construtivo de laje de betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (BACRFA) apoiada em pilares foi construído e vem sendo testado de modo a avaliar o seu comportamento face a estados limites de utilização (flecha instantânea e de longo prazo, largura e espaçamento de abertura de fendas). As propriedades do BACRFA foram avaliadas a partir de ensaios de flexão em provetes entalhados, com objetivo de discutir a adequação dos modelos constitutivos derivados dos resultados dos testes, no contexto do dimensionamento deste tipo de estruturas. Foram realizadas simulações, recorrendo à teoria das linhas de rotura e ao método dos elementos finitos com base na análise não linear do material, sendo os resultados comparados com os ensaios realizados.

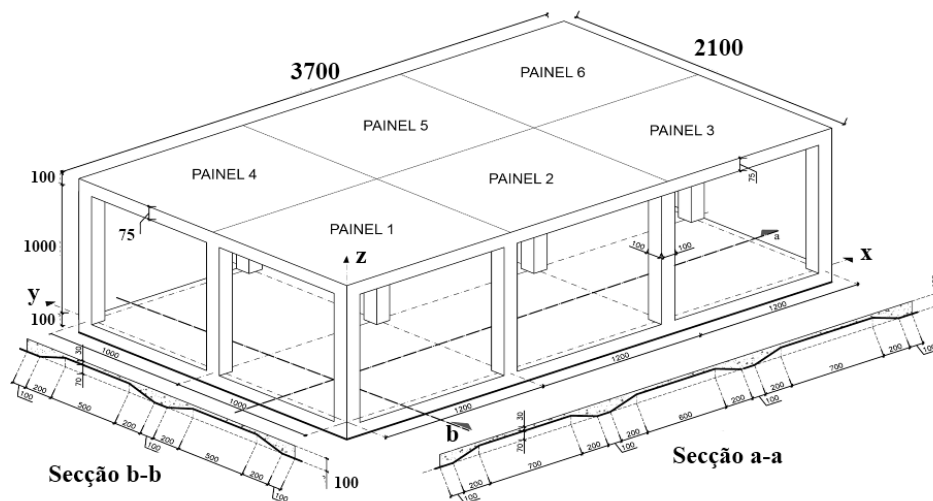
**PALAVRAS-CHAVE:** Betão Reforçado com Fibras, Lajes Elevadas, Teoria das Linhas de Rotura

**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

**3º Congresso Ibéroamericano sobre betão auto-compactável**  
**Avanços e oportunidades**  
**Madrid, 3 e 4 de Dezembro de 2012**

explorada a utilização de betão reforçado com fibras de aço (BRFA) para a construção deste tipo de estrutura [10]. 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 [6]. A teoria das linhas de rotura (TLR) tem sido muito utilizada no projeto de lajes de BRFA apoiadas em solo [4]. Recentemente, uma formulação baseada na TLR foi desenvolvida para o projeto de lajes E-BRFA [3]. Para determinar o momento resistente plástico da secção da E-BRFA, a lei constitutiva do BRFA é definida por intermédio das recomendações do Código Modelo da *fib* (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 foi recentemente demonstrado [2]. 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 [5]. Para simular este efeito foi introduzido um fator na formulação desenvolvida, e a sua influência na capacidade de carga deste tipo de estrutura foi avaliada [2]. 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 [9]. 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 1/4, cuja geometria se descreve na Figura 1.



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

**3º Congresso Ibéroamericano sobre betão auto-compactável**  
**Avanços e oportunidades**  
**Madrid, 3 e 4 de Dezembro de 2012**

A laje elevada em BACRFA (E-BACRFA), de comprimento×largura×espessura 3.7×2.1×0.075 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. Um conjunto de ensaios com carga distribuídas nos painéis desta estrutura tem vindo a ser executados para avaliar a flecha instantânea e a longo prazo deste tipo de estrutura. Os resultados mais relevantes são apresentados e discutidos no presente trabalho.

## 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 empresa CiviTest e inclui 90 kg/m<sup>3</sup> de fibras de aço de extremidades dobradas com comprimento  $l_f$  de 37 mm, diâmetro,  $d_f$ , de 0.5 mm e 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 m<sup>3</sup>) de BACRFA aplicado no protótipo**

Cimento	Água	Super plastificante	Filer calcário	Cinzas Volantes	Areia fina de rio	Areia grossa de rio	Agregados graúdos [d <sub>max</sub> -12mm]	Fibras
[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]
408	150	6.26	395	73	263	658	446	90

### 2.2 Propriedades

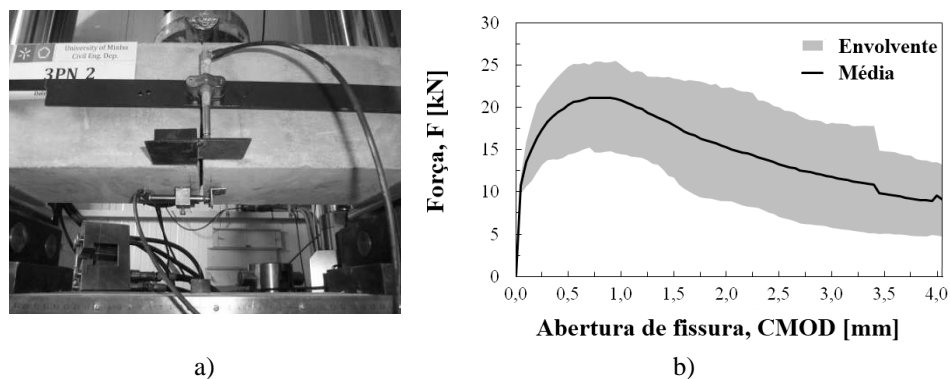
Dos ensaios de compressão realizados aos 28 dias com cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura [1] obteve-se uma resistência média à compressão de 65.96 MPa e um valor médio de módulo de elasticidade ( $E_c$ ) de 40.40 GPa. Segundo o MC2010 este BACRFA tem uma resistência média à tração de 4.30 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, as quais caracterizam o comportamento pós-fendilhação do BRF:

$$f_{R,j} = \frac{3 F_j L}{2 b h_{sp}^2} \quad \text{Eq.(1)}$$

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

**3º Congresso Ibéroamericano sobre betão auto-compactável**  
**Avanços e oportunidades**  
**Madrid, 3 e 4 de Dezembro de 2012**

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: Ensaio 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. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO E ENSAIOS

#### 3.1 Construção e modelo numérico

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. 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

**3º Congresso Ibéroamericano sobre betão auto-compactável**  
**Avanços e oportunidades**  
**Madrid, 3 e 4 de Dezembro de 2012**

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.

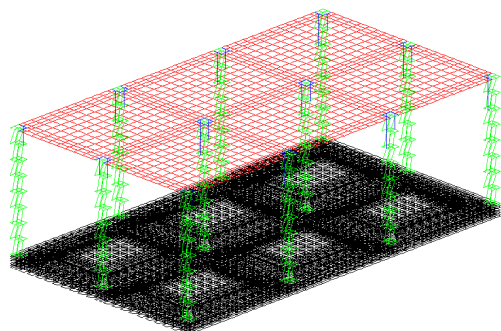
A simulação numérica do comportamento deste protótipo foi efetuada por intermédio do software de elementos finitos, FEMIX V4.0, encontrando-se a malha de elementos finitos representada na Figura 3. Para tal, a laje E-BACRFA foi discretizada em elementos de 8 nós de casca de Reissner-Mindlin, tendo sido utilizado um esquema de integração de Gauss-Legendre (G-L) de  $2 \times 2$  pontos. Por sua vez os pilares e a laje apoiada em solo foram simulados por elementos de volume de 20 nós com integração G-L de  $2 \times 2 \times 2$  pontos. Para assegurar continuidade na ligação entre os pilares e a laje elevada foram utilizados elementos de barra 3D de Timoshenko com  $1 \times 3$  pontos de integração. Uma rigidez de flexão relativamente elevada foi atribuída a estes elementos de barra de forma a assegurar a continuidade entre pilares e laje.

### **3.2 Programa de ensaios**

Numa primeira fase, o painel de canto representado na Figura 1 foi solicitado por carga uniformemente distribuída crescente. Esta carga foi materializada por paletes de sacos de cimento, garantindo cada palete uma carga de aproximadamente  $6 \text{ kN/m}^2$  (Figura 5). Duas camadas de barrote de madeira, com orientações ortogonais nas duas camadas, foram aplicadas diretamente sobre a laje de forma a materializar, o mais possível, condições de carga uniformemente distribuída (Figura 5). Os deslocamentos instantâneos foram registados por intermédios de transdutores eletrónicos de deslocamento (LVDTs), enquanto os deslocamentos a longo prazo (devidos a fluência do betão) foram determinados por recurso a comparadores mecânicos. Ambos os tipos de sensores ficaram apoiados em estrutura concebida para registar apenas a deformação da laje (Figura 4). Numa primeira fase esta estrutura era constituída por perfis de aço, tendo sido mais tarde substituída por perfis de compósito em fibra de vidro, de forma a minimizar o registo de flecha pelos LVDTs em consequência da deformação desta estrutura devido a variações de temperatura. As leituras de deslocamentos ao longo do tempo foram complementadas com o registo da temperatura e humidade junto ao sensor de deslocamento.

Na Figura 5 representa-se os diversos patamares de carga/descarga executados. Um dado patamar de carga/descarga apenas era executado após as condições de estabilização de deformação indicadas na MOPU (1988) terem sido alcançadas no patamar de carga anterior.

**3º Congresso Ibéroamericano sobre betão auto-compactável**  
**Avanços e oportunidades**  
**Madrid, 3 e 4 de Dezembro de 2012**



**Figura 3 – Malha de elementos finitos adotada nas simulações numéricas**



**Figura 4 – Estrutura de suporte dos transdutores de deslocamentos**

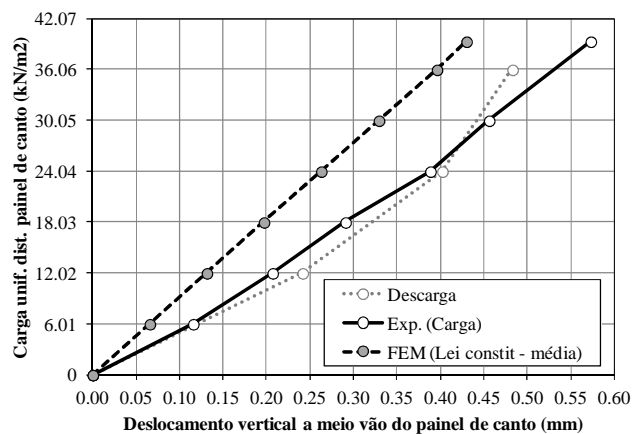
		Carregamento1/2	Carregamento3/4	Carregamento5/6	Carregamento7
		Carregamento	Descarga/Recarga	Descarga/Recarga	Descarga/Recarga
Construção (3-6 de Dezembro de 2011) Caracterização dos materiais (6-12 de Junho de 2012)					
		2paletes 12kN/m <sup>2</sup>	4paletes 24kN/m <sup>2</sup>	5paletes 30kN/m <sup>2</sup>	6.5paletes 39.4kN/m <sup>2</sup>
		9 de Maio de 2012 – 8dias	17 de Maio de 2012 – 12dias	29 de Maio de 2012 – 16dias	15 de Junho de 2012

**Figura 5 – Fases de carregamento**

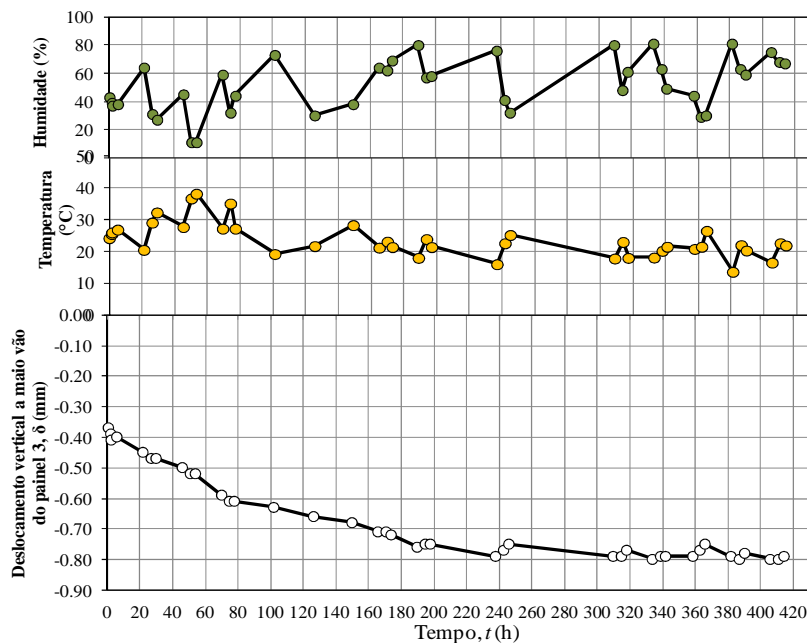
Na Figura 6 representa-se a evolução da flecha a meio do painel durante a carga e descarga, bem como a previsão segundo o modelo numérico adotado. A resposta foi aproximadamente linear, quer em carga como em descarga, até ao nível máximo de carga possível de aplicar, o qual foi 39.4 kN/m<sup>2</sup> (a altura máxima dos garfos do empilhador não permitiu aplicar mais carga). Cada ponto neste gráfico corresponde a configuração estabilizada de deformação. A título de exemplo, na Figura 7 representa-se a evolução da flecha, da temperatura e da humidade relativa junto ao transdutor de deslocamento quando o painel se encontrava carregado com aproximadamente 30 kN/m<sup>2</sup>. Consta-se que ao final de cerca de 420 horas a flecha encontrava-se estabilizada. Verifica-se ainda os ciclos de flutuação da flecha com a variação da

**3º Congresso Iberoamericano sobre betão auto-compactável**  
**Avanços e oportunidades**  
**Madrid, 3 e 4 de Dezembro de 2012**

temperatura e da humidade, constatando-se que a flecha diminui com o aumento da temperatura e com a diminuição da humidade. Até à máxima carga não foi registada à vista desarmada qualquer fenda na laje de BACRFA, tendo-se registado uma flecha máxima de 0.79 mm, que é bastante inferior à flecha para estados limites de utilização ( $L/250 = 1200\text{mm}/250 = 4.8 \text{ mm}$ ).



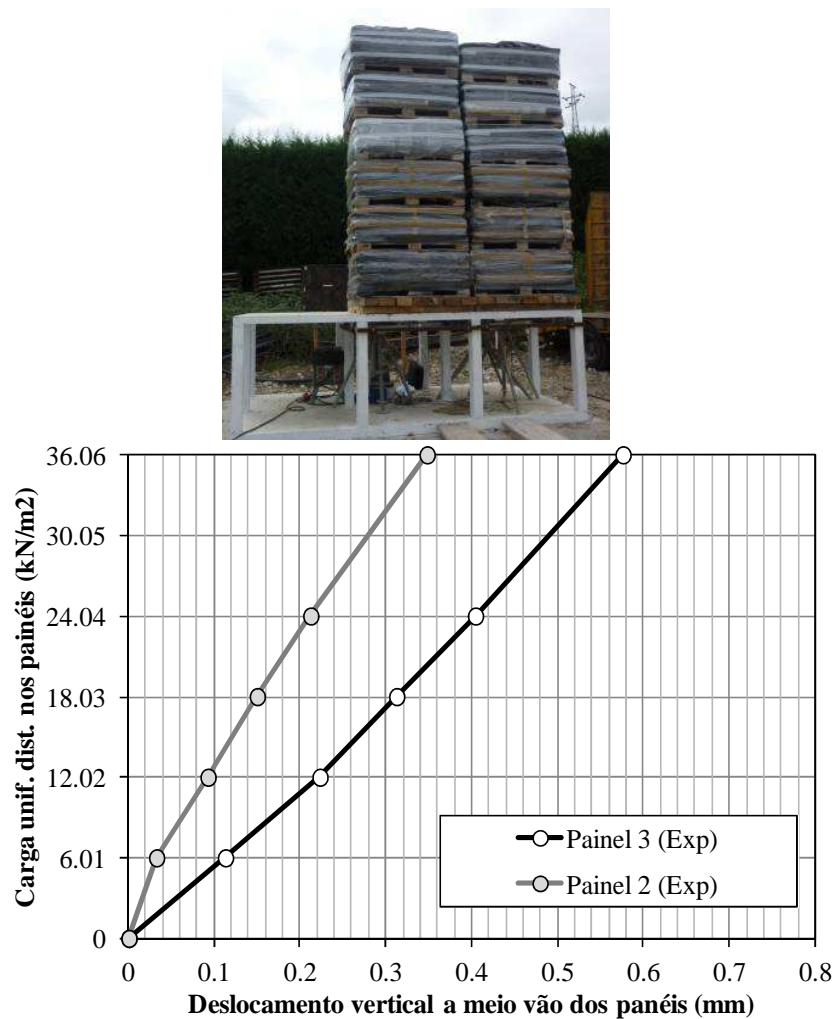
**Figura 6 – Resposta carga uniformemente distribuída versus flecha para carregamento no painel de canto da laje.**



**Figura 7 – Evolução da flecha, temperatura e humidade para carregamento do painel de canto com 30 kN/m<sup>2</sup>.**

**3º Congresso Ibérico-americano sobre betão auto-compactável**  
**Avanços e oportunidades**  
**Madrid, 3 e 4 de Dezembro de 2012**

Numa segunda fase os dois painéis 2 e 3 do protótipo (Figura 1) foram submetidos a carregamento similar ao descrito anteriormente. O carregamento foi igual em ambos os painéis. Na Figura 8 apresenta-se a evolução da flecha (após estabilização) nos dois painéis até aproximadamente  $36 \text{ kN/m}^2$ . A evolução da flecha, temperatura e humidade encontra-se representada na Figura 9, não se tendo observado qualquer tipo de dano até ao máximo nível de carga aplicado nos dois painéis ( $36 \text{ kN/m}^2$ ).



**Fig. 8 – Resposta carga uniformemente distribuída versus flecha para carregamento nos painéis 2 e 3.**



3º Congresso Iberoamericano sobre betão auto-compactável  
Avanços e oportunidades  
Madrid, 3 e 4 de Dezembro de 2012

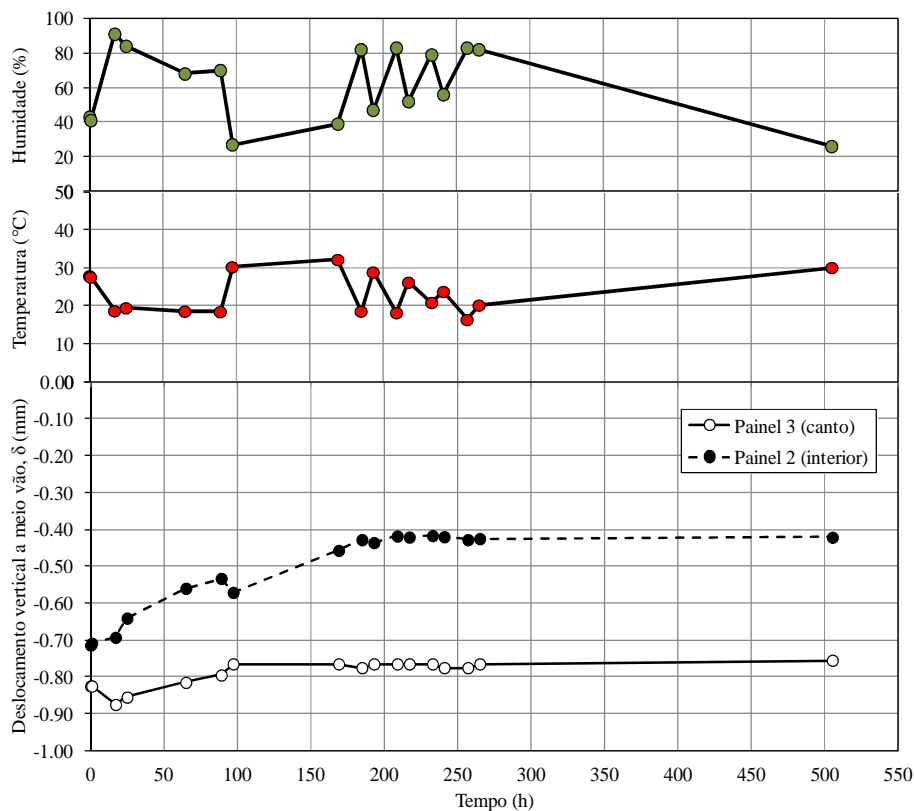


Figura 9 – Evolução da flecha, temperatura e humidade para carregamento nos painéis 2 e 3 com  $36 \text{ kN/m}^2$ .

#### 4. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi desenvolvido um betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (BACRFA) com propriedades apropriadas para a construção de edifícios de habitação e comércio. 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 distribuídos em painéis de canto e do interior do protótipo, tendo-se monitorizado quer as flechas instantâneas como as de longo prazo. Até um nível de carga de aproximadamente  $40 \text{ kN/m}^2$  não foi registada, à vista desarmada, qualquer fissura estrutural na laje do protótipo. Está em curso a preparação de ensaio de carga pontual de forma a avaliar a máxima capacidade da laje quando submetida a carga distribuída numa relativa pequena área.

**3º Congresso Ibéroamericano sobre betão auto-compactável**  
**Avanços e oportunidades**  
**Madrid, 3 e 4 de Dezembro de 2012**

## **5. 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<sup>TM</sup> pelas fibras aplicadas, e Secil e Sika pelo fornecimento do cimento e superplastificante, respetivamente.

## **6. REFERÊNCIAS**

- [1] EN 206-1, **Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity**. European standard, CEN, 69, (2000).
- [2] J.A.O. BARROS, H. SALEHIAN, N.M.M.A. PIRES, AND D.M.F. GONÇALVES, **Design and testing elevated steel fibre reinforced self-compacting concrete slabs**. 8th RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete: challenges and opportunities, Eds: Joaquim Barros et al., 19-21 September (2012).
- [3] 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).
- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] M. SASANI AND S. SAGIROGLU, **Progressive collapse of reinforced concrete structures: a multihazard perspective**. ACI Structural J., 105(1), 96-105, (2008).
- [7] **Model Code 2010**. Final draft, fib, (2011).
- [8] M.O.P.U. – “**Pruebas de carga en puentes de carretera.**” ministerio obras públicas y urbanismo – M.O.P.U., 45 pp (1988).
- [9] 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).
- [10] 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).