

PAINÉIS PRÉ-FABRICADOS EM BETÃO AUTOCOMPACTÁVEL REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO PARA FACHADAS DE EDIFÍCIOS

Delfina Gonçalves

Licenciada em
Engenharia Civil

Civitest

Braga/Portugal

João Dias

Licenciado em
Engenharia Civil

Civitest

Braga/Portugal

Lúcio Lourenço

Mestre em
Engenharia Civil

Civitest

Braga/Portugal

Joaquim Barros

Prof. Associado c/
Agregação

Universidade do
Minho

Guimarães/Portugal

Carlos Sampaio

Engenheiro Civil

Prégaia

Maia/Portugal

SUMÁRIO

No âmbito de um projecto de investigação envolvendo as Empresas Prégaia e Civitest e a Universidade do Minho, foi desenvolvido um betão autocompactável reforçado com fibras de aço com propriedades apropriadas para a pré-fabricação de painéis de fachada de edifícios. Em paralelo foi desenvolvida investigação numérica no sentido de simular o comportamento até à rotura deste tipo de elementos estruturais. Neste trabalho resume-se a investigação experimental e numérica desenvolvida no âmbito deste projecto.

Palavras-chave: Betão auto-compactável, fibras de aço, painéis de fachada, flexão, método dos elementos finitos, análise não linear material.

1. INTRODUÇÃO

A indústria da pré-fabricação é frequentemente confrontada com a produção de elementos estruturais de elevada complexidade geométrica. Além disso, quando é necessária a inclusão de uma percentagem elevada de armadura convencional, existem dificuldades em garantir a qualidade de betonagem, originando, por vezes, deficiências que podem comprometer, quer o comportamento dos elementos estruturais, quer a sua aparência final. Outro dos problemas

muitas vezes encontrado na indústria da pré-fabricação prende-se com a descofragem dos elementos, a qual, para maximizar a rentabilidade da produção, deve ser efectuada o mais rápido possível.

No âmbito de um projecto de investigação foi desenvolvido um Betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras de Aço (BACRFA) com propriedades de resistência e ductilidade apropriada para a pré-fabricação de painéis de fachada de edifícios. De modo a verificar a adequabilidade da aplicação do BACRFA em painéis de fachada de edifícios foi desenvolvida investigação numérica para a simulação do comportamento até à rotura deste tipo de elementos estruturais.

2. BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO

2.1 Propriedades do BACRFA

O Betão Auto-Compactável (BAC) possui um espalhamento homogéneo por acção do seu peso próprio, sem qualquer energia adicional de compactação [1-3]. A agilidade de enchimento e de passagem por espaços estreitos, sem ocorrência de fenómenos de segregação, constituem algumas das principais características do BAC. Assim, a necessidade de vibração é totalmente eliminada, suprimindo, conseqüentemente, todo o ruído inerente a este processo, bem como a mão-de-obra e o tempo consumido neste processo.

Outras características que se podem salientar, para além das referidas anteriormente, são a melhoria da aparência estética em resultado da diminuição de vazios e fenómenos de ninhos de brita, a maior facilidade de realização de obras arquitectónicas de geometria complexa em que é necessário aplicar percentagens elevadas de armadura convencional e, ainda, uma melhoria das propriedades mecânicas e de durabilidade do betão [4].

O BACRFA combina os benefícios do BAC no estado fresco com os que derivam da adição de fibras de aço a materiais de matriz cimentícia, nomeadamente uma maior resistência residual e uma maior capacidade de absorção de energia após o início da fendilhação da matriz cimentícia [5].

2.2 Composição e método de concepção do BACRFA

Para a realização do BACRFA utilizado no presente programa experimental foram utilizados os seguintes materiais: cimento (C) CEM I 42.5R; filler calcário (FC); superplastificante (SP) de terceira geração, baseado em policarboxilatos (Glenium® 77 SCC); água (A); três tipos de agregados (areia fina, meia areia e brita granítica (5-12 mm)); fibras de aço DRAMIX® RC-80/60-BN. O tipo de fibras de aço adicionado ao betão tem comprimento (l_f) de 60 mm, diâmetro (d_f) de 0.75 mm, relação comprimento/diâmetro (l_f/d_f) de 80 e tensão de cedência de 1100 MPa.

O método de concepção do BACRFA desenvolvido no âmbito do presente projecto de investigação, cujos detalhes podem ser consultados em [6], passa por três fases, nomeadamente: afinação da composição da pasta ligante; determinação da composição do esqueleto sólido, resultando as percentagens relativas de cada um dos constituintes; obtenção da percentagem de pasta por m^3 de BACRFA que garanta as características de auto-compactabilidade requeridas, ou seja, espalhamento suficientemente elevado, velocidade de escoamento correcta, adequada capacidade de se adaptar e ultrapassar obstáculos e resistência aos fenómenos de segregação e exsudação.

2.3 Propriedades mecânicas do BACRFA

2.3.1 Resistência à compressão e módulo de elasticidade

O BACRFA desenvolvido dispôs, às 12 horas, de uma resistência média à compressão (f_{cm}) de 25MPa e, aproximadamente, 24GPa de valor médio de módulo de elasticidade (E_{cm}). Aos 28 dias, f_{cm} e E_{cm} apresentaram valores de 62MPa e 36GPa, respectivamente. Às 24 horas os valores de f_{cm} e de E_{cm} correspondem a 61% e 79% dos valores obtidos aos 28 dias. Salienta-se que, nas primeiras horas, o valor de E_{cm} aumenta de forma mais pronunciada do que o valor de f_{cm} . A evolução da tensão de compressão com a idade indicia que a partir dos 28 dias o aumento de f_{cm} é marginal

3. PAINEL INICIAL

3.1 Geometria inicial do painel

A configuração geométrica inicial do painel aligeirado desenvolvido no presente projecto de investigação está representada na Figura 1. As zonas de aligeiramento são constituídas por blocos $300 \times 300 \times 80 \text{ mm}^3$ de poliestireno colados à cofragem, tendo a camada de BACRFA uma espessura 30 mm. Na aplicação real a face externa desta camada fica virada para o exterior do edifício. A disposição dos blocos de poliestireno garante a construção de uma grelha de barras de 100 mm de largura e 110 mm de espessura (que coincide com a espessura do painel). Os detalhes referentes ao painel inicial, nomeadamente, o programa experimental podem ser encontrados em [7].

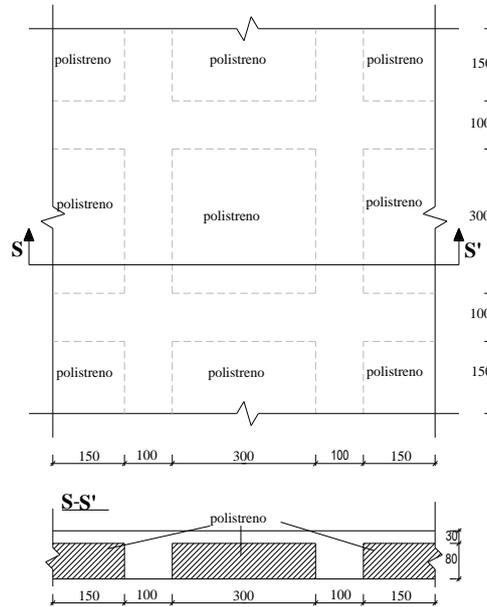


Figura 1 – Geometria do painel inicial.

4. OPTIMIZAÇÃO DO PAINEL

4.1 Geometria do painel otimizado

A geometria otimizada visa atingir um melhor comportamento estrutural e com menor susceptibilidade de ocorrências de manchas de humidade na transição entre as nervuras e a camada exterior, dado que, na configuração que agora se propõe, existe uma variação gradativa da espessura da nervura, quer em planta quer em espessura. A solução de aligeiramento anteriormente realizada por blocos de poliestireno foi substituída pelo molde representado na Figura 2.



Figura 2 – Módulo de aligeiramento para a configuração de painel proposta no âmbito do presente trabalho.

4.2 Sistema de materialização do aligeiramento

Foi concebido um sistema para concretização do aligeiramento dos painéis pré-fabricados a ser instalado na pista de pré-fabricação. Este sistema é constituído por peças em chapa de aço, com a forma geométrica apropriada ao painel, ligadas entre si por perfis metálicos tubulares de secção rectangular (ver Figura 3). Este sistema foi dimensionado para resistir às acções que lhe são aplicadas durante a fase de fabrico do painel. As propriedades destes perfis encontram-se na Tabela 1. Os elementos do sistema são assemblados na forma representada na Figura 4, constituindo uma estrutura que báscula em torno de um veio metálico instalado na pista.

As análises numéricas foram efectuadas com software Femix 4.0, baseado no método de elementos finitos. Os módulos de aligeiramento foram discretizados por elementos de casca de Ahmad de 8 nós [8]. Na Figura 5 representam-se os deslocamentos ortogonais ao plano do painel obtidos por intermédio da simulação numérica do comportamento do sistema concebido, quando solicitado pelo impulso do BACRFA.

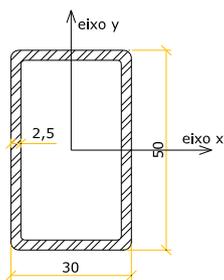


Figura 3 – Perfis Metálicos

Tabela 1 – Propriedades dos perfis metálicos usados no sistema de materialização.

Dimensões		Peso (kg/m)	Secção A (cm ²)	Momento de Inércia I _x (cm ²)	Momento de Inércia I _y (cm ²)
HxB (mm)	e (mm)				
50x30	2.5	2.5	3.73	12.3	5.4

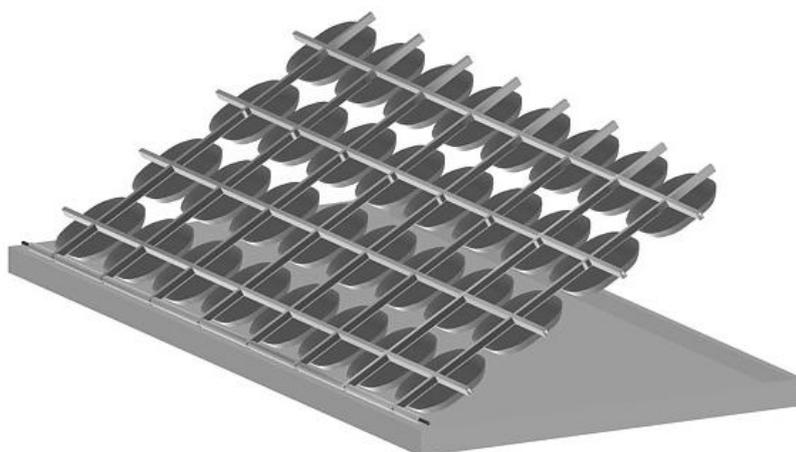


Figura 4 – Sistema de materialização do aligeiramento

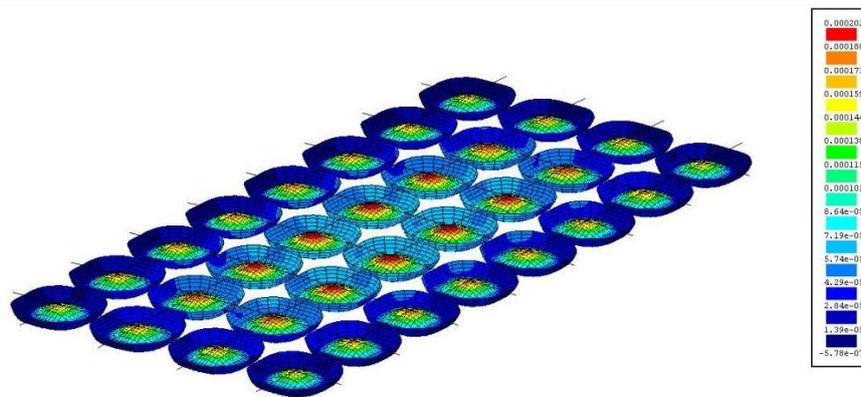


Figura 5 – Campo de deslocamentos ortogonais ao plano do painel, obtidos através da simulação do comportamento do sistema de aligeiramento devido à acção do impulso do BACRFA.

5. ANÁLISE NUMÉRICA

5.1 Análise linear do painel otimizado

Com base no aligeiramento proposto (ver Figura 2) foi efectuada a análise numérica de um painel pré-fabricado com dimensões de 2.5m x 5.0m, sendo este formado por 32 módulos de aligeiramento, tal como se pode verificar pela Figura 6.

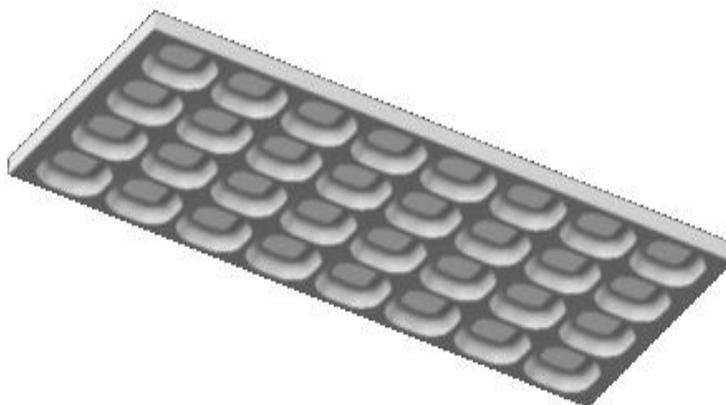


Figura 6 – Geometria do painel de 2.5m x 5.0m.

As análises numéricas efectuadas visaram o comportamento do painel perante as acções regulamentares [9]. Assim, foram realizadas análises lineares para o comportamento do material, sujeitando a peça em estudo ao seu peso-próprio e à pressão e sucção do vento. Os painéis foram discretizados por elementos de sólido de 8 nós.

É ainda de referir que o painel apenas se encontra apoiado nos seus quatro cantos. No entanto, quando submetido à pressão do vento (acção do exterior para o interior do edifício), considera-se que todos os pontos do bordo esquerdo e direito do painel encontram-se apoiados nos correspondentes pilares, pelo que os graus de liberdade ortogonais ao plano do painel encontram-se fixos.

Na Figura 7 representa-se uma vista posterior das tensões segundo g_2 que se desenvolvem em metade do painel (dada a simetria do painel), quando sujeito ao peso próprio e à pressão do vento. Da análise desta figura constata-se que as tensões máximas de tracção ocorrem na zona do apoio superior e atingem valores da ordem dos 1.8 MPa, salientando que, no caso do BACRFA desenvolvido, a resistência à tracção é de, aproximadamente, 2.9 MPa, pelo que garante a não ocorrência de fendas no painel, quando submetido a esta acção.

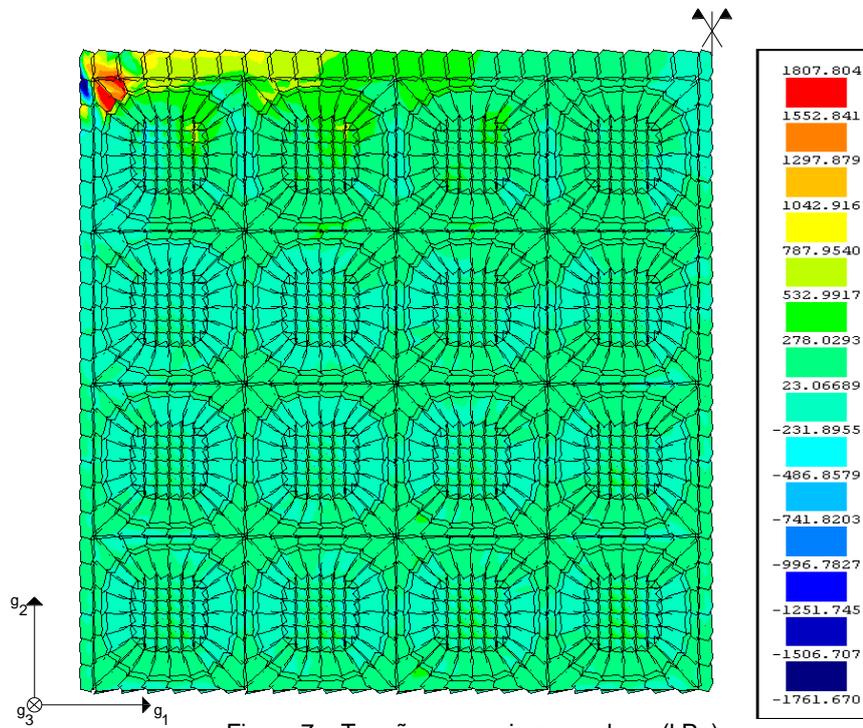


Figura 7 – Tensões normais segundo g_2 (kPa).

Na Figura 8 encontra-se sobreposta as malhas indeformada e deformada, esta última correspondente à acção do peso próprio do painel. Os deslocamentos ortogonais ao plano do painel devidos à pressão do vento estão representados na Figura 9.

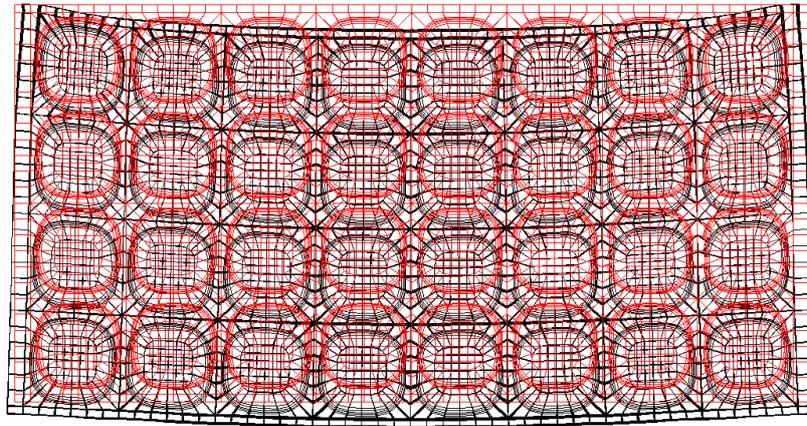


Figura 8 – Deformada versus indeformada devidas à acção do peso próprio.

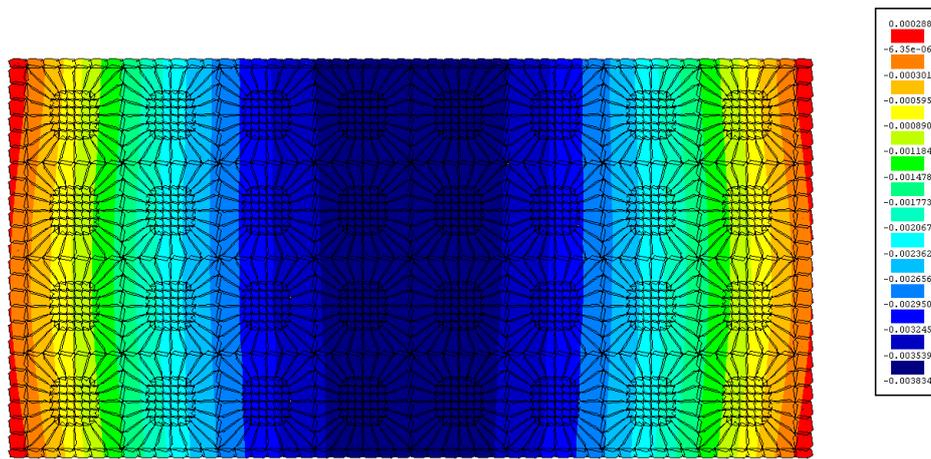


Figura 9 – Deslocamentos ortogonais ao plano do painel devidos à acção do peso próprio e da pressão do vento.

5.2 Análise não-linear material do painel otimizado

Optou-se, ainda, por efectuar uma análise não linear para o estado limite de serviço, onde o peso próprio e a acção do vento são afectados de factores unitários, e para o estado limite último afectando as características do material, o peso próprio e o vento de um coeficiente parcial de segurança de 1.25, 1.35 e 1.5, respectivamente. Nesta análise, dado que as tensões de compressão são bastante inferiores à que o BRFA resiste, admitiu-se que toda a não linearidade do comportamento do painel deve-se ao surgimento e propagação de fissuras. Para simular o processo de formação e propagação de fendas optou-se por um modelo de fendilhação distribuição, disponível no programa de cálculo automático FEMIX, cuja formulação se encontra detalhada em outro trabalho [10].

Para o estado limite de serviço, verificou-se que a peça, para o caso da pressão do vento sofre uma fendilhação nas zonas mais estreitas das nervuras. No caso da sucção do vento o painel sofre apenas uma pequena fendilhação localizada junto a um apoio.

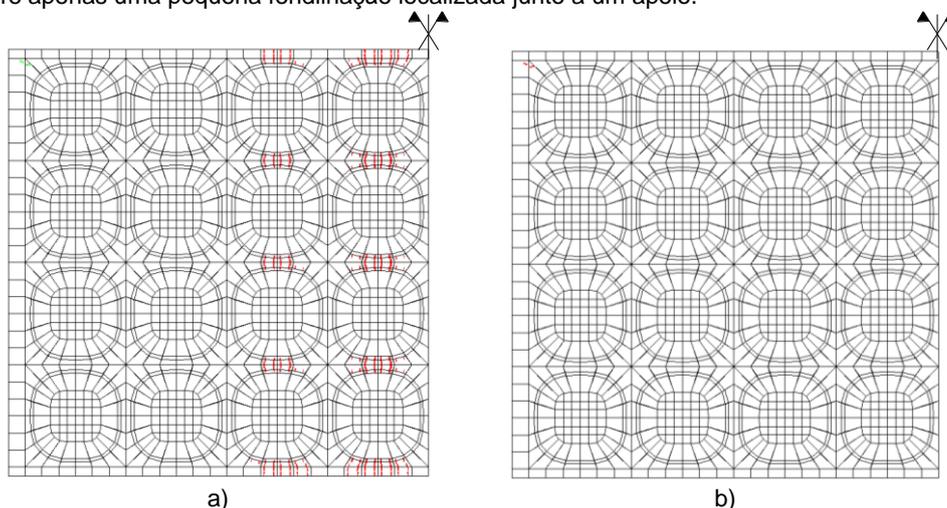


Figura 10 – Padrão de fendilhamento para estados limites de serviço do painel submetido à acção do peso próprio e do vento [a) pressão; b) sucção].

A largura máxima de fenda atinge um valor de 0.0015mm no caso da pressão do vento, e de 0.00034mm no caso da sucção do vento, verificando o estado limite de serviço de largura de fenda indicado no REBAP [11], que prevê uma largura máxima de fenda de 0.2mm para ambientes moderadamente agressivos

Na Figura 11 apresenta-se o padrão de fendilhação de metade do painel para estado limite último.

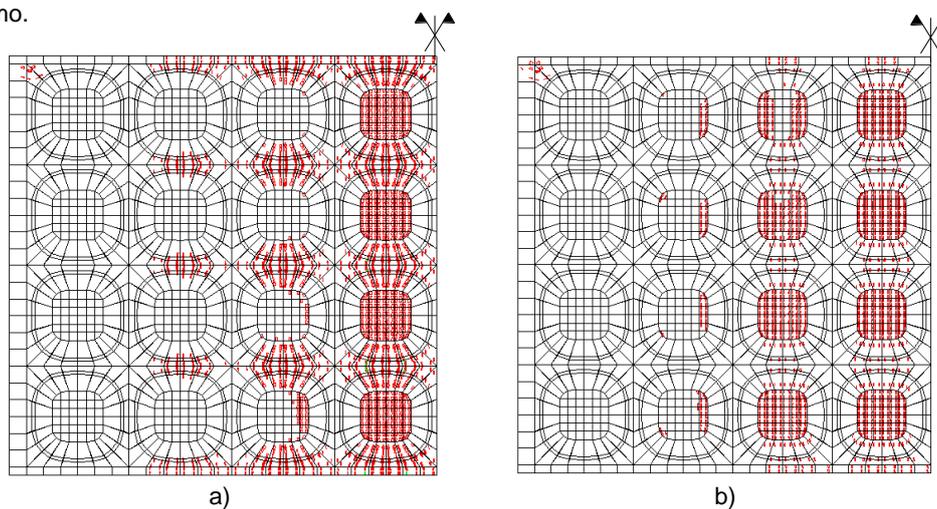
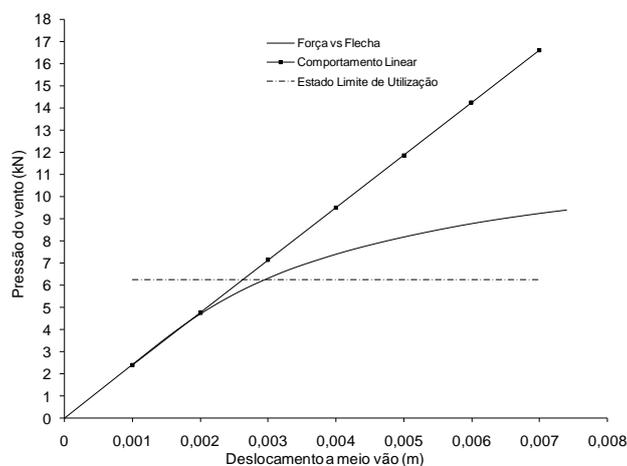


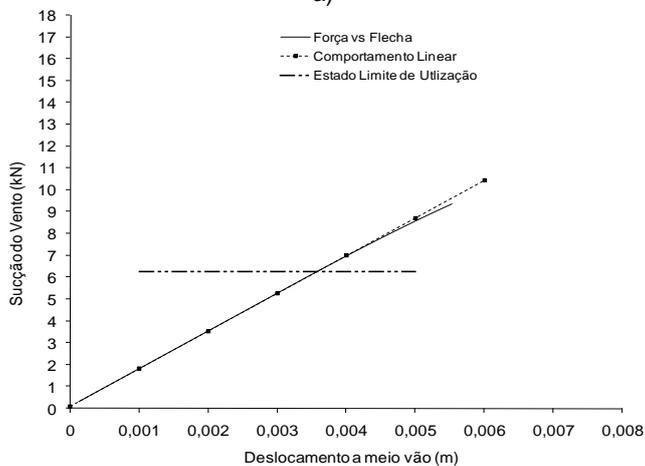
Figura 11 – Padrão de fendilhamento para estados limites últimos do painel submetido à acção do peso próprio e do vento [a) pressão; b) sucção].

Verifica-se que sob a pressão do vento as fendas localizam-se predominantemente nas zonas mais estreitas das nervuras, nos módulos centrais do painel, atingindo um valor máximo de largura de fenda de 0.0176mm, enquanto sob a sucção do vento a concentração de fendas ocorre na transição da camada de espessura constante de 30 mm para as zonas adjacentes de espessura variável, atingindo um valor de abertura máxima de 0.00501mm.

Na Figura 14 apresenta-se o gráfico que relaciona a evolução da flecha a meio vão com o valor da acção do vento.



a)



b)

Figura 12 – Relação força-flecha do painel submetido à acção do peso próprio e vento [a) pressão; b) sucção].

A análise da Figura 12 sugere que o comportamento não linear do painel pré-fabricado, quando sujeito à pressão do vento, para estado limite de utilização, inicia-se para valores próximos de 5 kN, correspondentes a uma flecha a meio vão de 2.0 mm. Para o caso do painel sujeito à

acção de sucção do vento, este mantém-se linear para estados limites de serviço, perdendo a linearidade, apenas para valores próximos de 8kN.

5.3 Protótipo submetido à flexão

Nesta fase submeteu-se um módulo (ver Figura 13) do painel otimizado a um ensaio de flexão e procedeu-se à respectiva análise numérica.

No ensaio de flexão o painel encontrava-se apoiado nos quatro cantos. A carga era aplicada por intermédio de um actuador, sendo registada por uma célula de carga de 300 kN de capacidade máxima, fixada ao pistão do actuador. A carga era aplicada na parte central do aligeiramento do painel, onde a espessura da camada de BACRFA era de 30 mm, sendo distribuída por uma placa quadrada de aço de 100 mm de lado e 10 mm de espessura. O ensaio foi realizado sob controlo de deslocamentos à velocidade de 25 $\mu\text{m/s}$. O ensaio terminou quando se atingiu uma flecha de 25mm.

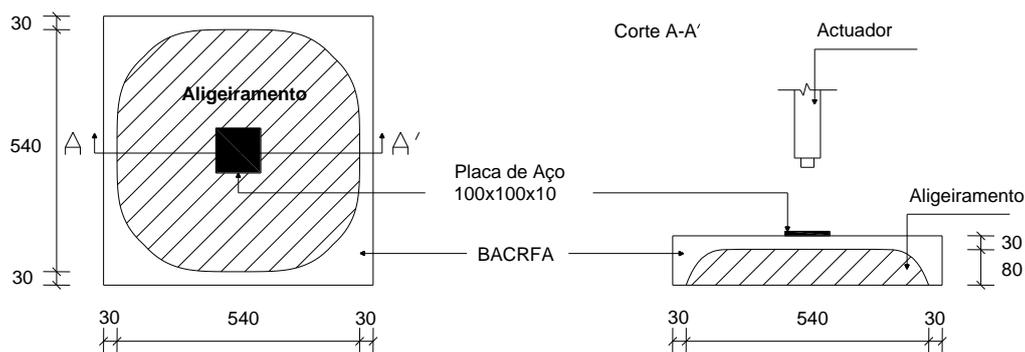


Figura 13 – Geometria do módulo a ensaiar à flexão (dimensões em mm).

Na Figura 14 encontra-se a relação força-flecha do ensaio de flexão do protótipo.

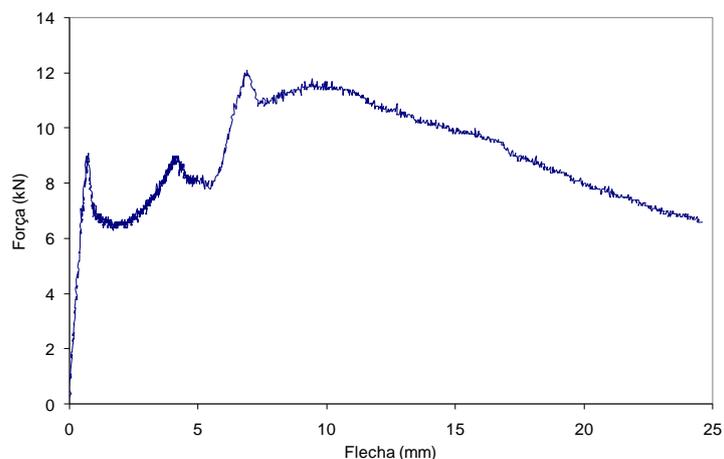


Figura 14 – Relação força-flecha do ensaio de flexão do módulo.

Da análise da Figura 14 verifica-se que a resposta do painel é essencialmente linear até uma carga próxima dos 9 kN. Para este nível de carga deu-se a formação de macrofendas nas zonas mais estreitas das nervuras, o que conduziu à queda de carga, a qual se estabilizou por volta dos 6.5 kN. No entanto, devido à presença das fibras a atravessar as fendas formadas, a carga voltou a aumentar até atingir um valor máximo próximo dos 12 kN, para uma flecha da ordem dos 8 mm. A partir desta flecha a carga diminuiu suavemente com o aumento da flecha, tendo o ensaio sido interrompido aos 25 mm de flecha, quando o painel ainda suportava uma carga próxima de 7 kN. Conclui-se que o painel apresentou elevada ductilidade, o que para tal contribuiu o reforço proporcionado pelas fibras.

Na análise numérica realizada, o protótipo foi discretizado em 240 elementos de sólido de 8 nós.

Numa primeira abordagem, o protótipo foi simulado em regime linear elástico. A malha de elementos finitos encontra-se representada na Figura 15, onde os quatro pontos dos cantos possuem o deslocamento ortogonal ao plano impedido.

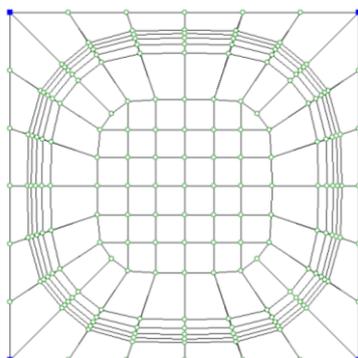


Figura 15 – Malha de elementos finitos.

Seguidamente, o protótipo foi simulado em regime não-linear. A fendilhação estimada pela modelação numérica encontra-se representada na Figura 16, e pode ser comparada com a fendilhação obtida no ensaio experimental (ver Figura 17), as quais revelam uma aproximação satisfatória.

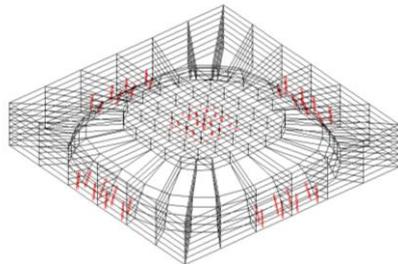


Figura 16 – Padrão de fendilhação estimado pela análise numérica.



Figura 17 – Padrão de fendilhação obtido no ensaio experimental.

6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O BACRFA desenvolvido evidenciou excelentes propriedades de ductilidade e resistência para um custo de fabrico competitivo. São inúmeras as aplicações onde este material apresenta vantagens técnicas e económicas sendo, no entanto, mais adequado em estruturas em que a complexidade geométrica onere significativamente a utilização de armaduras convencionais e, em simultâneo, tenham elevado grau de hiperstaticidade de forma a possibilitar tirar partido dos mecanismos de reforço que as fibras proporcionam após o início da microfendilhação da matriz.

As análises numéricas realizadas permitiram verificar a segurança do elemento estrutural às acções regulamentares em vigor, nomeadamente peso próprio e vento.

O comportamento de um módulo de painel de BACRFA ensaiado à flexão demonstrou a elevada ductilidade garantida pelo material desenvolvido para este sistema estrutural. De facto, fibras foram bastante eficazes, dado que entre a flecha correspondente à formação das macrofendas (2,5mm) e a flecha de 25 mm, a capacidade de carga do módulo foi sempre superior à carga correspondente à formação das macrofendas.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores do presente artigo pretendem agradecer à: ADI – Agência de Inovação, programas PABERFIA e PABERPRO; PRÉGAIA – Sociedade de Pré-Fabricação, SA; CIVITEST – Pesquisa de novos materiais para a Engenharia Civil, Lda; BEKAERT; Degussa Chemicals Portugal; COMITAL – Companhia Mineira de Talcos, SA e SECIL – Companhia geral de cal e cimento, SA. Os primeiro e segundo autores pretendem agradecer as bolsas de investigação atribuídas no âmbito do projecto PABERPRO.

8. BIBLIOGRAFIA

- [1]– Bartos, P.J.M. and Grauers, M., “Self-Compacting Concrete”, *Concrete*, Vol.33, Nº4, 1999
- [2]– Okamura, H. and Ouchi, M., “Self-Compacting Concrete. Development, Present use and Future”, *Proc. 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete* (Stockholm, Sweden), A. Skarendhal and O.Pstersson (editors), RILEM Publications S.A.R.L, 1999
- [3]– Gomes, P.C.C. (2002), “Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete”, PhD thesis, UPC, Barcelona, Spain.
- [4]– Gonçalves, D.M.F., “Betão auto-compactável reforçado com fibras de aço sob carregamento monotónico e cíclico de compressão: investigação experimental e analítica”, *Projecto Individual*, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2007.
- [5]– Barros, J.A.O., “Comportamento do betão reforçado com fibras - análise experimental e simulação numérica”, *Tese de Doutoramento*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pp. 502, Dezembro 1995.
- [6]– Pereira, E.N.B., *Steel Fibre Reinforced Self-compacting Concrete: from material to mechanical behaviour*, dissertation for Pedagogical and Scientific Aptitude Proofs, Department Civil Engineering, University of Minho, 188 pp, (2006) (<http://www.civil.uminho.pt/composites>).
- [7]– Barros, J.A.O., et al, “*Lightweight panels of steel fiber reinforced self-compacting concrete*”, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.
- [8] – Barros, J.A.O., “Lajes e cascas segundo o método dos elementos finitos”, *Relatório 00-DEC/E-2*, Dep. Eng^a Civil, Escola Eng^a, Universidade do Minho, 131 p., Março 2000.RSA,
- [9] –Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes; Decreto-Lei Nº.235/83 de 31 de Maio.
- [10] – Gouveia, A.V.; Barros, J.A.O.; Azevedo, A.F.M; Sena-Cruz, J.M., “Multi-fixed Smeared 3D crack model to simulatE the behavior of fibeR reinforced concrete structures”, *Artigo submetido ao CCC2008*, FEUP, Porto, Abril 2008.
- [11] – REBAP-Regulamento de estruturas de betão armado e pré-esforçado.