

Possibilidades e desafios do betão auto-compactável reforçado com fibras – do laboratório à aplicação real

Joaquim A.O. Barros^{1 †}, Eduardo N.B. Pereira²,
Simão P.F. Santos³, Lúcio A.P. Lourenço⁴

*Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil
Azurém, P – 4800-058 Guimarães, Portugal*

RESUMO

Neste trabalho resume-se a investigação desenvolvida no âmbito de um projecto de investigação aplicada, que tinha como objectivo essencial o de avaliar a possibilidade de conceber um painel em betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (BACRFA) para painéis de fachada de edifícios, com vantagens técnicas e económicas quando se toma por base de comparação a solução em betão projectado reforçado com fibras de vidro. Para tal foi necessário desenvolver um método de concepção para o BACRFA. Posteriormente foi caracterizado o seu comportamento à compressão e à flexão, desde as 12 h aos 28 dias do BACRFA desenvolvido, e foi avaliado o desempenho do sistema estrutural proposto no que respeita ao seu comportamento à flexão e ao punçoamento. Para avaliar as dificuldades associadas à construção, em ambiente de pré-fabricação industrial, da solução proposta para o painel, foi construído um protótipo na empresa associada a este projecto. O desempenho estrutural do protótipo construído foi avaliado por intermédio de ensaio in situ.

1. INTRODUÇÃO

O betão projectado reforçado com fibras de vidro tem sido usado na construção de painéis para fachada de edifícios (Majumdar and Laws 1991). Contudo, se estes painéis estiverem em ambientes agressivos, a ductilidade proporcionada pelo reforço das fibras decresce significativamente ao longo do tempo (Bijen 1983). Nestes casos os benefícios proporcionados pelo reforço das fibras são marginais, colocando-se a questão da oportunidade da utilização deste tipo de fibras neste tipo de aplicações. Por outro lado, é reconhecido que as fibras de aço, quando envolvidas por betão de boa qualidade, constituem um sistema de reforço capaz de proporcionar elevada ductilidade a materiais de matriz cimentícia, tanto a curto como a longo prazo, que é uma das principais características do betão reforçado com

¹ Professor Associado com Agregação

² Assistente

³ Investigador da Empresa Civitest – Pesquisa de Novos Materiais para a Eng^a Civil, Lda

⁴ Investigador da UM no âmbito do Projecto PABERFIA

[†] Autor para quem a correspondência deverá ser enviada (barros@civil.uminho.pt)

fibras de aço (BRFA). Se o projectista dispuser de informação técnica e científica que lhe assegure um determinado nível de resistência residual ao longo da vida útil prevista para a estrutura, será possível conceber painéis com melhor desempenho em termos de durabilidade e funções estruturais. Para diminuir o peso próprio deste tipo de painéis, estes podem incorporar elementos de material leve. No entanto, a presença desses elementos poderá constituir um obstáculo sério à colocação do betão, comprometendo o aspecto final do painel.

A tecnologia do betão auto-compactável (BAC) pode ser usada para evitar estes inconvenientes, dada a sua elevada fluidez (Gomes 2002). O BAC pode ser definido como um betão capaz de fluir quando colocado num molde, escoando de uma forma natural por entre as armaduras, envolvendo-as e preenchendo o respectivo molde, apenas sob o efeito do seu peso próprio, sem que ocorram fenómenos de segregação durante a sua aplicação. Os primeiros passos, no desenvolvimento do betão com propriedades de auto-compactabilidade, foram dados na Universidade de Tóquio, no Japão, em 1986. No entanto, a primeira aplicação num protótipo realizou-se em 1988 (Okamura e Ouchi, 1999). Desde então, tem havido um esforço por parte dos investigadores no desenvolvimento, melhoria e aproveitamento das propriedades de auto-compactabilidade com novos materiais. Mais recentemente, tem sido explorada a possibilidade de desenvolver BAC demonstrando ductilidade elevada depois de endurecido, por intermédio da adição de fibras à sua composição. Trata-se de um desafio suplementar dado que, para que se assegurem os requisitos de auto-compactabilidade, o efeito das fibras na perturbação do fluxo do BAC no estado fluido tem que ser tido em conta na concepção das misturas, elevando a complexidade desta tarefa. No entanto, a possibilidade de conjugar as vantagens do betão auto-compactável com as que advêm da adição de fibras a materiais de matriz cimentícia, daí resultando um compósito designado betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (BACRFA), é razão suficiente para mobilizar centros de I&D e indústria, principalmente a da pré-fabricação, na tentativa de conceber novos sistemas estruturais com vantagens técnicas e económicas. De facto, a indústria da pré-fabricação é, frequentemente, confrontada com a produção de elementos estruturais de alguma complexidade geométrica. Os condicionalismos geométricos traduzem-se, geralmente, em gastos significativos com a montagem e colocação das armaduras. Além disso, quando esta é usada em percentagem elevada, existem dificuldades em garantir a qualidade de betonagem desejada, resultando em deficiências que podem comprometer tanto o comportamento da estrutura como a sua aparência final. Tendo por horizonte a inovação na área dos novos materiais e soluções estruturais, a empresa de pré-fabricação, Prégaia, a empresa de desenvolvimento de novos materiais, Civitest, e o grupo de investigação nas áreas de Materiais Compósitos e betões reforçados com fibras do Departamento de Engenharia da Universidade do Minho, CRG, (<http://www.civil.uminho.pt/composites/>) envolveram-se num projecto de investigação com o objectivo de desenvolver BACRFA para a fabricação de painéis aligeirados para fachada de edifícios. Os conhecimentos adquiridos na tecnologia do BACRFA e a transferência de conhecimentos entre as entidades participantes são outros dos aspectos essenciais deste tipo de parcerias, pois abrem caminho à possibilidade de se desenvolverem novos materiais com propriedades pré-definidas, o que a bibliografia da actualidade designa por “Engineered cementitious composites (ECC)”.

2. TECNOLOGIA DO BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL

2.1. Propriedades do BAC

No seu estado fresco, o BAC deve reunir as seguintes três propriedades fundamentais: fluidez, viscosidade e coesão. Estas garantem que o fluxo da mistura seja homogéneo sem que

ocorra segregação. Para assegurar tais características, é necessário realizar ensaios não correntes na tecnologia do betão (EFNARC 2002). A fluidez elevada permite que o BAC tenha aptidão para fluir no interior da cofragem, preenchendo-a na totalidade apenas sob o efeito do seu peso próprio. O BAC tem a capacidade de fluir entre as armaduras e quaisquer outros obstáculos, tais como estreitamentos de secções, orifícios, etc. O BAC deve ter viscosidade e coesão que permitam a estabilidade necessária para evitar a segregação dos seus componentes, garantindo uma deformabilidade uniforme dos inertes no processo de colocação do BAC. A microestrutura e as interfaces “inertes-pasta” do BAC são mais densas do que aquelas que se verificam num betão convencional com a mesma relação água/cimento, pelo que o BAC tem maior resistência à penetração de cloretos e gases, e maior aderência às armaduras. Contudo, dada a maior quantidade de pasta do BAC, é necessário ter cuidados suplementares durante o seu processo de cura, de forma a evitar fissuras por retracção plástica, principalmente em elementos estruturais mais susceptíveis a este tipo de fenómenos, tais como as estruturas laminares. A possibilidade de se adicionarem fibras de baixo módulo de elasticidade, como é o caso das fibras de polipropileno, deve ser explorada pois estas têm demonstrado contribuir para o controlo da fendilhação devida à retracção (Qi *et al.* 2005). Em geral, o BAC apresenta módulo de deformabilidade mais baixo que um betão convencional da mesma classe de resistência e maior retracção endógena para classes de resistência elevadas.

Para aferir as características de auto-compactabilidade, os ensaios mais frequentemente realizados são os seguintes (EFNARC 2002): V-Funnel, L-Box, Espalhamento com o Cone de Abrams Invertido (Slump Flow). Podem ainda associar-se ensaios entre si, como é o caso do ensaio de Espalhamento mobilizando o Cone de Abrams Invertido e o Anel Japonês. Da execução destes ensaios obtêm-se resultados em unidades de comprimento e tempo, que permitem avaliar a existência ou não de características de auto-compactabilidade no betão. De uma forma geral, estes ensaios são de fácil execução e não obrigam a gastos elevados em equipamento. No entanto, deve-se ter em atenção que os valores-limite da maior parte destes ensaios, que permitem classificar o material como tendo, ou não, propriedades de auto-compactabilidade, têm suporte empírico.

2.2. Propriedades do Betão Reforçado com Fibras de Aço (BRFA)

O principal benefício proporcionado pela adição de fibras a materiais de matriz cimentícia é o aumento da capacidade de absorção de energia após o início da fendilhação destes materiais. Este benefício permite que a carga de colapso de estruturas de BRFA seja significativamente superior à sua carga de fendilhação, sendo este incremento tanto maior quanto mais elevado for o grau de hiperestaticidade da estrutura (Barros e Figueiras 1988). Em comparação com o seu homólogo betão simples, o BRFA fendilhado tem melhor comportamento sob acções de fadiga e de impacto, dada a sua maior ductilidade. As fibras podem assegurar melhor qualidade do betão em zonas de elevada concentração de armaduras de resistência ao corte, dado ser possível substituir, parcialmente, estribos e cintas por fibras de aço (Barros *et al.* 2003). A junção, num mesmo material, das características provenientes do BAC e do BRFA, dá origem ao BACRFA: Betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras de Aço. O BACRFA pode caracterizar-se como sendo um material de matriz cimentícia reforçado com fibras de aço, tendo capacidade de fluir no interior de uma cofragem unicamente por acção do seu peso próprio.

3. MÉTODO DE CONCEPÇÃO

O método desenvolvido para a concepção de BACRFA é constituído por três fases: i) afinação da composição da pasta ligante; ii) determinação da composição do esqueleto sólido,

em que as percentagens relativas de cada um dos constituintes são determinadas; iii) 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. Este método foi aplicado na determinação da composição de BAC reforçado com as quantidades de 30 e 45 kg/m^3 de um tipo de fibras seleccionado para a aplicação em estudo. O método pode ser aplicado ao desenvolvimento de betões reforçados com outros tipos ou percentagens de fibras, dado que as características das fibras são tidas em conta na fase ii) acima indicada. No entanto, não existe ainda experiência no desenvolvimento de BACRFA com percentagens de fibras acima dos 0.75% em volume, pelo que não é possível garantir que o presente método seja aplicável sem restrições no desenvolvimento de BACRFA reforçado com percentagens de fibras acima do indicado, e investigação suplementar deve ser realizada neste âmbito.

4. CONCEITOS PARA CARACTERIZAR O COMPORTAMENTO À FLEXÃO DE BETÃO REFORÇADO COM FIBRAS

No presente programa de investigação, para caracterizar o comportamento à flexão do BACRFA desenvolvido, foram efectuados ensaios com provetes prismáticos segundo as recomendações do RILEM TC 162-TDF (RILEM 2002), nomeadamente no que se refere aos procedimentos de cura do betão, ao posicionamento e às dimensões do entalhe no provete, ao carregamento e condições de apoio, às características do equipamento, aos dispositivos de medida e aos procedimentos do ensaio. O método de betonagem dos provetes proposto pelo RILEM TC 162-TDF não foi adoptado, uma vez que não foi usada qualquer compactação externa. Relativamente aos provetes, o RILEM TC 162-TDF preconiza o uso de prismas com um comprimento de 600 mm e uma secção de $150 \times 150 \text{ mm}^2$. A meio vão, é executado um entalhe com 3 a 5 mm de largura e $25 \pm 1 \text{ mm}$ de profundidade, para que a fendilhação progrida pela secção entalhada. O sistema de ensaio está representado na Figura 1, onde está patente o esquema de aplicação de carga e a disposição do transdutor (Figura 1a). Na boca do entalhe pode aplicar-se um “clip gauge” de forma a estimar a abertura de fenda e assegurar, com maior estabilidade, o controlo do ensaio. A barra, na qual se fixa o transdutor de deslocamentos, deve ficar ligada a dois pontos fixos do provete, podendo a barra rodar em torno de um desses pontos e deslizar sobre o outro ponto do apoio (Figura 1), com o intuito de não registar deslocamentos parasitas nos referidos transdutores (Barros 1995). A estrutura de reacção deve ser suficientemente rígida de forma a evitar a ocorrência de ensaios instáveis.

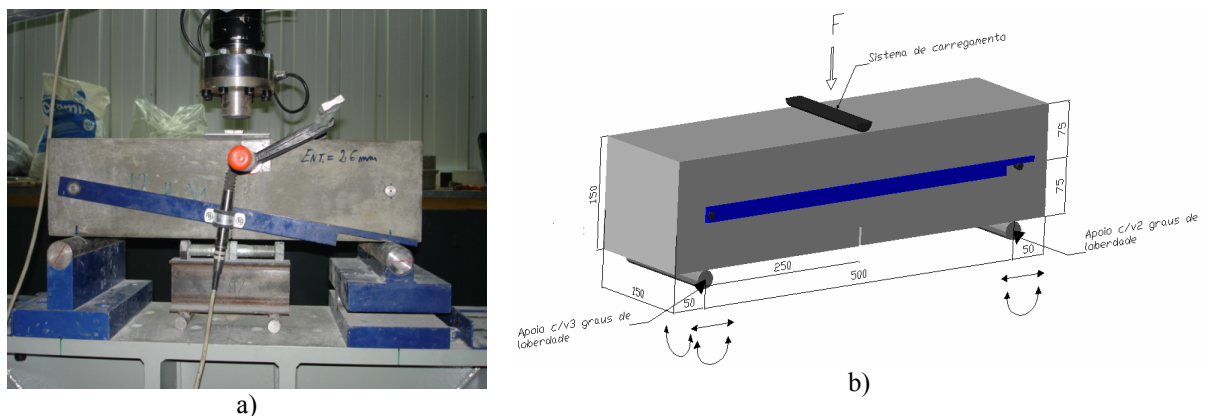


Figura 1 - Configuração do ensaio de flexão

Na Figura 2 representa-se uma curva típica força-flecha que se obtém de um ensaio de flexão. Nesta figura, F_L é o maior valor de carga registado até uma flecha de 0.05mm e δ_L é a flecha correspondente ao valor de F_L .

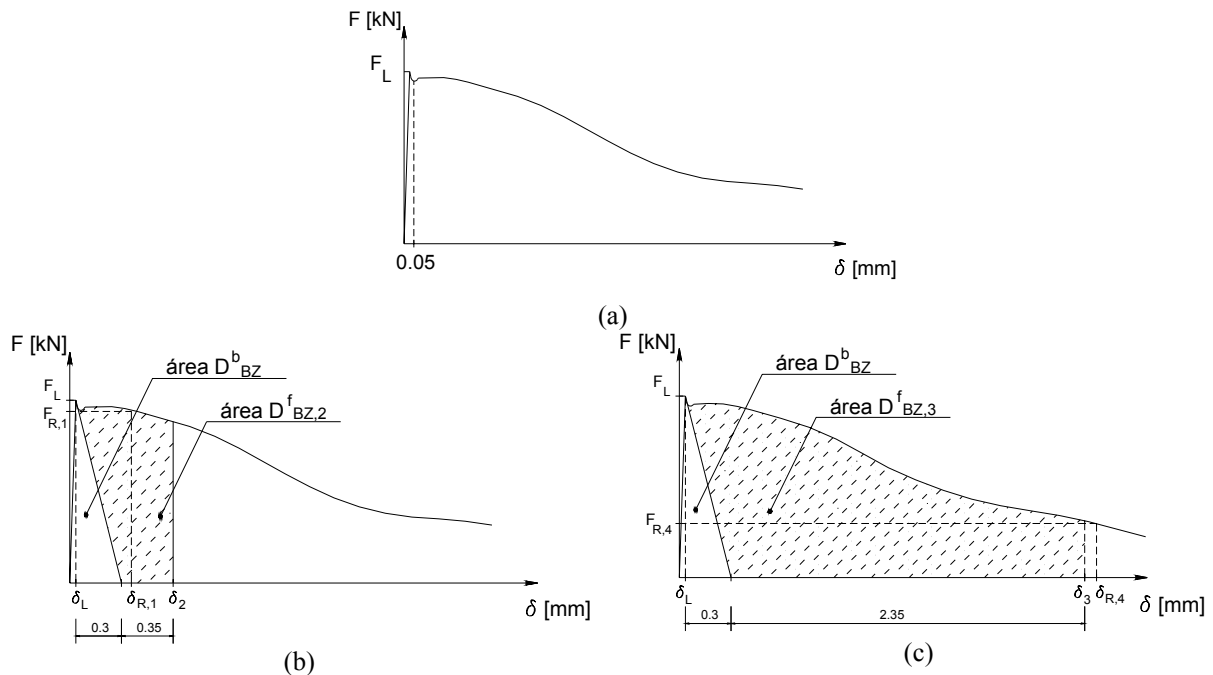


Figura 2 - Relação típica força-flecha de um ensaio de flexão

Admitindo uma distribuição linear de tensões na secção do provete, as resistências equivalente à tracção em flexão $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ podem ser determinadas por meio das seguintes equações:

$$f_{eq,2} = \frac{3 D_{BZ,2}^f}{2 \cdot 0.50} \frac{L}{bh_{sp}^2} \text{ [MPa]}$$

$$f_{eq,3} = \frac{3 D_{BZ,3}^f}{2 \cdot 2.50} \frac{L}{bh_{sp}^2} \text{ [MPa]}$$

em que L é o vão do provete, b é a largura do provete e h_{sp} é a distância da extremidade interior do entalhe à superfície superior do provete. Os parâmetros $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ estão relacionados com a capacidade de absorção de energia do material até à flecha $\delta_2 = \delta_L + 0.65 \text{ mm} = 0.75 \text{ mm}$ e $\delta_3 = \delta_L + 2.65 = 2.70 \text{ mm}$, respectivamente. Esses parâmetros são utilizados na simulação do comportamento do material à tracção nas verificações aos estados limites de utilização ($f_{eq,2}$) e últimos ($f_{eq,3}$), (RILEM 2000). Os parâmetros $f_{R,1}$ e $f_{R,4}$ são as tensões obtidas para as forças $F_{R,1}$ e $F_{R,4}$, respectivamente, que, por sua vez, são as forças verificadas para os valores de flecha de $\delta_{R,1} = 0.46 \text{ mm}$ e $\delta_{R,4} = 3.0 \text{ mm}$. Assumindo distribuição linear de tensões na secção de fractura, $f_{R,1}$ e $f_{R,4}$ obtêm-se por intermédio das equações seguintes (RILEM 2002):

$$f_{R,1} = \frac{3 F_{R,1} L}{2 b h_{sp}^2} \text{ [MPa]}$$

$$f_{R,4} = \frac{3 F_{R,4} L}{2 b h_{sp}^2} \text{ [MPa]}$$

5. DESENVOLVIMENTO DE PAINÉIS PARA FACHADA DE EDIFÍCIOS

5.1. Introdução

Na presente secção resume-se a investigação efectuada no âmbito do desenvolvimento de painéis aligeirados de BACRFA para a indústria de pré-fabricação. Mais detalhes sobre os estudos desenvolvidos neste âmbito podem ser encontrados em (Barros *et al.* 2005) As exigências estabelecidas para o BACRFA foram as seguintes: resistência média à compressão às 24 horas superior a 20 MPa; tensão equivalente de tracção em flexão superior a 2 MPa, para a mesma idade; quantidade de cimento não superior a 400 kg/m³; o cimento deverá ser o componente mais caro da pasta ligante.

5.2. Composições

Os materiais usados no presente programa experimental foram os seguintes: cimento (C) CEM I 42.5R; filler calcárico (FC); superplastificante (SP) de terceira geração baseado em policarboxilatos (Glenium® 77SCC); água (A); três tipos de agregados (areia fina, meia areia e brita granítica (5-12 mm)); fibras de aço DRAMIX® RC-80/60-BN. Esta fibra tem 60 mm de comprimento (l_f), 0.75 mm de diâmetro (d_f), relação comprimento/diâmetro (l_f/d_f) de 80 e tensão de cedência de 1100 MPa. O método de concepção de BACRFA utilizado foi o descrito no Capítulo 3. Mais detalhes podem ser encontrados em (Barros *et al.* 2006; Pereira 2006). Os parâmetros medidos para aferir a auto-compactabilidade do BACRFA foram o espalhamento total e o tempo que o betão demorou a atingir um espalhamento de 500 mm, T50. Na Tabela 1 apresentam-se as composições das misturas que apresentaram as melhores características de auto-compactabilidade, bem como os valores do espalhamento e de T50. Não foram detectados sinais de segregação e a mistura mostrou sempre boa homogeneidade e coesão, mesmo à passagem pelo pequeno orifício do Cone de Abrams (estes ensaios foram efectuados com o cone de Abrams em posição invertida).

Tabela 1: Composições finais para 1 m³ de BACRFA reforçados com 30 e 45 kg de fibras

Quantidade de fibras (kg/m ³)	Pasta/Volume total (%)	Cimento (kg)	FC (kg)	Água (dm ³)	SP (dm ³)	Areia Fina (kg)	Meia Areia (kg)	Brita (kg)	Espalhamento (mm)	T50 (sec)
30 (BACRFA_30)	0.34	364.28	312.24	93.67	6.94	108.59	723.96	669.28	725	4.6
45 (BACRFA_45)	0.38	401.68	344.30	117.31	7.65	178.13	669.36	600.00	770	4.0

5.3. Propriedades mecânicas

Na indústria da pré-fabricação, uma das exigências mais importantes prende-se com a descofragem dos elementos, a qual deve ser realizada o mais rapidamente possível (Barros et al. 2004). Para garantir a segurança deste processo, deve ser conhecida a influência da idade do BACRFA nas resistências à flexão e à compressão do mesmo. Para este fim, foi efectuado um programa experimental com provetes com as seguintes idades: 12 horas, 24 horas, 3, 7 e 28 dias. Foi dado especial enfoque à avaliação do comportamento pós-fendilhado do BACRFA (Pereira et al. 2004), tendo-se determinado a lei tensão-abertura de fenda para estes materiais, com base nas relações força-flecha obtidas nos ensaios de flexão e recorrendo a um modelo de fendas discretas capaz de simular o fenómeno de iniciação e de propagação de fendas em elementos de betão (Sena-Cruz *et al.* 2004). O programa experimental foi composto por ensaios de compressão directa em provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura e ensaios de flexão em provetes prismáticos de $600 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$. Ambos os tipos de provetes foram betonados sem qualquer tipo de compactação.

5.3.1 – Compressão

Os procedimentos e a configuração de ensaio encontram-se descritos em (Barros et al. 2006). Na Figura 3 apresenta-se a relação tensão-extensão para as séries BACRFA_30 e BACRFA_45. Cada curva representa a média dos valores obtidos para três provetes. A maior perda de carga, na fase pós-pico, da série BACRFA_45 de 28 dias de idade deve estar associada com o facto de se ter registado uma resistência próxima dos 70 MPa, pelo que algumas fibras atravessadas por fendas romperam, levando a um comportamento menos dúctil, nesta fase, para esta série. Da análise desta figura verifica-se que, para a idade de 12 horas, o BACRFA_45 teve menor capacidade de carga que o BACRFA_30. Este comportamento deveu-se à temperatura ambiente baixa existente no laboratório, aquando da betonagem dos provetes de BACRFA_45. Enquanto as operações de betonagem do BACRFA_30 ocorreram sob uma temperatura ambiente de 25 a 28°C, no BACRFA_45 a temperatura ambiente foi de 15 a 17°C. Temperaturas mais baixas significam maior morosidade na consolidação da matriz cimentícia do betão, facto que influencia o ganho de resistência nas idades mais jovens, mas que se desvanece para idades mais adultas. Repare-se que, a partir dos 3 dias de idade, a resistência alcançada pelo BACRFA_45 é já superior à alcançada pelo BACRFA_30. Na fase de amolecimento verifica-se uma queda de carga que aumenta, com a idade, para ambos os BACRFA, devido ao aumento da rigidez da matriz. Esta queda é mais acentuada para o BACRFA_30, logo aos 3 dias. De facto, a partir das 24 horas a resistência em pós-pico do BACRFA_45 é bastante superior à do BACRFA_30. A título de exemplo, verifique-se que, aos 28 dias de idade, para uma extensão de cerca de 6 ‰, a diferença de resistência entre estes betões é de 20 MPa, valor que demonstra bem a capacidade resistente do BACRFA_45 em fase pós-fendilhada, relativamente ao BACRFA_30. A Figura 4 representa a influência da idade dos diferentes BACRFA no valor médio de resistência à compressão, f_{cm} . Da análise da figura pode observar-se que, para as 12 horas, o BACRFA_45 apresentou uma resistência à compressão muito baixa (10 MPa), enquanto que o BACRFA_30 tem uma resistência à compressão de 25 MPa, pelo que a esta idade já excedia o pré-requisito de resistência de 20 MPa às 24 horas. A resistência à compressão aumentou com a idade do betão, tendo o BACRFA_45 atingido um f_{cm} de 66 MPa aos 28 dias, valor não muito diferente do que se obteve para o BACRFA_30, cerca de 62 MPa. A evolução da resistência à compressão com a idade, representada na Figura 4, indica que a partir dos 28 dias o aumento do f_{cm} é marginal em ambas as séries. Pode justificar-se este facto pelo uso de filler calcárico na pasta, material este que não tem actividade pozolânica.

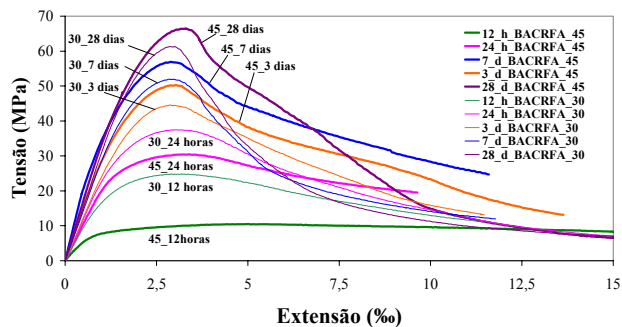


Figura 3 - Curvas tensão-extensão para cilindros de BACRFA_30 e BACRFA_45 de várias idades

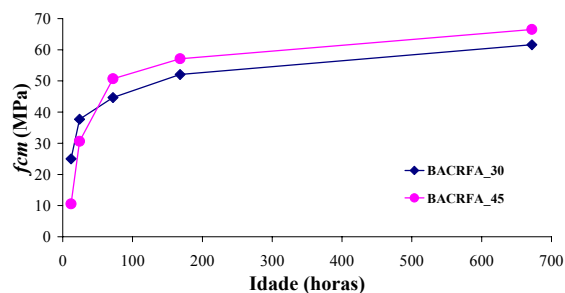


Figura 4 - Comparação da variação de f_{cm} com a idade.

5.3.2 – Flexão

As Figuras 5 e 6 representam curvas força-flecha ($F-\delta$) para as séries BACRFA_30 e BACRFA_45, respectivamente, representando cada curva a média dos registos de três provetes. Da análise dos resultados obtidos verifica-se que às 12 e 24 horas de idade o BACRFA_45 teve menor resistência à flexão do que os provetes de BACRFA_30. A partir das 24 horas, a resistência à flexão do BACRFA_45 foi sempre superior à do BACRFA_30. A menor resistência nas primeiras idades, principalmente às 12 horas, deveu-se às menores temperaturas registadas durante o programa BACRFA_45, conforme já foi referido. A Figura 7 mostra a influência da idade dos betões na força correspondente ao limite de proporcionalidade, F_L . Para ambos os BACRFA, F_L aumentou até aos 7 dias de idade. Acima desta idade registou-se um pequeno aumento no BACRFA_30, enquanto no BACRFA_45 verificou-se uma ligeira diminuição. Apesar da pequena diferença de F_L entre os dois BACRFA, principalmente a partir das 24 horas, a resistência à flexão do BACRFA_45 foi significativamente superior à do BACRFA_30, para essas idades. É notável verificar que no BACRFA_45 de 7 e 28 dias, o F_L é cerca de metade da capacidade máxima de carga dos provetes. Assim, nestes provetes, após o início da fendilhação, a capacidade de carga continuou a aumentar significativamente devido ao elevado número de fibras que atravessava a secção de fractura. No BACRFA_30, devido ao menor número de fibras na secção de fractura, assiste-se a uma queda de carga, praticamente logo após F_L . Essa queda foi tão mais acentuada quanto maior for F_L . Verifique-se que, para todas as idades analisadas, a carga máxima atingida pelos BACRFA foi superior ao valor de F_L , (embora não muito evidenciado no BACRFA_30). É, por isso, de salientar a diferença de comportamento destes betões em relação ao betão simples. É de referir ainda que todas as fases de endurecimento são seguidas de uma fase de amolecimento (*softening branch*) que se dá de forma suave, denotando tratar-se de materiais de ductilidade elevada. É de notar ainda que, enquanto no BACRFA_30 o valor de F_L é da mesma ordem de grandeza da máxima carga do provete, no BACRFA_45 o valor da capacidade de carga chega a ser o dobro do valor de F_L .

As Figuras 8 e 9 representam a influência da idade dos BACRFA nos parâmetros das resistências residual e equivalente à tracção em flexão. Tendo como base de comparação o BACRFA_30, verifica-se que os valores destes parâmetros foram sempre maiores nos BACRFA_45, excepto para as 12 horas. A diminuição da tensão residual na fase de amolecimento é mais significativa nas séries de provetes com 28 dias. Para o BACRFA_30 os parâmetros das tensões equivalentes (f_{eq}) e residual (f_R) diminuem entre os 7 e os 28 dias, uma vez que as propriedades de aderência e a eficácia da ancoragem das fibras são afectadas pela queda de carga ocorrida logo após δ_L . No BACRFA_45, apenas $f_{R,4}$ diminui entre os 7 e os 28 dias de idade dos provetes.

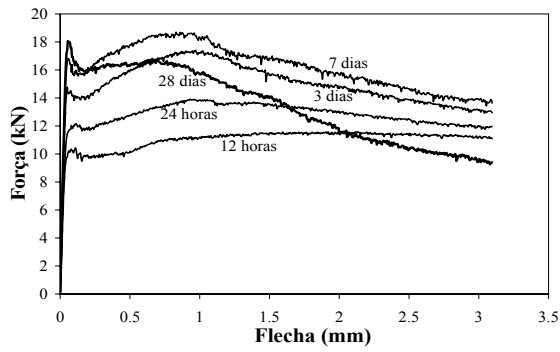


Figura 5 - Curvas força-flecha para provetes de BACRFA_30 de diferentes idades

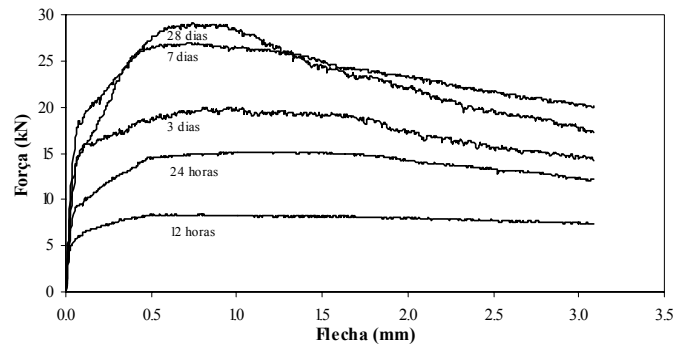


Figura 6 - Curvas força-flecha para provetes de BACRFA_45 de diferentes idades

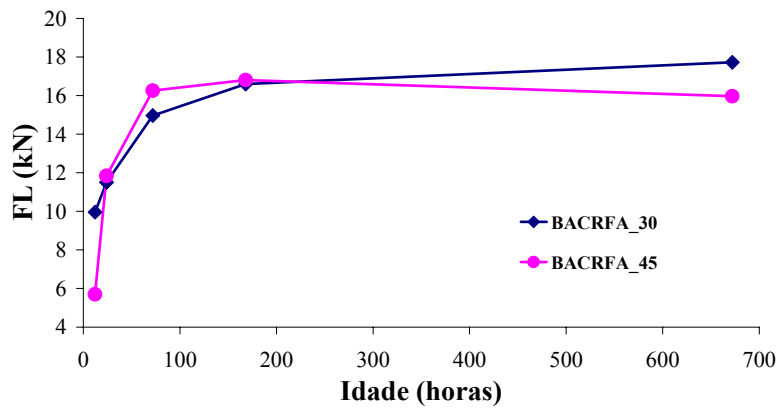


Figura 7 - Influência da idade do BACRFA na força limite de proporcionalidade dos BACRFA_30 e BACRFA_45

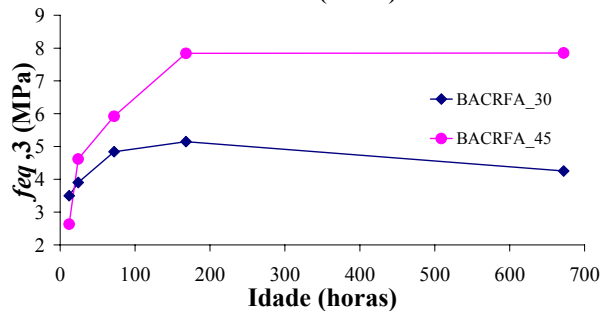
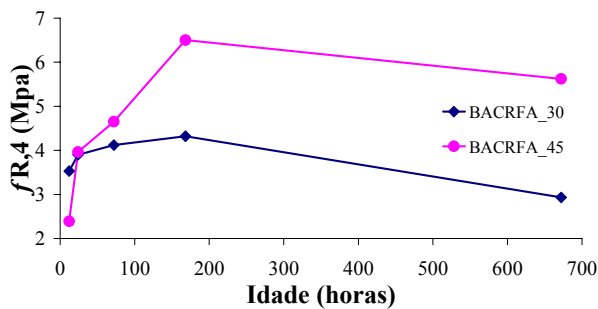
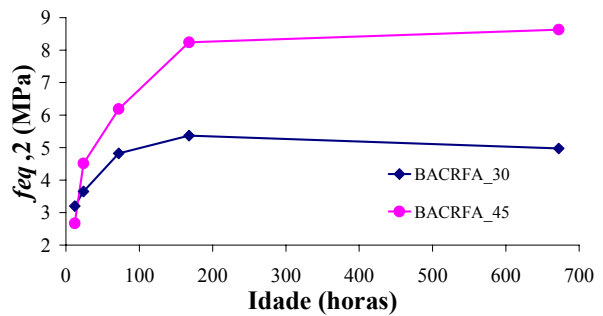
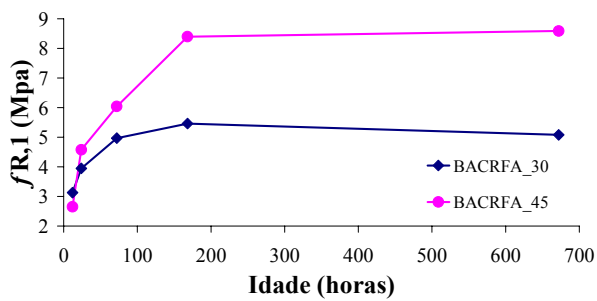


Figura 8 - Influência da idade do BACRFA nos parâmetros de resistência residual à tracção em flexão

Figura 9 - Influência da idade do BACRFA nos parâmetros de resistência equivalente à tracção em flexão

5.4. Ensaio em protótipos de painéis aligeirados

Protótipos de painéis aligeirados foram construídos para avaliar o seu comportamento sob carregamentos que conduzem a modos de rotura por flexão e punçoamento. Os testes em flexão visaram conhecer o comportamento do painel, que será aplicado em fachadas de edifícios, trabalhando portanto, maioritariamente, na vertical, estando sujeito, fundamentalmente, às cargas provocadas pelo vento. Devido à reduzida espessura da lâmina de compressão das zonas aligeiradas dos painéis (30 mm, ver Figura 10), foram efectuados ensaios de punçoamento para avaliar a resistência destas zonas sob a acção de cargas concentradas.

5.4.1 – Geometria do painel

A configuração geométrica do painel aligeirado desenvolvido no presente projecto de investigação está representada na Figura 10. As zonas de aligeiramento são constituídas por blocos $300 \times 300 \times 80 \text{ mm}^3$ de poliestireno, colados à cofragem, com uma camada de 30 mm de espessura de BACRFA que, na aplicação real, ficará voltada 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 com a espessura total do painel (110 mm). O programa experimental consistiu em ensaios de flexão com painéis de $1000 \times 1000 \text{ mm}^2$ e 110 mm espessura, e ensaios de punçoamento com painéis de $600 \times 600 \text{ mm}^2$ da mesma espessura. Estes ensaios foram realizados aos 7 dias de idade, tendo a desmoldagem dos painéis sido efectuada 24 horas após a betonagem. Os painéis foram betonados com as composições de BACRFA indicadas na Tabela 1.

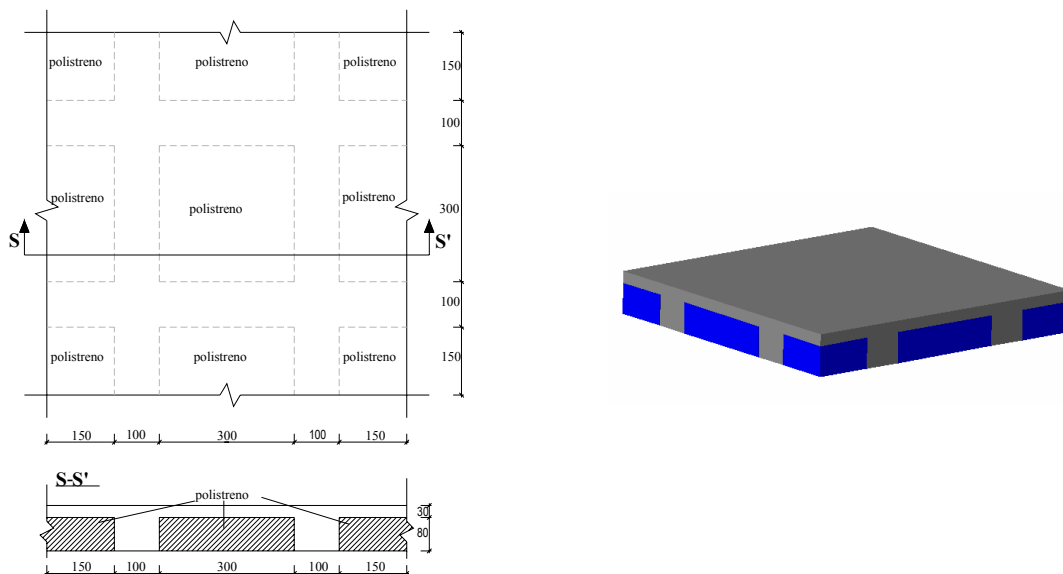


Figura 10 - Configuração geométrica do painel

5.4.2 – Ensaio de flexão

O objectivo do ensaio de flexão foi o de avaliar a capacidade de redistribuição de esforços nos painéis de BACRFA. Para tal, o painel foi apoiado em oito pontos para que o grau de hiperstaticidade fosse suficientemente elevado para permitir evidenciar o efeito das fibras após o início da fendilhação do painel (Figura 11). Os oito apoios eram constituídos por duas chapas de $100 \times 100 \times 20 \text{ mm}^3$, entre as quais existia uma esfera de 20 mm de

diâmetro, pelo que apenas o deslocamento vertical era impedido, ver Figura 12. Este sistema de apoio foi também aplicado entre o painel e o aparelho que aplicava quatro pontos de carga, ver Figura 13. A carga transmitida pelo actuador, alinhado com o centro do painel, era distribuída por quatro pontos de carga, ver Figura 12. O aparelho que transmitia os quatro pontos de carga foi concebido de forma a garantir uma distribuição homogénea da força do actuador pelos quatro pontos de carga. Na parte inferior do painel, no alinhamento dos quatro pontos de carga, foram colocados LVDTs de forma a registar a flecha nesses pontos, ver Figura 13. O ensaio foi realizado com um equipamento servo-controlado, tendo a força sido r por uma célula de carga de 200 kN de capacidade máxima. O ensaio decorreu sob controlo de deslocamento, à velocidade de 5 $\mu\text{m/s}$, tendo-se para tal utilizado o transdutor de deslocamentos do actuador.

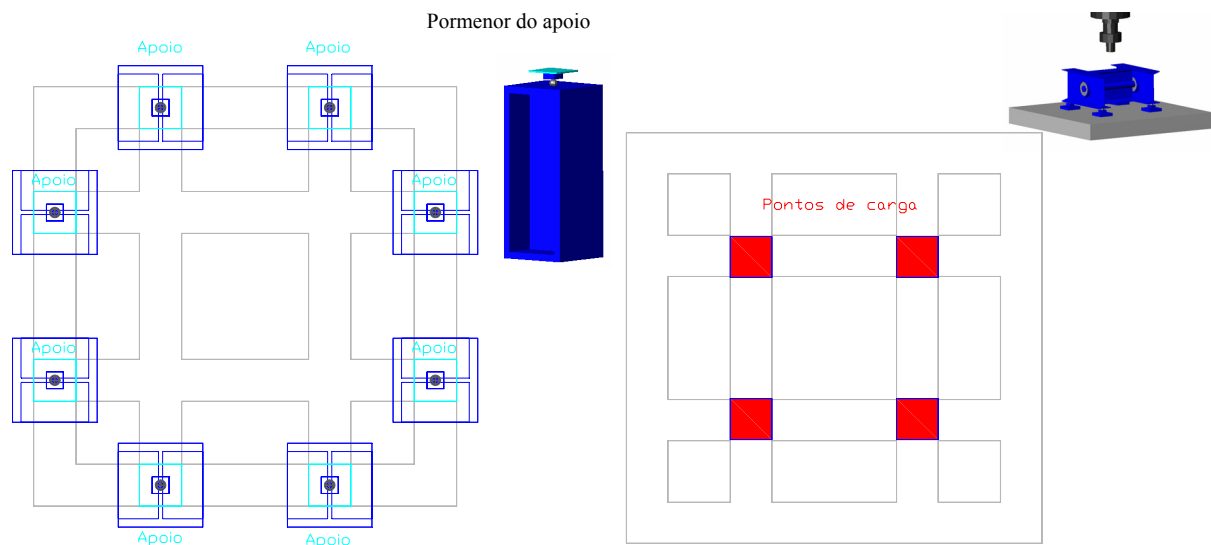


Figura 11 - Pontos de suporte do protótipo

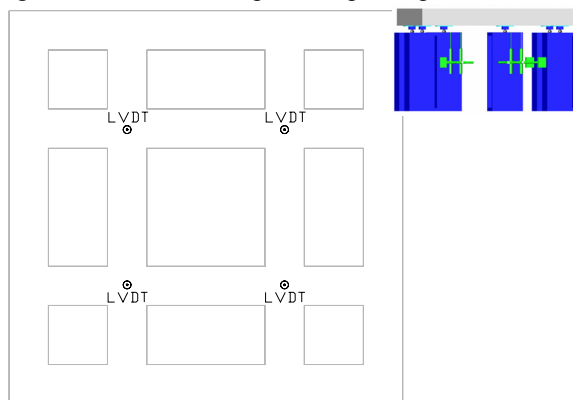


Figura 13 - Posicionamento dos LVDTs para medição da deformação do protótipo.

Figura 12 - Posicionamento dos pontos de carga



Figura 14 - Ensaio de flexão de protótipo de painel

Nas Figuras 15 e 16 está representada a relação entre a força e os deslocamentos registados nos quatro LVDTs, para os protótipos de painel de BACRFA_30 e BACRFA_45, respectivamente. Em ambos os painéis, o início da fendilhação ocorre para uma carga próxima de 40 kN. No painel de BACRFA_30 a capacidade de carga aumentou até cerca dos 55 kN, seguindo-se uma fase de amolecimento estrutural. No painel de BACRFA_45 o aumento de capacidade de carga após o início da fendilhação foi muito mais significativo, dado que a carga máxima excedeu os 100 kN. Após a carga de pico, o painel de BACRFA_45

também entrou numa fase de amolecimento. A partir do início da fendilhação, os LVDTs passaram a registar distintos deslocamentos devido à perda de simetria do painel motivada pelas características do padrão de fendilhação do painel e, conseqüentemente, das condições de apoio.

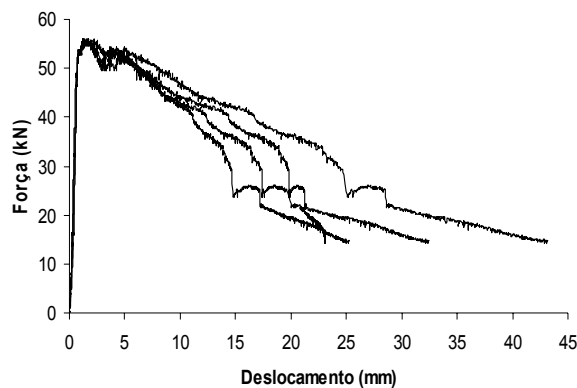


Figura 15 - Relação força-flecha registada nos LVDTs no BACRFA_30

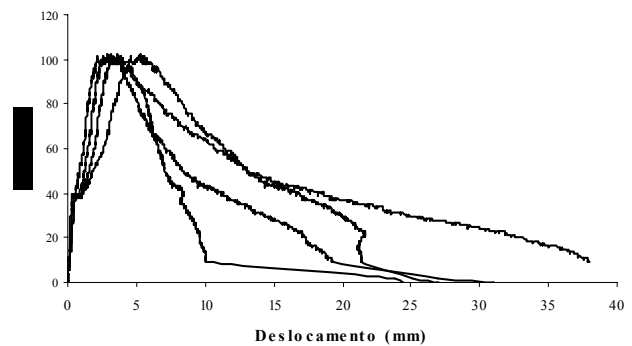


Figura 16 - Relação força-flecha registada nos LVDTs no BACRFA_45

Nas Figuras 17 e 18 podem ser observados os padrões de fendilhação dos painéis após o ensaio de flexão. Verifica-se que há uma tendência de localização das superfícies de rotura junto aos nós da “grelha”, dada a concentração de tensões nestas zonas de descontinuidade.



Figura 17 - Padrão de fendilhação do painel em BACRFA_30 no final do ensaio de flexão

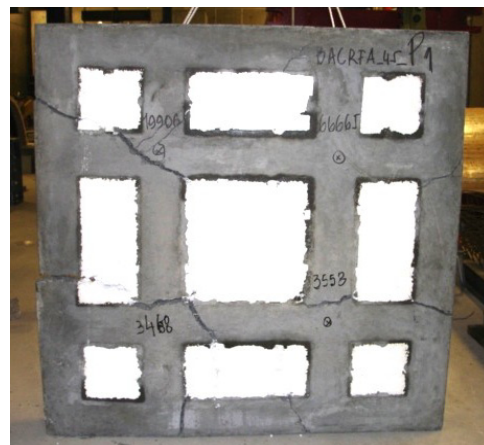


Figura 18 - Padrão de fendilhação do painel em BACRFA_45 no final do ensaio de flexão

5.4.3 – Ensaio de punção

Na Figura 19 representa-se a geometria do protótipo de painel utilizado para avaliar a resistência ao punção da sua zona aligeirada. Em todo o seu contorno, o painel encontrava-se apoiado em cilindros de aço, formando um aro de apoio de 500 mm de aresta. A carga foi aplicada por intermédio de um servo-actuator, sendo registada por uma célula de carga de 300 kN de capacidade máxima, fixada ao pistão do actuator. 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 deslocamento à velocidade de 25 $\mu\text{m/s}$, tendo-se para tal utilizado o transdutor interno do actuator. O ensaio terminava quando ocorria a rotura da camada de 30 mm da parte aligeirada do painel.

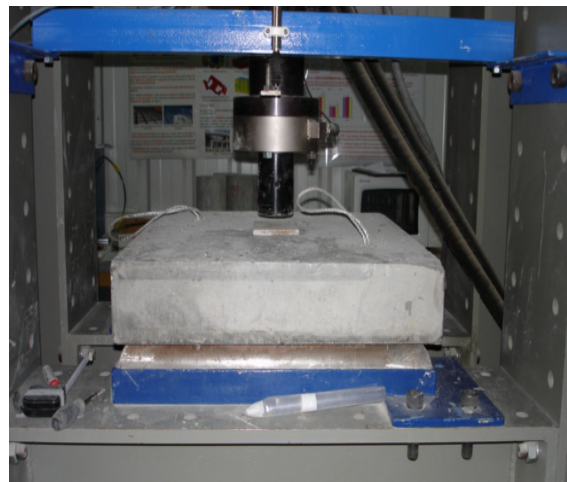
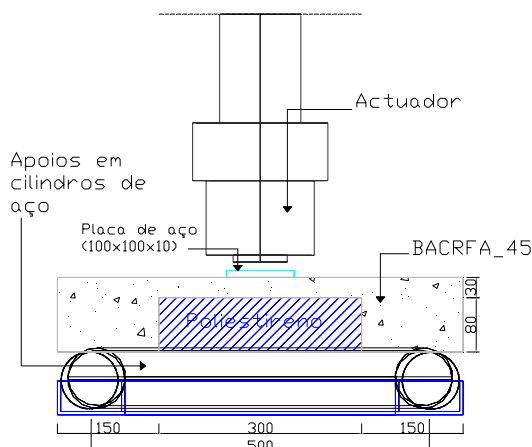


Figura 19 - Condições de apoio e configuração do carregamento do protótipo de painel

A Figura 20a apresenta a relação entre a força aplicada e o deslocamento registado no LVDT, que mediu a penetração da placa de aço na camada de 30 mm nos painéis dos dois tipos de BACRFA. Na Figura 20b apresenta-se a relação força-deslocamento até uma flecha próxima de 10% da espessura da camada de BACRFA da zona de aligeiramento do painel. Por volta desta flecha, ambos os painéis entraram em amolecimento estrutural. Com base na observação do gráfico força-deslocamento pode-se concluir que o BACRFA_30, ao atingir 40 kN para um deslocamento de 1.3 mm, mantém a capacidade de carga até uma penetração da placa de cerca de 3 mm. O BACRFA_45, por sua vez, ao atingir uma força de 41 kN, para um deslocamento de aproximadamente 1.7 mm, sofre uma pequena queda na capacidade de carga, provocada pelo início da fendilhação da matriz. Uma vez que este BACRFA possui maior percentagem de fibras, estas contribuíram para que, após essa queda de carga, a capacidade portante do painel voltasse a aumentar, tendo alcançado a carga de 68 kN, para a flecha de aproximadamente 3.0 mm. A partir desta flecha, a capacidade de carga manteve-se constante até uma penetração da placa da ordem dos 3.2 mm. Os BACRFA_45 e BACRFA_30 revelaram ter ductilidade suficiente para sustentar níveis elevados de carga até perfurações da ordem dos 10% da espessura da camada mais fina do painel.

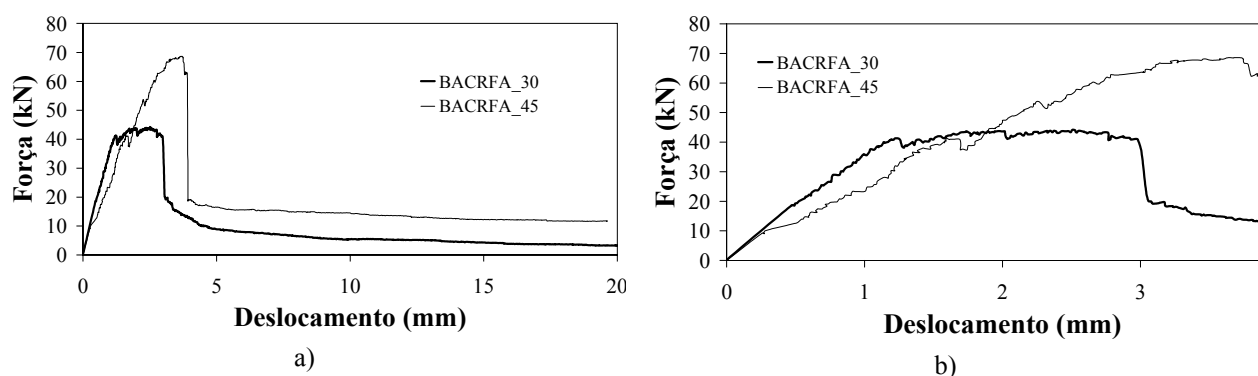


Figura 20 - Relação força-deslocamento no ensaio de punção dos painéis de BACRFA_30 e BACRFA_45

A Figura 21 mostra o modo de rotura típico observado nos painéis ensaiados. Verifica-se que, para além do contorno crítico formado pela superfície de rotura por punção, originou-se uma linha de rotura devida a momentos negativos. Tal só foi possível devido à resistência oferecida pelas fibras à propagação da superfície de rotura por punção.



Figura 21 - Modo típico de rotura nos ensaios de punção

6. FABRICAÇÃO E ENSAIO DE PAINEL REAL EM AMBIENTE INDUSTRIAL

6.1. Construção do protótipo

A última fase do projecto consistiu no fabrico, em ambiente industrial (instalações da Prêgaia, em São Félix da Marinha) de um painel à “escala real”. A configuração do painel encontra-se representada na Figura 22, tendo o painel dimensões em planta de 4.1 m por 2.2 m.

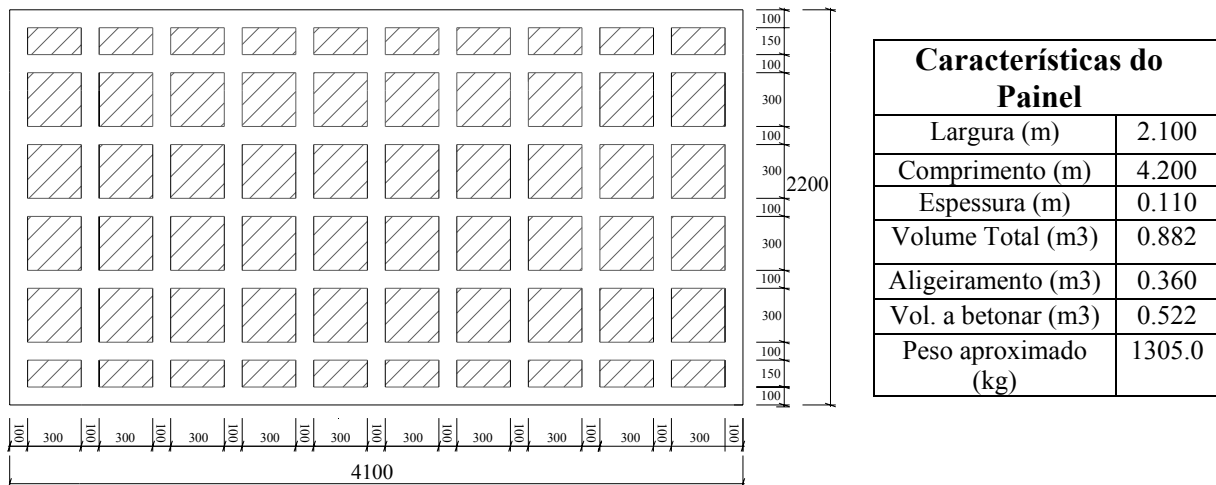


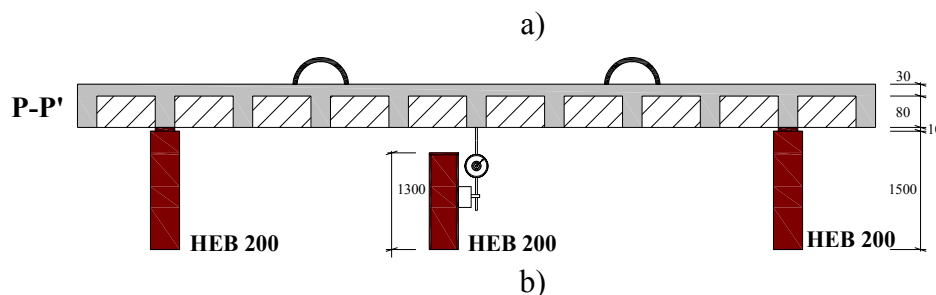
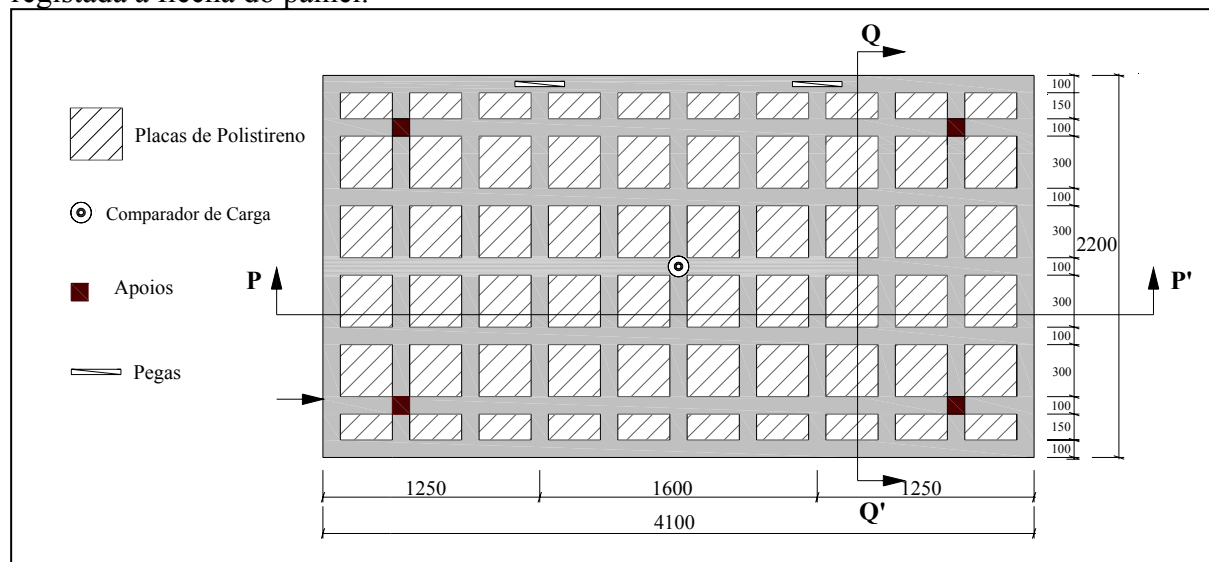
Figura 22 - Geometria do painel (dimensões em milímetros)

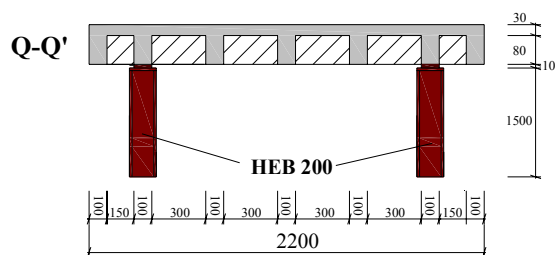
Na construção do painel, foram seguidos todos os procedimentos preconizados pelo projecto PABERFIA, em termos de composição de betão e de definições dos aspectos técnicos que foram exigidos pela empresa promotora do projecto. Para a betonagem do painel foram realizadas duas amassaduras de 400 dm³. Para além do painel foram betonados três prismas de 0.15×0.15×0.6 m³ e três cilindros de 0.15 m de diâmetro e 0.3 m de altura e foram efectuados ensaios para avaliar as características de auto-compactabilidade do betão utilizado: o painel foi betonado com BACRFA_45. A pesagem dos materiais em ambiente industrial não pode ser efectuada com o rigor possibilitado pelas condições laboratoriais. Esse facto poderia levar a que a composição saísse bastante afectada em termos de desempenho. A maior preocupação recaiu sobre o parâmetro *água*: neste tipo de betões, dada a quantidade de superplastificante utilizada, uma pequena quantidade de água a mais poderá fazer com que o betão segregue,

inutilizando a amassadura. Assim, durante as amassaduras, a quantidade de água foi sendo adicionada de forma gradual. Parando a misturadora, foram retiradas amostras de betão com as quais se realizou o ensaio de espalhamento com o cone invertido, de forma a determinar a quantidade de água necessária para garantir as propriedades de auto-compactabilidade. No final deste procedimento constatou-se que a água adicionada foi semelhante à utilizada na composição em laboratório, pelo que a metodologia seguida na concepção de BACRFA garante o desenvolvimento de betão com propriedades de auto-compactabilidade em ambiente industrial. Os valores dos ensaios de espalhamento foram de 600 mm e 630 mm para as amassaduras 1 e 2, respectivamente. O valor do C_{bl} fornecido pelo ensaio de L-Box foi de 0.80, valor aceitável para este tipo de betão (Barros *et al.* 2005). A desmoldagem do painel foi realizada no dia seguinte, com 24 horas de idade. O painel foi retirado da mesa de cofragem em posição praticamente vertical, de acordo com o procedimento adoptado pela empresa neste tipo de estruturas.

6.2. Ensaio de carga

Nas Figuras 23 e 24 representam-se as condições de suporte do painel e o ponto onde foi registada a flecha do painel.





c)

Figura 23 - Configuração do ensaio de carga: a) Aspecto geral; b) Corte P-P'; c) Corte Q-Q' (dimensões em mm)

A aplicação de carga foi efectuada por intermédio da colocação de lajetas de pavimento, com $500 \times 500 \text{ mm}^2$, pesando cada peça 25 kg. Na zona entre apoios foram colocadas, numa primeira fase, seis fiadas de 3 lajetas. A segunda fase do carregamento seria constituída pela colocação de uma nova camada de 18 lajetas. No entanto, após colocadas 15 lajetas, ocorreu um aumento significativo de flecha, pelo que se decidiu interromper o ensaio por questões de segurança, tendo a placa suportado um total de 33 placas (Figura 25), a que corresponde uma carga distribuída por unidade de área de $8.25 / (3.1 \times 1.5) = 1.77 \text{ kN/m}^2$. No final do ensaio, a fenda de rotura tinha uma abertura máxima da ordem dos 3 mm, sendo visível a existência de fibras a ligar a duas faces desta fenda.



Figura 24 - Colocação do painel



Figura 25 - Operação de colocação das lajetas

O sistema de aquisição de dados forneceu o valor da flecha a meio vão ao longo do tempo. Após a colocação da última lajeta da primeira série de 18, ocorreu a abertura de uma fenda, quando a flecha era de 24 mm. Ao longo do processo de colocação da segunda série de lajetas, foi visível o desenvolvimento da abertura desta fenda e a criação de outras fendas, até que se deu por terminado o ensaio, à flecha de 43.7 mm. A pressão a que o painel resistiu, 1.77 kN/m^2 , é superior ao valor característico da pressão dinâmica do vento em edifícios com altura inferior a 100 m acima do solo, localizados na zona A, em zonas de rugosidade tipo II (RSA, 1983). Pode assim concluir-se que, para a maior parte dos edifícios onde se utilizam painéis de fachada, a configuração do painel em BACRFA_45 desenvolvido é adequada em termos de segurança estrutural.

7. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi brevemente descrito um método de concepção para betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (BACRFA) de custo competitivo, a ser utilizado no

fabrico de painéis de fachada para edifícios. O BACRFA concebido atingiu todas as características de auto-compactabilidade exigidas, bem como os requisitos de resistência, nomeadamente, resistência à compressão às 24 horas superior a 20 MPa, sem que a quantidade de cimento por m^3 de betão tivesse excedido os 400 kg. A resistência à compressão do BACRFA desenvolvido satisfaz as exigências da indústria da pré-fabricação, com valores bastante elevados às primeiras horas de vida, continuando a sê-lo para as idades mais avançadas. Não sendo um requisito *a priori*, a verdade é que o BACRFA desenvolvido pode ser considerado um betão de resistência elevada. Este facto, derivado da compacidade do betão, antevê uma durabilidade superior à de um betão que, tradicionalmente, seja vibrado quando colocado em obra.

No que se refere ao comportamento à flexão, os valores das resistências equivalentes e residuais obtidos traduzem uma capacidade apreciável que este material tem de continuar a resistir a esforços depois de fendilhar. A elevada ductilidade, principalmente do betão auto-compactável reforçado com $45 \text{ kg}/m^3$ de fibras, permite que a capacidade de carga de estruturas com algum grau de hiperestaticidade, construídas com este material, seja significativamente superior à carga de início de fendilhação. Estes benefícios traduzem-se num aumento da segurança, dado que contribuem para que não ocorram modos de rotura frágeis. Num momento da nossa história em que é recorrente a temática das catástrofes naturais - entre as quais, os sismos - e da construção sustentável, é recomendável a utilização de materiais de custo competitivo e que incluam componentes de relativo baixo valor energético na sua produção, e que tenham elevada capacidade de absorção de energia. Crê-se que o BACRFA é um desses materiais, dadas as capacidades denotadas no presente trabalho.

Em termos de comportamento estrutural, o desempenho do sistema concebido foi avaliado e aprovado por intermédio de ensaios de flexão e de punçoamento com protótipos de painel. O comportamento registado nestes ensaios revelou que o reforço proporcionado pelas fibras garante elevada capacidade de redistribuição de esforços, dado que a carga máxima foi significativamente superior à carga de início de fendilhação. Essa *decalage* foi tanto mais significativa quanto maior foi a percentagem de fibras.

A fabricação de um painel à escala real permitiu aferir a aplicabilidade do BACRFA na produção industrial. A composição manteve-se estável, sem que ocorressem fenómenos de segregação. Esta fase serviu para verificar o comportamento do betão quando aplicado em escala industrial (em termos de auto-compactabilidade), revelando os parâmetros que devem ser ajustados para que o BACRFA possa ser usado nas linhas de produção da empresa de pré-fabricação associada a este projecto. Foi possível averiguar o acabamento (em termos visuais) que este material confere aos painéis. O acabamento final das peças betonadas foi bastante satisfatório ainda que possam ser melhorados alguns aspectos.

O ensaio de carga do painel foi, propositadamente, realizado da forma mais desfavorável possível: note-se que estes elementos estruturais serão aplicados na vertical (fachadas de edifícios) e não na horizontal, como decorreu o ensaio de carga. O painel ensaiado resistiu ao seu próprio peso e a uma sobrecarga de aproximadamente $1.77 \text{ kN}/m^2$, indicando ter propriedades estruturais suficientes para resistir à acção do vento, que, a par da fase de desmolde e transporte para *stock* do painel, é a mais desfavorável.

8. AGRADECIMENTOS

O estudo descrito neste artigo é parte integrante do programa de investigação “Prefabricated sandwich steel fiber reinforced panels” apoiado pelos FEDER e MCT, e promovido pela ADI (45% do montante solicitado). O terceiro e quarto autores agradecem as bolsas concedidas ao abrigo deste projecto de investigação. Este projecto envolveu as empresas PREGAIA e CIVITEST e a Universidade do Minho. Os autores gostariam de agradecer a cedência dos materiais empregues, gentilmente cedidos pela *degussa* (superplastificante), *SECIL* (cimento), *Bekaert* (fibras) e *Comital* (filler calcárico). Agradece-se ainda a colaboração da Empresa *FiberSensing* pela colaboração prestada na monitorização do protótipo ensaiado na Prégia.

9. REFERÊNCIAS

- Barros, J.A.O., Pereira, E.B., Santos, S.P.F., Lightweight panels of steel fiber reinforced self-compacting concrete, aceite para publicação no *Journal of Materials in Civil Engineering*, (2006).
- Barros, J.A.O. et al., *PABERFIA- Lightweight sandwich panels in steel fiber reinforced self compacting concrete*, Technical report 05-DEC/E-29, Dep. Civil Eng., School Eng. University of Minho, 63 p., November (2005).
- Barros, J.A.O., Pereira, E.B., Ribeiro, A.F., Antunes J.A.B., Self-compacting steel fibre reinforced concrete for precasted sandwich panels – experimental and numerical research, *Workshop of 6th International RILEM Symposium on fibre reinforced concrete - BEFIB 2004*, 24-25 September (2004). (artigo convidado)
- Barros, J.A.O., Figueiras, J.A., Experimental behaviour of fiber concrete slabs on soil, *Journal Mechanics of Cohesive-frictional Materials*, 3, p. 277-290, (1998).
- Barros, J.A.O., Ribeiro, A.F., Cunha, V.M.C.F., Antunes, J.A.B., Fibras de aço no reforço ao corte de vigas de betão armado, *Seminário sobre Dimensionamento de estruturas de betão reforçado com fibras*, Eds. J. Barros, P. Rossi e B. Massicotte, Guimarães, p. 7.1-7.32, 28 Novembro (2003).
- 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, 502 p, Dezembro (1995).
- Bijen, J., Durability of some glass fiber reinforced cement composites, *ACI Journal*, 80 (4), 305-313, (1983).
- EFNARC, *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*, ISBN 0 9539733 4 4, 32 pp., (2002).
- Majumdar, A.J., Laws, V., *Glass fibre reinforced cement*. BSP, Oxford, 197 pp., (1991).
- Gomes, P.C.C., *Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete*. PhD thesis, UPC, Barcelona, Spain. (2002)
- 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.Petersson (editors), RILEM Publications S.A.R.L, (1999)
- Qi, C., Weiss, J. and Olek, J., Statistical Significance of the Restrained Slab Test for Quantifying Plastic Cracking in Fibre Reinforced Concrete. Accepted for publication in the *ASTM Journal of Testing and Evaluation*, Jan (2005).
- 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>).
- Pereira, E.B., Barros, J.A.O., Ribeiro, A.F., Camões, A.F.F.L., Post-cracking behaviour of selfcompacting steel fibre reinforced concrete, *6th International RILEM Symposium on fibre reinforced concrete - BEFIB 2004*, Vol. 2, pp. 1371-1380, Edts. M. di Prisco, R. Felicetti, G.A. Plizzari, 20-22 de Setembro, (2004).
- RSA, Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes*, Decreto-Lei N.º.235/83 de 31 de Maio

Sena-Cruz, J.M., Barros, J.A.O., Fernandes, A., Azevedo, A.F.M. & Camões, A.F.F.L., Stress-crack opening relationship of enhanced performance concrete, *9th Portuguese Conference on Fracture*, Setúbal, Portugal, 18-20 February (2004).

RILEM TC 162-TDF, Test and design methods for steel fibre reinforced concrete - Final Recommendation, *Materials and Structures* 35(253): 579-582, (2002).

RILEM TC 162-TDF, Test and design methods for steel fiber reinforced concrete. Recommendations for σ - ε design method, *Materials and Structures*, 33(226), Mar-Apr., pp. 75-81, (2000).