

*bac2010 - 2º Congresso Ibérico sobre betão auto-compactável
2º Congreso Ibérico sobre hormigón auto-compactável
Guimarães – 1 e 2 de Julho de 2010*

Avaliação da heterogeneidade das propriedades mecânicas de um BACRFA em elementos estruturais

Joaquim Barros¹ Lúcio Lourenço² Delfina Gonçalves³

Bárbara Durães⁴ Nuno Alves⁵ Ângela Nunes⁶

RESUMO

O presente trabalho refere-se à avaliação da heterogeneidade das propriedades mecânicas de um Betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras de Aço (BACRFA) ao longo de elementos estruturais. O programa experimental foi composto por séries de elementos com diferentes alturas e distintos comprimentos de modo a avaliar a influência da direcção preferencial de fluxo do BACRFA nas propriedades deste. O estudo acerca da utilização de BACRFA em fundações contínuas foi iniciado neste trabalho por intermédio da sua aplicação num protótipo tipo grelha que pretende simular aquele sistema estrutural. O betão fresco foi descarregado na mesma zona em todos os elementos com o intuito de avaliar a influência da distância de percurso do BACRFA nas suas propriedades. A variação das propriedades do BACRFA ao longo do desenvolvimento dos elementos foi efectuada recorrendo aos seguintes ensaios: velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas; peso volúmico; resistência à compressão; resistência à flexão; teor e distribuição das fibras de aço.

PALAVRAS-CHAVE

Betão auto-compactável reforçado com fibras de aço; flexão; UPV; distribuição de fibras.

¹ ISISE, Universidade do Minho, Depart. de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal. barros@civil.uminho.pt

² CiviTest, Pesquisa de Novos Materiais para a Engenharia Civil, Braga, Portugal. luciolourenco@civitest.com

³ CiviTest, Pesquisa de Novos Materiais para a Engenharia Civil, Braga, Portugal. delfinagoncalves@civitest.com

⁴ Aluna Mestrado, Universidade do Minho, Depart. de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal. barbaraduraes@gmail.com

⁵ SECIL, Setúbal, Portugal. nuno.martins.alves@secil.pt

⁶ SECIL, Setúbal, Portugal. angela.nunes@secil.pt

1. INTRODUÇÃO

A aplicação de fibras de aço em substituição parcial ou total de armaduras convencionais em certos elementos de betão pode proporcionar várias vantagens, nomeadamente, económicas (provenientes da eliminação da mão-de-obra de montagem e colocação de armaduras) e técnicas (homogeneidade do reforço, aumento de ductilidade, maior durabilidade e resistência ao choque, e melhoria do comportamento do betão quando fendilhado) [1]. O Betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras de Aço (BACRFA) é um material que alia as vantagens inerentes à adição de fibras de aço a materiais de matriz cimentícia com as que resultam do facto de se tratar de um material que possui elevada capacidade de fluir, contornar obstáculos, preencher zonas de difícil acesso, sem ocorrência de segregação dos seus constituintes [2, 3]. Contudo, o bom desempenho de um BACRFA depende, entre outros, de uma distribuição homogénea das fibras de aço e, conseqüentemente, de um comportamento mecânico homogéneo. A investigação centrada no estudo da variação das propriedades de um BACRFA que mais condicionam o comportamento até à rotura de um elemento estrutural torna-se, assim, essencial, tanto ao nível do projecto (no estabelecimento de coeficientes de segurança) como ao nível do controlo de qualidade em obra.

Com o intuito de contribuir para um melhor conhecimento relativo à variação das propriedades de um BACRFA ao longo de elementos estruturais com diferentes propriedades geométricas, foram moldados vários tipos de elementos, com desenvolvimento vertical e horizontal. O estudo acerca das possibilidades e desafios da utilização de um BACRFA em fundações contínuas de moradias iniciou-se no presente trabalho, com a concepção de um molde tipo grelha que pretende ser representativo daquele sistema estrutural. No presente trabalho são abordadas algumas questões ligadas com a composição do BACRFA desenvolvido, suas propriedades de fluxo e comportamento mecânico deste compósito em distintos pontos dos elementos. A presente comunicação descreve os ensaios efectuados, e apresenta e discute os principais resultados obtidos.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Composição do BACRFA

Na composição seleccionada para o BACRFA foi adoptado cimento (CEM) do tipo I 42.5 R, cinzas volantes (CV), areia fina (AF), meia areia (MA), brita calcária 5-12 mm (BC), superplastificante (SP) de terceira geração (SIKA ViscoCrete 3009 HE) e fibras discretas de aço (FA) com comprimento, l_{fa} , de 30 mm, diâmetro, d_{fa} , de 0.4 mm, relação comprimento/diâmetro, l_{fa}/d_{fa} , de 75 e tensão de cedência de 1100 MPa (ver Quadro 1). Uma descrição detalhada da metodologia adoptada para a concepção de um BACRFA pode ser encontrada em Pereira, 2006 [4]. De modo a aferir a auto-compactibilidade do BACRFA foram realizados os ensaios de espalhamento (ver Fig. 1) e “caixa L” (ver Fig. 2), segundo as recomendações do EFNARC [5], tendo-se obtido um espalhamento de 70 cm e uma razão h_2/h_1 de 0,8.

Quadro 1. Composição adoptada para o BACRFA (por m^3 de betão)

CEM	CV	Água	AF	MA	BC	SP	FA
[kg]	[kg]	[dm^3]	[kg]	[kg]	[kg]	[dm^3]	[kg]
300,0	200,0	140,0	300,6	755,2	503,4	5,7	45,0

2.2 Provetes e procedimentos de ensaio

A avaliação da resistência à compressão do BACRFA desenvolvido foi efectuada recorrendo a provetes cilíndricos normalizados de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. O comportamento à flexão do BACRFA foi determinado por intermédio da execução de ensaios em vigas com 600 mm de comprimento e secção transversal de $150 \times 150 \text{ mm}^2$ segundo a metodologia recomendada pelo RILEM [6], de modo a caracterizar a resistência equivalente de tracção em flexão do BACRFA. Estes

ensaios foram realizados 7 dias após a moldagem dos provetes. A betonagem foi realizada em ambiente fabril.



Fig. 1. Ensaio de espalhamento com o cone de Abrams.

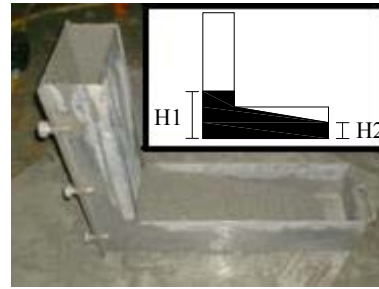


Fig. 2. Ensaio de caixa-L.

Para avaliar a heterogeneidade das propriedades do BACRFA quando aplicado em elementos com desenvolvimento vertical, recorreu-se a moldes prismáticos (com base de $360 \times 90 \text{ mm}^2$ e alturas de 500 mm e 1000 mm) e tubos com 110 mm de diâmetro e 1000 mm de altura (betonados na vertical – ver Fig. 3). Sete dias após a betonagem, os elementos prismáticos foram cortados em vigas com secção transversal de $90 \times 90 \text{ mm}^2$ e 360 mm de comprimento, aproximadamente (efectuou-se um entalhe nos provetes para que a fendilhação progredisse pela secção entalhada). Após o ensaio à flexão destas vigas, foi retirada uma carote destes provetes prismáticos para avaliação do teor em fibras. Os tubos moldados foram cortados em cilindros com 110 mm de diâmetro e 220 mm de altura, aproximadamente, com o intuito de avaliar a resistência à compressão e do teor em fibras.

Relativamente à avaliação da heterogeneidade das propriedades do BACRFA quando este é aplicado em elementos com desenvolvimento horizontal, recorreu-se a três moldes prismáticos com altura de 90 mm e bases de $2000 \times 360 \text{ mm}^2$, $4000 \times 360 \text{ mm}^2$ e $6000 \times 360 \text{ mm}^2$, respectivamente (ver Figs. 3 e 4). Estes elementos foram igualmente cortados em vigas com secção transversal de $90 \times 90 \text{ mm}^2$ e 360 mm de comprimento para ensaio à flexão e posterior extracção de uma carote para avaliação do teor em fibras. O BACRFA aplicado no molde com base de $6000 \times 360 \text{ mm}^2$ foi dividido em duas partes iguais: a primeira, em que as vigas foram cortadas na direcção perpendicular ao sentido de escoamento; a segunda, com o corte a proporcionar vigas na direcção paralela ao sentido de escoamento do BACRFA. Este procedimento teve como objectivo avaliar a influência da direcção das fibras de aço no comportamento à flexão do BACRFA aplicado.

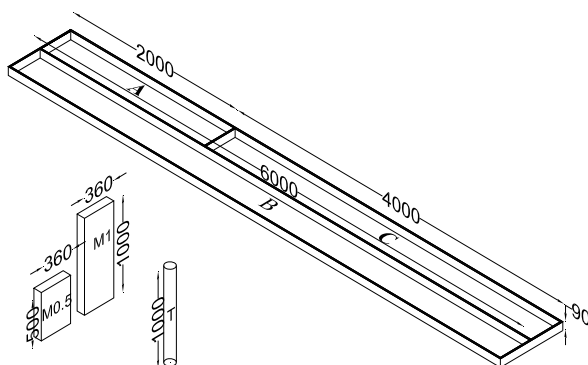


Fig. 3. Moldes utilizados (desenvolvimento horizontal e vertical, mm).



Fig. 4. Moldes horizontais.

O BACRFA foi também aplicado num molde que pretende ser representativo de uma fundação em grelha para edificações. Os principais objectivos da presente fase deste estudo passam por estimar as exigências colocadas ao nível do grau de fluidez a atribuir ao BACRFA e avaliar a influência das condições de escoamento impostas por este sistema estrutural na distribuição de fibras ao longo do percurso do BACRFA e, conseqüentemente, nas suas propriedades (ver Fig. 5). A secção transversal dos elementos que constituem o modelo de grelha é $150 \times 150 \text{ mm}^2$. Este molde foi betonado a partir do

seu centro, tendo sido medidas a espessura das secções do BACRFA em distintos pontos do modelo, de forma a avaliar a capacidade de fluidez do BACRFA ao longo do percurso efectuado. Foram retiradas vigas e carotes de zonas distintas da grelha para avaliação da resistência à flexão e teor em fibras, respectivamente.

Na secção de fractura das vigas ensaiadas foi determinado o número e a distribuição das fibras de aço na referida secção. Para tal, a secção de fractura foi discretizada em células de acordo com o esquema ilustrado na Fig. 6. Segundo Robins *et al.* [7] uma fibra pode ser considerada efectiva em termos de resistência ao arranque se o seu comprimento de deslizamento for maior que o comprimento da extremidade dobrada da fibra (neste trabalho foram utilizadas fibras com extremidades dobradas).

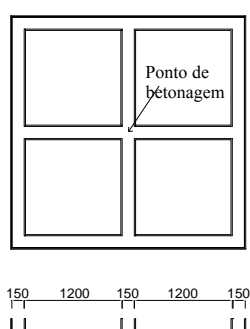


Fig. 5. Protótipo de grelha de fundação (dimensões em mm).



	30	30	30	30	30
	1ª Col	2ª Col	3ª Col	4ª Col	5ª Col
35	1	2	3	4	5
30	6	7	8	9	10
30	11	12	13	14	15
30	16	17	18	19	20
Entalhe					

Fig. 6. Discretização da secção de fractura (dimensões em mm).

O ensaio de medição da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas (Ultrasonic Pulse Velocity, UPV) no betão apresenta elevado potencial para avaliação da heterogeneidade das propriedades deste. Este tipo de ensaio não destrutivo consiste na determinação do tempo de propagação de um impulso ultra-sónico entre dois pontos de medida. A medição da UPV pode fornecer informações sobre as características mecânicas do betão, homogeneidade e eventual presença de fissuras ou defeitos. A metodologia deste ensaio é regida pela NP EN 12504-4 [8]. Assim, em todos os provetes referidos anteriormente (para o desenvolvimento vertical e horizontal) foi também avaliada a UPV no BACRFA.

3. RESULTADOS

3.1 Caracterização do betão

Na Fig. 7 apresenta-se a relação tensão vs extensão, σ - ϵ , obtida nos ensaios de compressão directa em provetes normalizados do BACRFA desenvolvido, com 7 dias de idade (26 MPa de valor médio da resistência à compressão). Na mesma figura apresenta-se a relação σ - ϵ prevista para um Betão Simples (BS - sem fibras metálicas) com a mesma classe resistente, de acordo com o proposto em CEB-FIP 1990 [9]. A relação tensão vs deslocamento vertical a meio vão obtida nos ensaios de flexão para os provetes prismáticos normalizados está exposta na Fig. 8. A distribuição das fibras de aço na secção de fractura, de acordo com a Fig. 6, está apresentada no Quadro 2.

Os resultados apresentados na Fig. 7 evidenciam os benefícios da utilização de fibras de aço no comportamento do betão em compressão, proporcionando acréscimos significativos de resistência residual (fase pós pico). Relativamente ao comportamento em flexão do BACRFA, verifica-se que a tensão máxima de tracção em flexão foi de 8,4 MPa. Para um BS com a mesma classe de resistência, aplicando as recomendações do CEB-FIP 1990 [9] era expectável uma tensão máxima de apenas 3,8 MPa [10]. Com base nestas curvas e nas recomendações da RILEM TC 162TDF [6] para caracterizar o comportamento pós-fendilhado do Betão Reforçado com Fibras (BRF) obtiveram-se, para os parâmetros de resistência equivalente à tracção em flexão, $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$, os valores de 6,61 e 6,79 MPa, respectivamente (valores médios). Segundo aquele comité técnico [6], $f_{eq,2}$ é utilizado nas

verificações para estados limite de utilização, enquanto $f_{eq,3}$ é aplicado nas verificações para estados limite últimos.

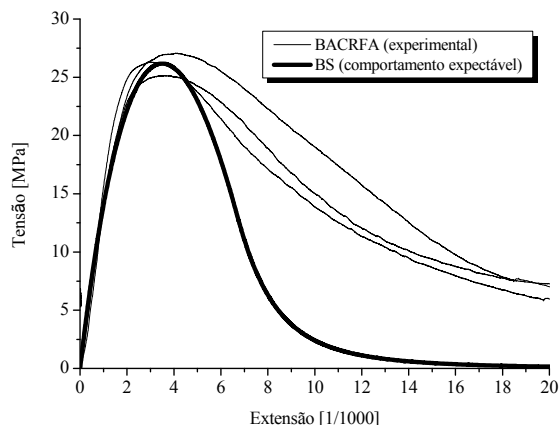


Fig. 7. Relação tensão vs extensão de compressão.

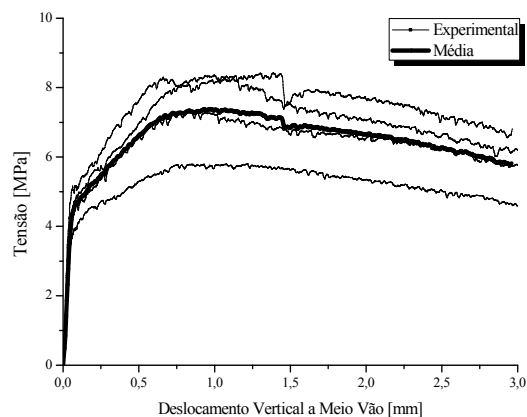


Fig. 8. Relação tensão vs deslocamento vertical a meio vão.

Quadro 2. Distribuição das fibras na secção dos provetes

	1ª coluna	2ª coluna	3ª coluna	4ª coluna	5ª coluna
4ª linha	6,5 (4,1) [62,4]	7,4 (2,4) [32,2]	5,4 (2,6) [48,2]	6,8 (3,9) [56,4]	5,0 (3,6) [71,4]
3ª linha	6,6 (2,9) [44,6]	6,1 (3,2) [52,7]	5,5 (1,6) [29,5]	7,8 (4,7) [60,1]	6,5 (5,0) [76,4]
2ª linha	6,0 (3,0) [50,3]	6,8 (4,2) [60,8]	5,8 (2,9) [50,4]	7,8 (2,0) [25,4]	6,0 (3,6) [60,7]
1ª linha	5,2 (3,0) [57,7]	5,8 (3,3) [57,0]	5,7 (3,0) [52,3]	4,6 (1,4) [31,5]	6,1 (4,1) [66,7]

: Média ; () : Desvio Padrão; [] : Coeficiente de variação (%)

Da análise dos resultados da distribuição de fibras de aço na secção de fractura dos provetes de flexão incluídos no Quadro 2 constata-se não haver uma tendência de aumento da percentagem de fibras na direcção de betonagem (na direcção das linhas, ver Fig. 6), tendência esta constatada nos BRF aplicados com recurso a vibração [11]. É de realçar os elevados coeficientes de variação por célula. No entanto, deve ser tido em conta o facto destes resultados dizerem respeito somente a 4 provetes. Considerando os valores médios por célula, o valor médio de fibras na secção de fractura é 6,2, com um coeficiente de variação de 14%.

3.2 Variação das propriedades do BACRFA em elementos com desenvolvimento em altura

Na Fig. 9 apresenta-se a variação relativa das propriedades mecânicas do BACRFA medidas ao longo da altura dos elementos cilíndricos. A variação relativa apresentada na figura tem como base os valores médios alcançados para os provetes superiores (cota de 900 mm) relativamente ao peso volúmico (22,95 kN/m³), resistência à compressão (31,6 MPa), teor em fibras (53,4 kg/m³) e UPV (4162 m/s). Pela análise da Fig. 9 constata-se que: a variação do peso volúmico é bastante reduzida, da ordem dos 0,7% (valor obtido pela relação da diferença entre o valor máximo e o valor mínimo, e o valor médio); a variação da resistência à compressão é mais significativa, 16,1%, o que corresponde a 5,8 MPa, mas sem tendência definida; a variação do teor em fibras foi de 9,4%, não sendo também visível qualquer tendência; a variação da UPV foi de 3,4%.

A Fig. 10 apresenta os valores da UPV obtidos recorrendo a dois tipos de medição, directa e indirecta (ver Fig. 11) nos elementos prismáticos moldados com base de 360×90 mm² e alturas de 500 mm e 1000 mm. Com base nos resultados apresentados na Fig. 10 constata-se que a variação da UPV com a altura é residual (aproximadamente 3%). Verificou-se, contudo, uma variação significativa entre os dois tipos de medição da UPV (os valores da figura não apresentam qualquer correcção normalizada). Nas medições indirectas, a onda propaga-se na camada superficial do betão, a qual pode ter rigidez inferior à do betão do interior do provete, pelo que, em geral, a velocidade medida é mais baixa. A diferença registada entre as medições directas e indirectas poderá também ser devida à orientação das fibras no elemento em BACRFA.

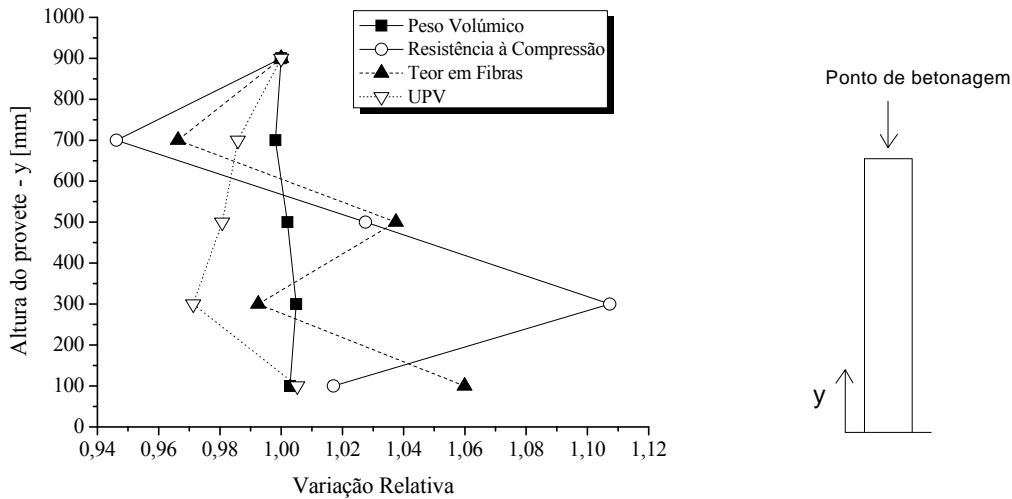


Fig. 9. Variação das propriedades mecânicas no BACRFA em altura (nos elementos cilíndricos).

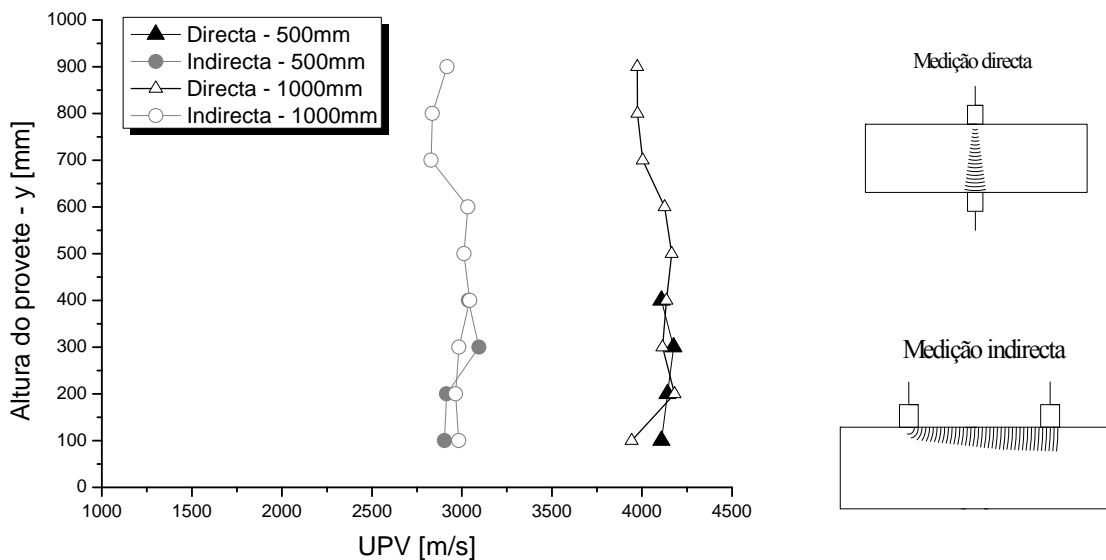


Figura 10. Variação da UPV, por tipo de medição, nos elementos prismáticos moldados na vertical.

Figura 11. Tipos de medição da UPV.

Na Fig. 12 apresenta-se a variação dos parâmetros de resistência equivalente à tracção em flexão, $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$, obtidos nos ensaios de flexão. Na mesma figura apresentam-se os valores obtidos nos ensaios normalizados. O teor em fibras obtido através da extração de uma carote dos provetes prismáticos sujeitos ao ensaio de flexão está apresentado na Fig. 13 (também inclui a dosagem em fibras de aço prevista na composição do BACRFA). Com base nos resultados apresentados na Fig. 12 constata-se uma variabilidade significativa dos parâmetros de resistência equivalente obtidos (aproximadamente 70%). Além disso, somente 20% ($f_{eq,2}$) e 33% ($f_{eq,3}$) dos valores obtidos foram superiores aos parâmetros de resistência equivalente determinados a partir dos ensaios em provetes normalizados. Relativamente ao teor em fibras (ver Fig. 13) constata-se uma variação de 99% para o elemento com 500 mm e 25% para o elemento com 1000 mm de altura. A variação dos resultados ocorrida para o elemento com 500 mm de altura pode, eventualmente, ser justificada pela estratégia menos precisa adoptada obtenção do teor em fibras dado que, neste caso, apenas foram extraídas três carotes, uma por cada um dos três níveis analisados. Teria sido oportuna a avaliação do teor de fibras em mais do que uma carote por nível de altura, bem como a medição do teor de fibras em mais níveis de altura. No entanto, constata-se que, em geral, os valores de f_{eq} demonstram uma tendência de evolução que acompanha a variação registada no teor de fibras.

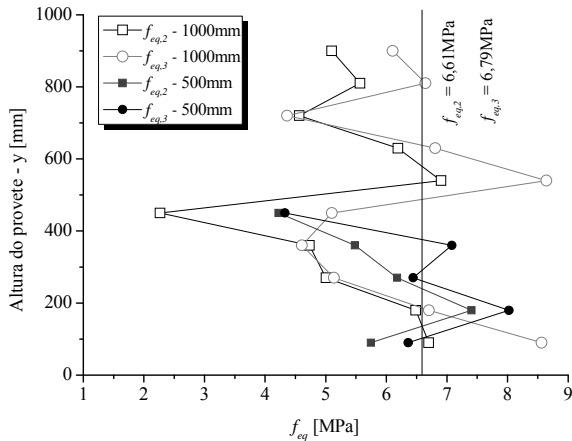


Fig. 12. Variação de $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ nos elementos prismáticos moldados na vertical.

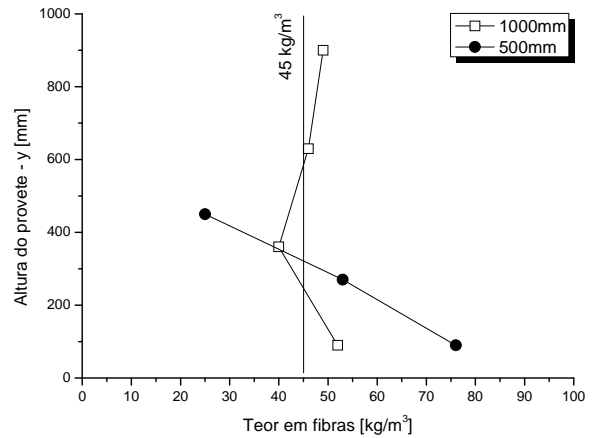


Fig. 13. Variação do teor em fibras nos elementos prismáticos moldados na vertical.

3.3 Variação das propriedades do BACRFA em elementos com desenvolvimento horizontal

A Fig. 14 indica os pontos de betonagem nos elementos em que foram avaliadas as propriedades do BACRFA ao longo de elementos com desenvolvimento horizontal, tal como descrito na Secção 2.2.

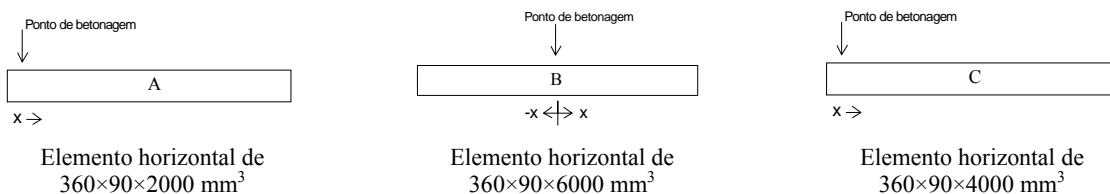


Fig. 14. Pontos de betonagem em elementos com desenvolvimento horizontal.

Um dos métodos adoptado para avaliar a fluidez do BACRFA ao longo do elemento foi o baseado na medição da altura da secção transversal do elemento ao longo do seu desenvolvimento. A Fig. 15 apresenta os resultados obtidos. Da análise desta figura constata-se que o escoamento do betão foi conseguido até 2 metros de distância ao ponto de betonagem. Para distâncias superiores a 2 metros o BACRFA não apresentou características de auto-compactabilidade suficientes para manter a altura da secção do elemento, pois a partir dessa distância ocorreu uma diminuição acentuada da espessura do elemento, acompanhada de segregação dos vários materiais que constituem o BACRFA. A não simetria dos resultados obtidos no elemento B indicia uma eventual irregularidade do nivelamento do pavimento onde o molde estava situado.

As medições da UPV (directas) efectuadas nos elementos A, B e C estão apresentadas na Fig. 16. Constata-se uma variação pouco significativa da UPV ao longo dos elementos.

Nas Figs. 17, 18 e 19 estão apresentados os parâmetros de resistência equivalente obtidos nos ensaios de flexão efectuados com vigas extraídas dos elementos A, B e C. Na mesma figura apresentam-se os parâmetros de resistência equivalente obtidos nos ensaios com os provetes normalizados (ver Secção 3.1). De uma maneira geral, constata-se que a variação de $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ acompanha o teor em fibras, como seria de esperar. É de salientar o facto de, na maioria dos resultados obtidos, os valores dos parâmetros de resistência equivalente foram significativamente inferiores aos obtidos nos provetes normalizados. Relativamente ao elemento B (ver Fig. 18), é visível a diminuição dos valores obtidos dos parâmetros de resistência equivalente para a zona do elemento cujas vigas foram cortadas na direcção paralela ao escoamento do BACRFA (mantendo-se o teor em fibras), evidenciando a importância da orientação preferencial das fibras de aço no comportamento à tracção em flexão deste material.

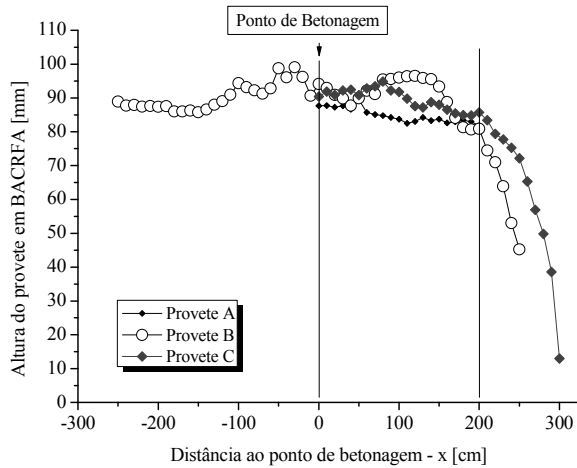


Fig. 15. Altura dos elementos A, B e C em BACRFA.

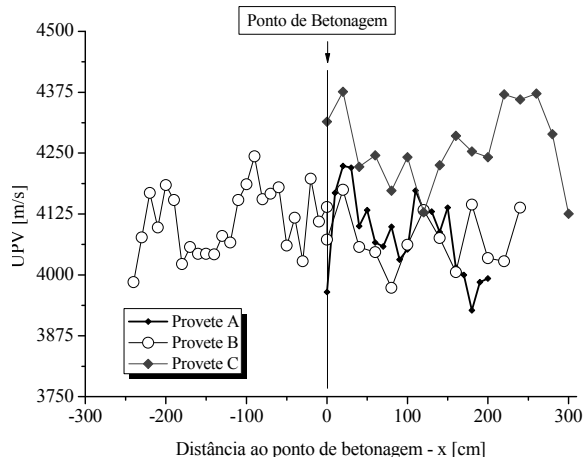


Fig. 16. UPV nos elementos A, B e C em BACRFA.

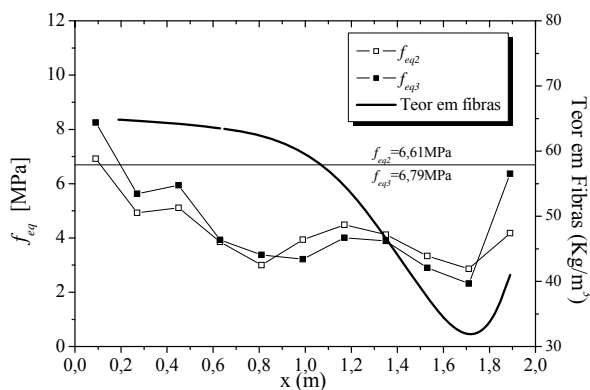


Fig. 17. Relação dos parâmetros f_{eq2} e f_{eq3} e teor em fibras ao longo do elemento A.

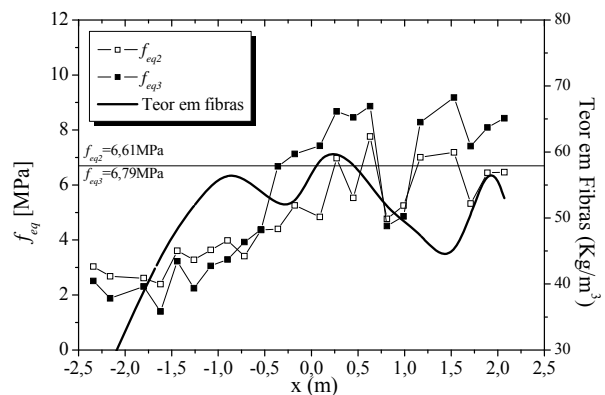


Fig. 18. Relação dos parâmetros f_{eq2} e f_{eq3} e teor em fibras ao longo do elemento B.

3.4 Distribuição de fibras no molde tipo grelha

Após a betonagem do molde tipo grelha, foram extraídas várias carotes para avaliação do peso volúmico do BACRFA e respectivo teor em fibras de aço (ver Fig. 20). Na Fig. 21 apresenta-se o peso volúmico e o teor em fibras obtido em carotes extraídas a distintas distâncias do ponto de betonagem.

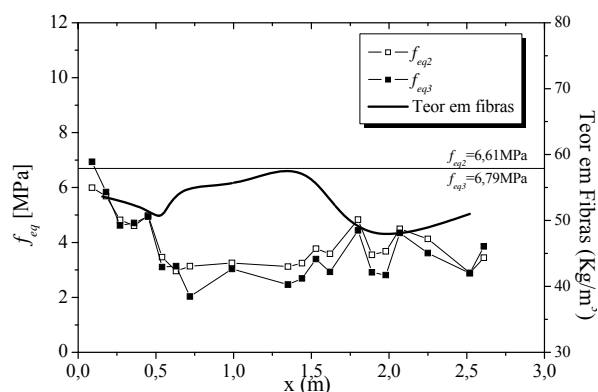


Fig. 19. Relação dos parâmetros $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ e teor em fibras ao longo do elemento C.

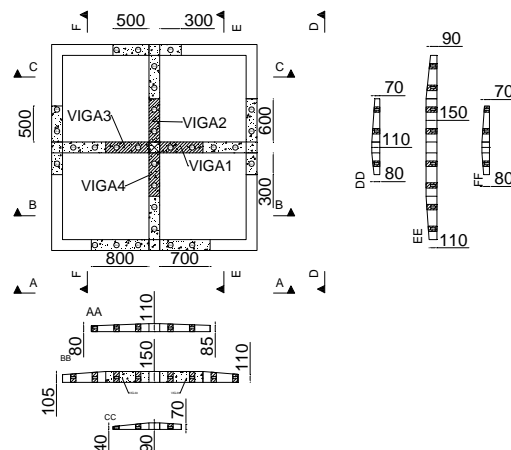


Fig. 20. Levantamento da espessura do BACRFA e localização das carotes extraídas.

Pela análise da Fig. 21 constata-se que a variação do peso volúmico é reduzida (cerca de 2%). Contudo, a variação do teor em fibras é significativa, chegando aos 25%. É perceptível a diminuição

da percentagem de fibras ao longo da distância percorrida pelo BACRFA. Na Fig. 22 apresentam-se os resultados relativos aos ensaios de flexão efectuados às vigas retiradas da zona central da grelha (ver Fig. 20). Para os provetes retirados do molde tipo grelha, obtiveram-se os valores de $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ de 7,26 e 7,03 MPa, respectivamente (valores médios). Estes valores são superiores aos obtidos nos provetes normalizados (na Fig. 22, apresenta-se, também, e a título comparativo, a curva média relativa aos provetes normalizados), o que se justifica pelo maior teor em fibras nos provetes próximo do ponto de betonagem. Os resultados da distribuição de fibras na secção de fractura destes provetes estão apresentados no Quadro 3. Analisando a Fig. 21, é novamente visível a não existência de uma clara tendência da distribuição das fibras. O valor médio de fibras por célula é de 6,9 (superior ao obtido para os provetes normalizados), com um desvio padrão de 1,20 e coeficiente de variação de 17%.

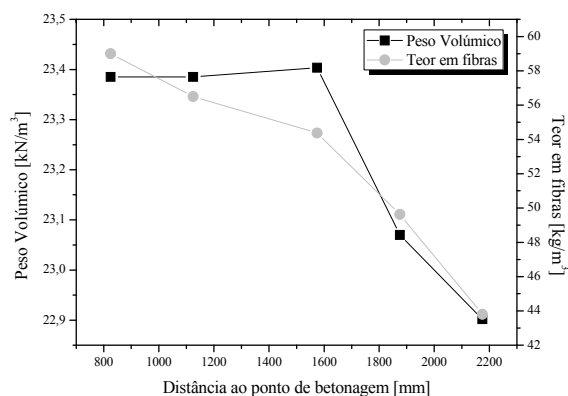


Fig. 21. Variação do peso volúmico e teor em fibras com a distância ao ponto de betonagem.

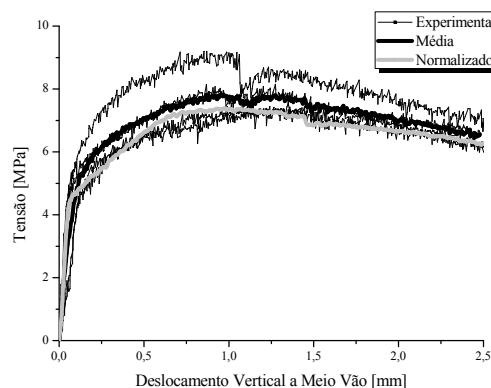


Figura 22. Relação tensão de flexão vs deslocamento nas vigas da grelha.

Quadro 3. Distribuição das fibras na secção de fractura das vigas.

	1ª coluna			2ª coluna			3ª coluna			4ª coluna			5ª coluna		
4ª linha	6,3	(2,4)	[38,0]	9,5	(3,3)	[35,1]	8,1	(2,0)	[24,1]	9,3	(3,8)	[40,8]	6,6	(3,0)	[44,9]
3ª linha	8,3	(3,8)	[46,6]	6,5	(3,1)	[47,2]	6,8	(3,0)	[43,9]	8,0	(3,9)	[49,1]	6,1	(3,3)	[54,2]
2ª linha	5,5	(2,2)	[40,1]	6,0	(2,6)	[42,7]	6,1	(2,9)	[47,3]	8,1	(2,9)	[35,7]	6,6	(3,9)	[58,2]
1ª linha	5,8	(4,1)	[70,6]	6,4	(2,0)	[31,3]	7,0	(2,0)	[28,6]	6,4	(2,7)	[42,7]	5,4	(2,7)	[49,9]

: Média ; () : Desvio Padrão; []: Coeficiente de variação (%)

4. CONCLUSÕES

A existência de fibras de aço no BACRFA permitiu aumentar a resistência residual pós pico à compressão do betão (comparativamente a um BS); contudo, as vantagens associadas à introdução das fibras de aço são mais significativas no comportamento à flexão do betão, com um aumento considerável da tensão máxima de tracção em flexão e com valores relativamente elevados dos parâmetros de resistência equivalente. Neste sentido, a aplicação de um BACRFA em elementos estruturais apresenta um elevado potencial, na medida que alia o comportamento melhorado oferecido pelas fibras de aço às vantagens subjacentes a um betão com requisitos de auto-compactabilidade.

A distribuição de fibras de aço na secção de fractura dos provetes em BACRFA revelou-se mais homogénea do que a habitualmente encontrada nos provetes em BRF (nos betões em que é necessário recorrer a equipamentos de vibração, há tendência para o aumento da percentagem de fibras na direcção da betonagem).

A utilização da medição da UPV ao nível do controlo de qualidade em obra poderá ser eficaz na verificação da homogeneidade das propriedades de resistência à compressão do BACRFA aplicado. Contudo, este tipo de técnica parece ineficaz na avaliação do comportamento pós-fendilhado do betão (que depende, fundamentalmente, da percentagem, orientação e distribuição das fibras); a UPV não é significativamente alterada com a percentagem em fibras de aço presente no betão.

A variação obtida nas propriedades mecânicas do BACRFA foi praticamente independente da posição em altura em que as propriedades foram avaliadas. Contudo, os valores de resistência equivalentes foram inferiores aos obtidos recorrendo a provetes normalizados. Relativamente aos elementos com

desenvolvimento horizontal, constatou-se que a fluidez do betão foi insuficiente para percorrer distâncias superiores a 2 metros. A partir desta distância, a espessura do elemento diminuiu significativamente, com alteração súbita das propriedades mecânicas do BACRFA (ocorrência de segregação dos constituintes do betão). A dificuldade também encontrada no preenchimento do molde tipo grelha evidencia a necessidade de melhorar as propriedades reológicas do BACRFA a que se refere a presente comunicação.

De uma maneira geral, os valores de resistência equivalente obtidos para os elementos prismáticos com 360 mm de comprimento e 90x90 mm² de secção transversal são inferiores aos determinados nos provetes normalizados. Os valores destes parâmetros são significativamente dependentes da orientação relativa dos provetes face à direcção do fluxo do BACRFA (revela a importância da direcção das fibras no comportamento pós-fendilhado do BACRFA). Neste sentido, a adopção de um comportamento isotrópico para o BACRFA (com base nos parâmetros de resistência equivalente obtidos em provetes normalizados) para simular o comportamento de elementos estruturais moldados com este tipo de betão poderá conduzir a esforços resistentes significativamente superiores à capacidade resistente real do BACRFA.

AGRADECIMENTOS

Os autores da presente comunicação pretendem agradecer às empresas: CIVITEST, pela cedência dos equipamentos de ensaio; UNIBETÃO, pela realização da betonagem; CASAIS, pela cedência dos moldes. A quarta autora agradece o apoio concedido ao abrigo do Programa de Apoio Inov-Jovem.

REFERÊNCIAS

- [1] Barros, J.; Antunes J.; Amorim, J. (2002). “Eficácia de fibras discretas de aço no reforço à flexão de elementos de betão”. Congresso Nacional de Engenharia de Estruturas. LNEC. Lisboa. Julho, pp. 283-292.
- [2] Pereira, E.; Barros, J.; Camões, A. (2004). “Painéis aligeirados em betão auto-compactável reforçado com fibras de aço”. Encontro Nacional de Betão Estrutural 2004. Porto, FEUP.
- [3] Barros, J.; Pereira, E.; Santos, S.; Lourenço, L. (2006). “Possibilidades e desafios do betão auto-compactável reforçado com fibras – do laboratório à aplicação real”, Seminário “Inovação em betões nova normalização de betões especiais, Construnor 2006, Parque de Exposições de Braga.
- [4] Pereira E. (2006). “Steel fibre reinforced self-compacting concrete: From material to mechanical behavior”, Dissertation for Pedagogical and Scientific Aptitude Proofs, DEC, Univ. of Minho, pp.188.
- [5] EFNARC – The European Guidelines for Self Compacting Concrete. May 2005.
- [6] RILEM TC 162-TDF. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete – Final Recommendation. Materials and Structures. Vol 35.pp. 579-582. Novembro 2002.
- [7] ROBINS, P.; AUSTIN, S.; JONES, P.; “Pull-out behavior of hooked steel fibres”, Materials and Structures, Vol.35, N° 251, 2002, pp. 434-442.
- [8] NP EN 12504-4. 2007. Ensaios do Betão nas Estruturas – Parte 4: Determinação da Velocidade de Propagação dos Ultra-sons. Lisboa: IPQ. 18 p.
- [9] CEB – FIP MODEL CODE 1990, Design Code. Lausanne, Switzerland, 1993
- [10] prEN 1992-1-1 - Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, 2003
- [11] Barros, J.A.O.; Pereira, E.B.; Ribeiro, A.F.; Antunes J.A.B., "Self-compacting steel fibre reinforced concrete for precast sandwich panels – experimental and numerical research", Workshop of 6th International RILEM Symposium on fibre reinforced concrete - BEFIB 2004, 24-25 September 2004. (artigo convidado)