

Cobertura pré-fabricada em betão auto-compactável reforçado com fibras de aço

Delfina Gonçalves¹

Joaquim Barros²

Lúcio Lourenço³

Carlos Sampaio⁴

RESUMO

O presente trabalho refere-se ao estudo de uma cobertura realizada com elementos pré-fabricados em Betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras de Aço (BACRFA).

A cobertura em análise, com uma área de implantação de 9.8 x 5.5 m², é constituída por peças com secção em “T”, justapostas, suportadas por vigas pré-esforçadas realizadas em BACRFA, sem qualquer tipo de armadura convencional passiva. Neste sentido, a armadura longitudinal é constituída apenas por varões pré-tensionados e o reforço ao corte é garantido pelas fibras discretas em aço que reforçam o betão auto-compactável.

Os ensaios experimentais, realizados com modelos à escala real das vigas T, foram executados com o intuito de avaliar a deformação a longo prazo e a capacidade de carga das peças da cobertura, sujeitando-as a diferentes condições de carregamento.

Em simultâneo foi desenvolvido em laboratório, um BACRFA com propriedades adequadas aos esforços que se desenvolvem neste tipo de estrutura e à geometria dos elementos que a compõem. Em comparação com a solução tradicional em betão armado, a que se propõem apresenta vantagens resultantes da diminuição do tempo de execução, da melhoria da durabilidade e da aparência.

PALAVRAS-CHAVE

BACRFA; Pré-fabricação; Pré-esforço; Flexão; Corte.

¹ CiviTest, Pesquisa de Novos Materiais para a Engenharia Civil, Braga, Portugal. delfinagoncalves@civitest.com

² ISISE, Universidade do Minho, Depart. de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal. barros@civil.uminho.pt

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

⁴ Prégia, Maia, Portugal. csampaio@pregaia.com

1. INTRODUÇÃO

O Betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras de Aço (BACRFA) tem-se mostrado uma solução com elevado potencial para a indústria da pré-fabricação [1-3]. A utilização deste tipo de betão, em detrimento de betão armado corrente, apresenta várias vantagens, nomeadamente: diminuição do tempo de betonagem; diminuição ou supressão de armadura convencional e consequente tempo de mão-de-obra associado à preparação e montagem de armadura; diminuição do tempo de execução dos elementos estruturais; diminuição do ruído durante o processo de execução dos elementos estruturais em virtude da eliminação da tarefa de vibração do betão; maior durabilidade e tempo de vida da estrutura; melhor aparência (aspecto do “produto acabado”).

A presente comunicação resume os estudos efectuados no âmbito do projecto de uma cobertura constituída em BACRFA.

2. CONCEPÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO BACRFA

2.1 Concepção

A composição adoptada para o BACRFA é constituída por: Cimento do tipo I 42.5R, meia areia, areia fina, brita calcária 5-12 mm, superplastificante (SP) de terceira geração (SIKA ViscoCrete 3002 HE), filler calcário (FC). Ao BACRFA foram adicionadas fibras de aço com a designação DRAMIX RC-80/30-BN, com comprimento l_{fa} de 30 mm, diâmetro (d_{fa}) de 0.38 mm, com uma relação comprimento/diâmetro (l_{fa}/d_{fa}) de 79 e tensão de cedência de 2300 MPa. A composição adoptada encontra-se no Quadro 1.

Quadro 1 - Composição adoptada para o BACRFA (por m³ de betão)

Cimento [kg]	Água [dm ³]	SP [dm ³]	FC [kg]	Areia Fina [kg]	Meia Areia [kg]	Brita 5-12 mm [kg]	Fibras [kg]
401,7	117,3	7,7	344,3	356,6	550,2	494,1	45

A metodologia adoptada para a concepção do BACRFA consiste em três passos:

- afinação do esqueleto, que consiste na mistura de diferentes percentagens de brita e meia areia, até à obtenção da mistura com o menor índice de vazios. Após a determinação das percentagens relativas de brita e meia areia, estas mantêm-se constantes, sendo adicionada areia fina, até ao preenchimento da totalidade dos vazios;
- afinação da composição da pasta ligante;
- obtenção da percentagem de pasta por m³ de BACRFA que garanta as características de auto-compatibilidade requeridas, isto é, espalhamento elevado, capacidade de fluir entre obstáculos e resistência a fenómenos de segregação e exsudação.

2.2 Verificação dos critérios de auto-compactabilidade

De modo a aferir a auto-compactabilidade do BACRFA foram realizados o ensaio de espalhamento e o ensaio “caixa L” tendo-se obtido um espalhamento de 70 cm e uma razão h_2/h_1 de 0.8 [4].

2.3 Caracterização do comportamento do BACRFA

2.3.1. Compressão

Os ensaios de compressão directa foram realizados num equipamento servo-controlado com capacidade máxima de carga de 3000 kN. Os ensaios foram efectuados por controlo de deslocamento pelo transdutor interno do actuador, à velocidade de 5 µm/s. Em torno do provete foram colocados três transdutores, efectuando entre si um ângulo de 120°, para registo dos deslocamentos entre os pratos de carga do equipamento. Esta disposição evita que a deformação do equipamento de ensaio seja adicionada aos valores lidos pelos LVDT's. Com base nos valores registados pelos transdutores em

cada leitura, determinou-se o correspondente deslocamento no eixo do provete, a partir do qual se obteve a extensão de compressão, em resultado da divisão deste deslocamento pela altura inicial do provete. A relação tensão-extensão de compressão, $\sigma_c - \epsilon_c$, para cada idade do betão, está representada na Fig. 1.

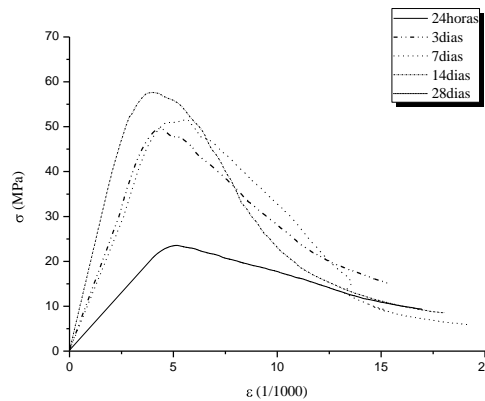


Figura 1 - Relação tensão-extensão de compressão

2.3.2. Flexão

Nos ensaios de flexão foram seguidas as recomendações do RILEM TC 162-TDF [5], nomeadamente no que se refere aos procedimentos de cura do betão, ao posicionamento e dimensões do entalhe no provete, ao carregamento, às 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 foi adaptado, uma vez que não foi usada qualquer compactação externa.

Relativamente aos provetes, o RILEM TC 162-TDF [5] preconiza o uso de prismas com um comprimento de 600 mm e uma secção de $150 \times 150 \text{ mm}^2$. A meio vão do provete, efectua-se um entalhe com 3 a 5 mm de largura e 25 ± 1 mm de profundidade para que a fendilhação progrida pela secção entalhada.

O ensaio foi controlado pelo transdutor vertical, tendo-se medido, para além do deslocamento vertical, a abertura da fenda, na parte superior do entalhe.

A Fig. 2 representa a envolvente superior e inferior, bem como a curva média da relação força-flecha de 13 provetes ensaiados aos 28 dias.

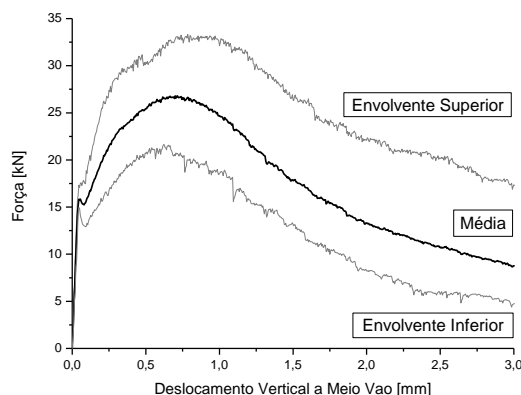


Figura 2 - Relação força-deslocamento vertical a meio vão

Os parâmetros $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ estão relacionados com a capacidade de absorção de energia do material até à flecha δ_2 e δ_3 , respectivamente, sendo utilizados na simulação do comportamento do material à tracção nas verificações aos estados limites de utilização ($f_{eq,2}$) e últimos ($f_{eq,3}$).

No Quadro 2 estão representados os valores médios de $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$.

Quadro 2 - Valores médios do $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$

	$f_{eq,2}$	$f_{eq,3}$
Média	9,88	9,79
Desvio Padrão	1,46	0,89
Coefficiente de Variação	14,80	9,13

3. SISTEMA ESTRUTURAL

A cobertura analisada apresenta uma área de implantação de $9.8 \times 5.5 \text{ m}^2$, sendo constituída, como referido, por vigas em “T” (ver Figs 3 a 7) apoiadas em vigas pré-esforçadas.

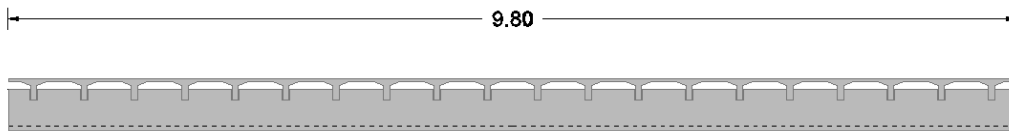


Figura 3 - Vista frontal da cobertura

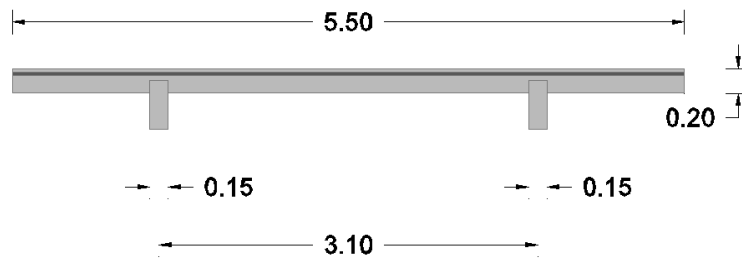


Figura 4 - Vista lateral da cobertura.

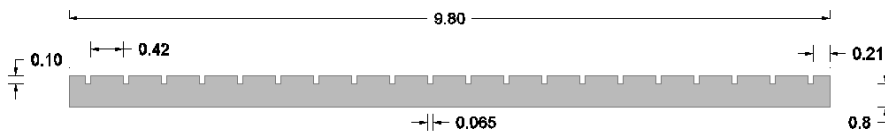


Figura 5 - Geometria da viga pré-esforçada

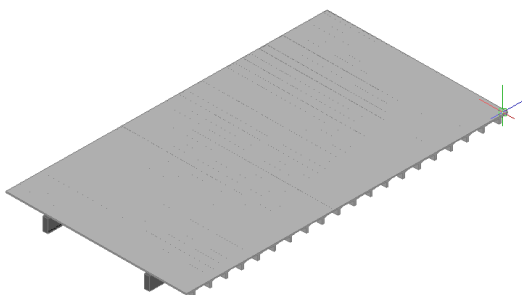


Figura 6 - Perspectiva da cobertura

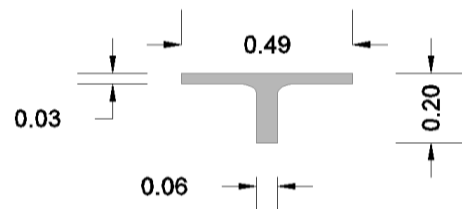


Figura 7 - Secção da peça pre-fabricada com secção em "T"

4. ENSAIOS EXPERIMENTAIS COM VIGA PROTÓTIPO

A peça pré-fabricada com secção “T” que constitui a cobertura foi previamente estudada. Após a optimização desta secção e definição da composição do BACRFA a utilizar, foi construída, em ambiente fabril, uma viga à escala real com o intuito de avaliar o comportamento estrutural da peça. Após a sua descofragem, realizada às 24h, a viga foi apoiada em dois pontos espaçados entre si em 2.8 m (para simular as condições de apoio do seu armazenamento). Após as 24h a peça ficou submetida à acção do seu peso próprio. Seis dias após a sua descofragem a viga apresentou uma flecha de

0.6 mm, tendo esta flecha mantido-se praticamente inalterada até aos 24 dias, Fig. 8. Nesta figura também se inclui a variação da temperatura registada durante o período de monitorização da flecha da viga.

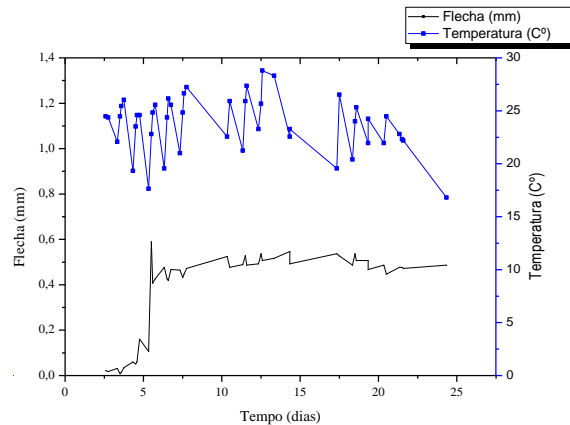


Figura 8 - Relação flecha-tempo-temperatura da viga submetido ao peso próprio

Após os 24 dias, as condições de apoio e de carregamento da viga mudaram, tendo a viga ficado apoiada em dois pontos afastados entre si em 4.8m. Em termos de carregamento, para além do seu peso próprio a viga foi sujeita a uma sobrecarga de 20 kg/m até aos 44 dias de idade, que corresponde a uma pressão de 0.4kN/m². Entre os 44 dias e os 49 dias, efectuou-se um carregamento adicional de 5 kg/m (sobrecarga total de 25 kg/m, correspondente a 0.5kN/m²).

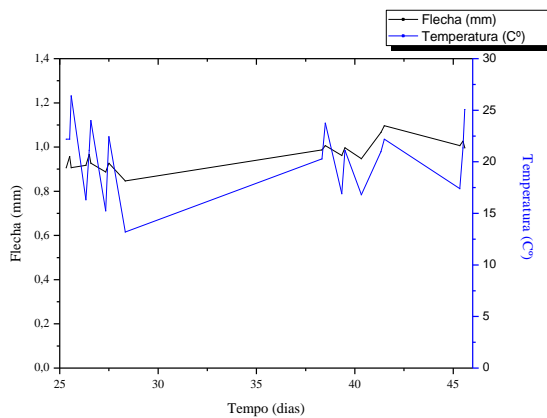


Figura 9 - Relação flecha-tempo-temperatura da viga submetido ao peso próprio mais 20 kg/m

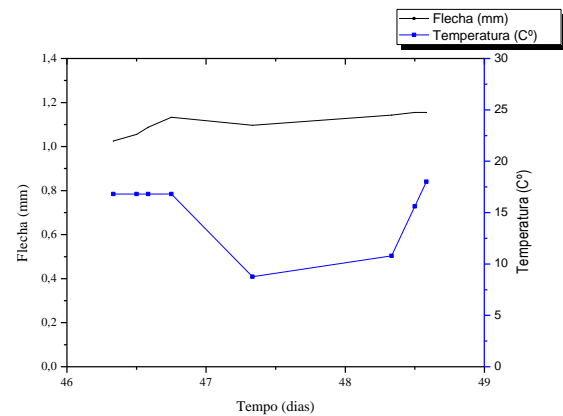


Figura 10 - Relação flecha-tempo-temperatura da viga submetido ao peso próprio mais 25 kg/m

Da análise das Figs 8, 9 e 10 constata-se que a flecha máxima atingida foi de 1.2mm. Após o carregamento descrito anteriormente, a viga foi carregada até à rotura. O ensaio de carga consistiu em solicitar a viga (na situação com 4.8 m de vão) com ciclos de carga/descarga com uma taxa de incremento da força de pico de 0.25 kN/m² por ciclo. Na Fig. 11 é possível observar o dispositivo de ensaio, nomeadamente a aplicação de carga e a localização dos instrumentos de medição.

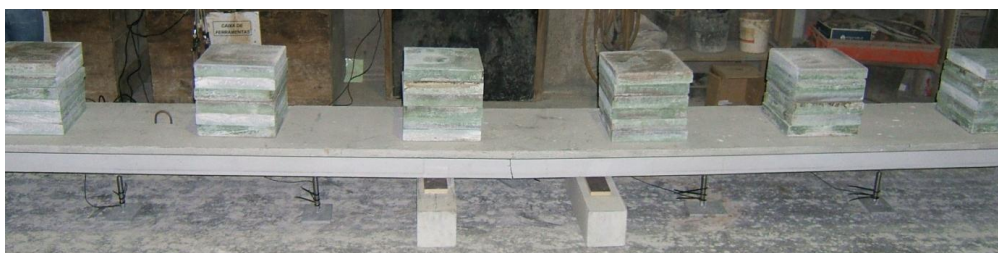


Figura 11 – Ensaio de carga

Os deslocamentos verticais medidos em cinco pontos, para os diferentes níveis de carga, estão representados na Fig. 12. A rotura da viga ocorreu pela formação de fenda de flexão a meio vão quando esta estava carregada com 1.5 kN/m².

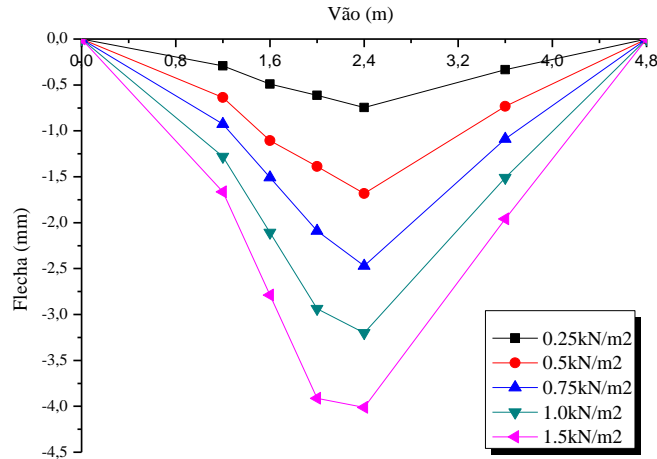


Figura 12 – Flecha para os vários níveis de carga

5. DIMENSIONAMENTO DA VIGA T

5.1. Solicitações consideradas

O dimensionamento estrutural da cobertura foi efectuado com base na normalização e regulamentação vigente [6]. No Quadro 3 são apresentadas as acções consideradas para o dimensionamento das peças que constituem a cobertura.

Quadro 3 - Acções consideradas no dimensionamento

Acções Verticais	PPcobertura (G)	PPrevestimentos(G)	Vento (W)	Sobrecarga (Q)
	-1.31 kN/m ²	0.50 kN/m ²	+1.35 kN/m ² -1.35 kN/m ²	-0.30 kN/m ²

5.2. Cálculo do momento resistente da peça

O software DOCROS foi utilizado para a previsão da relação momento-curvatura da secção da viga em BACRFA.

Na Fig. 13 apresenta-se a discretização em camadas da secção em estudo. Devido à geometria não linear da transição alma-banzo, procedeu-se a um seccionamento mais refinado nesta zona.

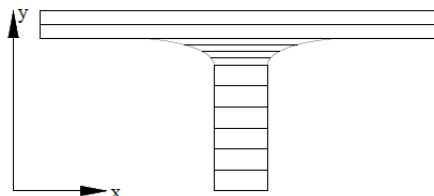


Figura 13 - Discretização da secção em estudo

Na simulação numérica dos elementos estruturais apresentados utilizou-se, para a caracterização do comportamento à compressão, o modelo constitutivo apresentado no CEB-FIP -1993 [7].

Quanto ao comportamento à tracção, o modelo implementado no DOCROS permite a consideração do comportamento do BACRFA utilizando duas leis distintas: uma primeira, capaz de simular o

comportamento até à resistência à tracção ter sido alcançada (início da fendilhação); uma outra, posterior, que permite reproduzir o comportamento pós-pico (ver Figs. 14 e 15). Neste caso, considerou-se o comportamento linear até à rotura.

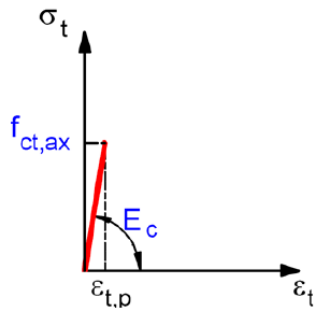


Figura 14 - Lei linear para simulação do comportamento do betão à tracção até ao pico

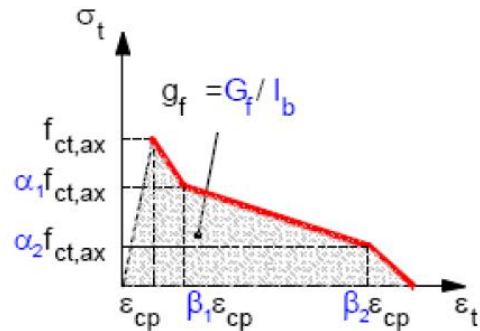


Figura 15 - Lei trilinear de amolecimento do betão formado σ - ϵ

No Quadro 4 apresentam-se as propriedades do BACRFA consideradas.

Quadro 4 - Propriedades do BACRFA

t	E (GPa)	f_{ctk} (MPa)	$f_{ct,ax}$ (MPa)	G_f (Nmm/mm ²)	α_1	β_1	α_2	β_2	l_b (mm)
28dias	30.0	48.0	3.0	4.0	0.7	1.5	0.3	30	40

Na Fig. 16 apresenta-se a relação momento-curvatura da secção em estudo, obtida com recurso ao software indicado.

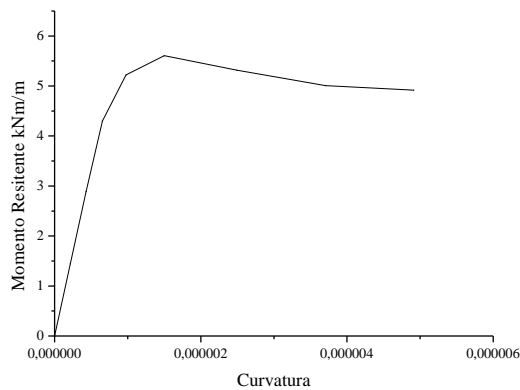


Figura 16 - Relação momento-curvatura da secção em estudo

Com base nos resultados obtidos, prevê-se que o momento máximo resistente característico da secção “T” em estudo é de 5.6 kN.m/m. Adoptando um coeficiente de 1.5 para reduzir valores característicos a valores de cálculo, o momento resistente máximo é 3.74 kN.m/m

5.3. Cálculo do momento actuante

O momento actuante da peça pré-fabricada com secção em “T” foi obtido tendo em conta as acções consideradas anteriormente e efectuando a alternância das acções nos tramos pares e impares (7 combinações). O momento máximo positivo obtido foi de 3.2 kN.m/m e o momento máximo negativo foi de 3.6 kN.m/m (estado limite último - valores inferiores ao momento resistente referido).

6. DIMENSIONAMENTO DA VIGA PRÉ-ESFORÇADA

A viga de suporte das vigas de secção em “T” tem a geometria indicada na Fig. 5. Dado pretender-se utilizar as fibras para eliminar a necessidade de aplicar estribos, e tendo em conta o relativo elevado momento flector positivo, o reforço desta viga é composto por uma composição de betão reforçado com 45kg/m^3 das fibras já anteriormente referidas e por um cabo de pré-esforço localizado a 0.25 m da face inferior da secção da viga. É de salientar que o esforço axial de compressão introduzido pelo cabo de pré-esforço aumenta significativamente a resistência ao corte da secção deste elemento estrutural.

Para a verificação do ELS de descompressão foi considerada uma combinação de acções com valor resultante de 9.35 kN/m. O valor de esforço transversal máximo foi de 45.8kN e o momento máximo positivo foi de 112.2kN.m.

Para a verificação relativa ao Estado Limite Último (ELU) foi considerada uma combinação de acções com valor resultante de 23.24 kN/m. O valor de esforço transversal máximo foi de 113.9kN e o momento máximo positivo foi de 279.0kN.m.

No Quadro 5 são apresentadas as tensões na viga reforçada com cabo de pré-esforço rectilíneo com excentricidade de 0.15 m, com um valor de pré-esforço de 900 kN. As tensões apresentadas no Quadro 5 são admissíveis face à tensão máxima prevista.

Quadro 5 - Tensões na viga pré-esforçada para ELS e para ELU.

		Secção a meio vão [MPa]	Secção sobre o apoio [MPa]
ELS	σ_{inf}	-8,9	-15,9
	σ_{sup}	-6,1	0,9
ELU	σ_{inf}	2,3	-15,9
	σ_{sup}	-17,3	0,9

Foi ainda verificado o Estado Limite de Deformação, tendo-se obtido uma flecha elástica de 1.99mm, valor este bastante inferior ao valor limite indicado no REBAP [8], ($L/400=24,5\text{mm}$).

6.1. Cálculo do momento resistente da viga pré-esforçada

O momento resistente da viga pré-esforçada foi obtido com recurso ao software DOCROS considerando as propriedades do BACRFA apresentadas no Quadro4. Na Fig. 17 apresenta-se a relação momento curvatura da secção em estudo.

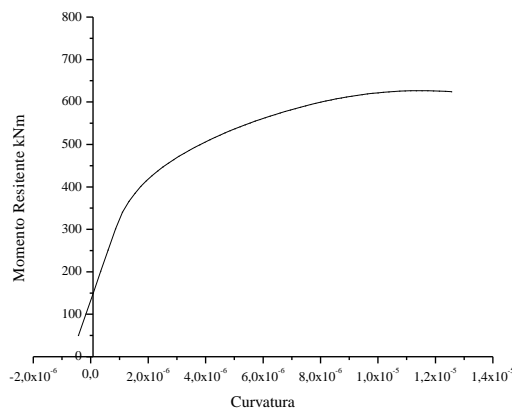


Figura 17 – Relação momento-curvatura da secção em estudo

Com base nos resultados obtidos, verifica-se que o momento máximo característico da viga pré-esforçada é de 617.30kN.m.

6.2. Verificação ao corte

De acordo com a formulação proposta pelo comité da RILEM TC 162-TDF [5], o esforço de corte resistente de um elemento reforçado com estribos, fibras de aço e armadura longitudinal ordinária é dado por:

$$V_{Rd3} = V_{cd} + V_{fd} + V_{wd} \quad (1)$$

em que V_{cd} representa a contribuição do betão para o esforço de corte:

$$V_{cd} = \left[0.12k \cdot 100\rho_l \times f_{ck}^{\frac{1}{3}} + 0.15\sigma_{cp} \right] b_w d \quad (2)$$

com $\rho_l = A_{sl} / b_w d$, onde A_{sl} representa a área transversal da armadura longitudinal e σ_{cp} representa a tensão devido a aplicação de uma força axial externa, ou a acção de pré-esforço.

A contribuição das fibras de aço, V_{fd} , é obtida por:

$$V_{fd} = 0.7k_f k_1 \tau_{fd} b_w d \quad (3)$$

onde k_f é um factor que tem em conta a contribuição dos banzos, em secções em “T” e $\tau_{fd} = 0.12f_{eqk,3}$ ou $\tau_{fd} = 0.12f_{rk,4}$, em que $f_{eqk,3}$ e $f_{rk,4}$ representam os valores característicos da resistência residual de tracção em flexão, parâmetros estes determinados segundo as recomendações do RILEM TC 162-TDF [5].

O parâmetro V_{wd} representa a contribuição de estribos e armadura inclinada, que no presente caso não foi contabilizado, devido à inexistência de armadura transversal.

Assim, a contribuição do betão para o esforço de corte é 206.58kN e a contribuição das fibras é 101.56kN, perfazendo um esforço de corte resistente de 308.14kN.

6.2. Perdas após a aplicação do pré-esforço

A contabilização das perdas existentes após aplicação de pré-esforço foi efectuada segunda a metodologia apresentada no REBAP [8].

Quadro 6 - Perdas por atrito e por reentrada dos cabos

x(m)	β	$\Delta\sigma_{po,fr}$ (kN)	$P_{após\ atrito}$ (kN)	%Perdas por atrito	$\Delta p_{reentrada\ dos\ cabos}$ (kN)	$P_{após\ reentrada\ dos\ cabos}$ (kN)	%Perdas por reentrada dos cabos	%Perdas diferidas
0	0	0	1222	0%	30.088	1192	0%	
4.9	0	14.970	1207	1.23%	21.805	1185	0.59%	23.6%
9.8	0	29.939	1192	1.24%	13.523	1178	1.17%	

Com base nos resultados apresentados no Quadro 6, a percentagem máxima de perda de tensão por atrito é de 1.24% e de 1.17% por reentrada dos cabos. As perdas diferidas por retracção e por fluência do betão, bem como por relaxação das armaduras prefazem um valor total de 23.6%

Neste sentido, para a obtenção de um pré-esforço “final” de 900kN é necessário aplicar um pré-esforço inicial de 1222kN.

7. CONCLUSÕES

Este trabalho descreve, resumidamente, o desenvolvimento e caracterização experimental de um BACRFA para aplicação nos elementos estruturais de uma cobertura, bem como os passos fundamentais do dimensionamento desses elementos. A construção de uma viga à escala real em condições similares às que podem ser adoptadas em fabrico na unidade fabril, comprovou ter-se desenvolvido um BACRFA adequado a uma geometria de peças estruturais relativamente exigente do ponto de vista de serem assegurados os parâmetros de auto-compactabilidade do betão.

A viga construída foi ensaiada tendo-se constatado que, quer do ponto de vista do seu comportamento deformacional como de resistência, cumpre com as exigências de projecto em vigor.

8. REFERÊNCIAS

- [1] Gonçalves, D.; Dias, J.; Lourenço, L.; Barros, J.; Sampaio, C. (2008) “Painéis pré-fabricados em betão autocompactável reforçado com fibras de aço para fachadas de edifícios”, 2º Congresso Nacional da prefabricação em betão, Centro de Congressos – LNEC, 6 e 7 de Março, 14 p.
- [2] Dias, J.; Lourenço, L.; Barros, J.; Oliveira, F. (2008). “Aplicação de novos materiais e de modelos de análise não linear material no desenvolvimento de sistemas estruturais pré-fabricados para edifícios industriais”, 2º Congresso Nacional da prefabricação em betão, Centro de Congressos – LNEC, 6 e 7 de Março, 15 p.
- [3] Barros, J.A.O., Pereira, E.N.B., Santos, S.P.F., Lourenço, L.A.P., Possibilidades e desafios do betão auto-compactável reforçado com fibras – do laboratório à aplicação real, Seminário “Inovação em betões nova normalização de betões especiais, no âmbito da Construnor 2006, Parque de Exposições de Braga, 21 Setembro de 2006.
- [4] EFNARC – The European Guidelines for Self-Compacting Concrete, May 2005.
- [5] 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.
- [6] Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes; Decreto-Lei N.º.235/83 de 31 de Maio.
- [7] CEB FIP model code 1990, Comité Euro-International du Béton, 1993.
- [8] REBAP-Regulamento de estruturas de betão armado e pré-esforçado.