

ANÁLISE ESTRUTURAL DE ADUELA PREFABRICADA EM BETÃO REFORÇADO COM FIBRAS PARA O REVESTIMENTO DE TÚNEIS

LÚCIO LOURENÇO

Aluno de Doutoramento
UMinho – Guimarães
lucio@civil.uminho.pt

JOAQUIM BARROS

Professor Assoc. c/Agreg.
UMinho – Guimarães
barros@civil.uminho.pt

SIMÃO SANTOS

Aluno de Mestrado
UMinho – Guimarães
simaopfsantos@civil.uminho.pt

ANTÓNIO MESQUITA

Aluno Finalista
UMinho – Guimarães
antoniogilmesquita@gmail.com

SUMÁRIO

A presente comunicação descreve a investigação desenvolvida no âmbito da análise estrutural de aduelas prefabricadas em betão reforçado com fibras (BRFA), com comportamento melhorado ao fogo, para os casos de carga a que estão sujeitas durante a sua vida útil. Os ensaios necessários à caracterização das propriedades do BRFA desenvolvido são descritos e os resultados obtidos são apresentados.

Palavras-chave: Aduelas, túneis, BRF, MEF.

1. INTRODUÇÃO

As aduelas prefabricadas, constituídas por betão de elevada resistência, são normalmente aplicadas ao nível do revestimento de túneis pelo facto de, entre outras vantagens, proporcionarem elevada rentabilidade de aplicação e constituírem elementos de reduzida espessura. Estas são, geralmente, reforçadas com uma percentagem elevada de armadura convencional (Figura 1a), com significativos custos associados. Se toda esta armadura de reforço, ou mesmo parte significativa, puder ser substituída por fibras discretas de aço (Figura 1b), cujo acréscimo de encargos se resume, praticamente, ao custo das fibras, poderemos obter, eventualmente, soluções mais económicas, uma simplificação do processo de prefabricação de aduelas e níveis de desempenho estrutural mais apropriados para as exigências a que estes elementos são submetidos durante a sua vida útil, entre outros.

Em aplicações prévias, no âmbito da utilização de fibras de aço no reforço de aduelas prefabricadas, remetiam-se para as fibras de aço apenas duas funcionalidades: melhoria do comportamento do betão perante eventuais impactos durante a manipulação e a colocação das

aduelas prefabricadas, reduzindo-se o número de segmentos danificados; redução das consequências provocadas pela degradação por corrosão da armadura convencional. No entanto, a investigação que tem sido desenvolvida ao nível do BRFA para aduelas prefabricadas [1,2,3] tem demonstrado que a adição de fibras de aço aumenta significativamente a resistência ao corte e à flexão destas peças prefabricadas, desde que as fibras tenham as propriedades materiais e geométricas adequadas. As experiências ocorridas noutros países demonstram, aliás, ser possível utilizar fibras de aço como único elemento de reforço nas aduelas prefabricadas [1].



Figura 1: Substituição da armadura convencional por fibras de aço

Salienta-se contudo que, se a composição do betão não for concebida tendo em conta a presença das fibras, a trabalhabilidade e a compacidade do BRFA serão inferiores às do correspondente betão simples. Assim, é necessário que a definição da composição a adoptar atenda à quantidade e ao tipo de fibras a utilizar. Outro aspecto que deverá ser tido em conta é a grande influência que o processo produtivo tem na distribuição e orientação das fibras, pelo que este deverá ser estabelecido de forma a garantir uma distribuição o mais homogénea possível no betão [4].

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

As propriedades resistentes do betão dependem, entre outras, da sua idade. Assim, a análise dos casos de carga a que uma aduela prefabricada está sujeita durante a sua vida útil deverá ser efectuada recorrendo às propriedades do betão na idade em que determinada acção actuará.

Para simular numericamente o comportamento linear e elástico de uma dada estrutura de betão é necessário conhecer o módulo de elasticidade, E_c , e o coeficiente de Poisson, ν , do betão. No entanto, caso se pretenda simular o comportamento não linear, mais parâmetros do material terão que ser conhecidos, dependendo do modelo constitutivo adoptado, sendo comum, no entanto, a necessidade de se determinar o módulo de elasticidade inicial, E_c , a resistência à compressão, f_{cm} , a resistência à tracção, f_{ctm} , e os parâmetros de fractura do betão, caso se admita que a não linearidade seja devida, fundamentalmente, à iniciação e

propagação de fendas no betão. Das propriedades mecânicas referidas, foram determinadas experimentalmente: E_c e f_{cm} . Com base nas relações força-flecha vertical obtidas em ensaios de flexão efectuados segundo as recomendações da RILEM TC 162-TDF e recorrendo a análise inversa por intermédio da simulação numérica destes ensaios [5], obtiveram-se os parâmetros que permitem definir o comportamento pós-fendilhado do betão desenvolvido. Os ensaios experimentais foram efectuados às 24 horas (idade mínima para o armazenamento) e aos 14 dias (idade mínima para a instalação das aduelas na sua disposição final), após a moldagem dos provetes.

2.1 Composições

No desenvolvimento do BRFA foi utilizado cimento (CEM) do tipo 42,5R, superplastificante (SP) de terceira geração (SIKA ViscoCrete® 3002 HE), filler calcário (FC) e quatro tipos de agregados, nomeadamente: areia fina (AF), bago de arroz (BA) e britas calcárias (B1: 5-12 mm - B2: 14-20 mm). O reforço fibroso adoptado é constituído por dois tipos de fibras: fibra de aço (FA) DRAMIX® RC-80/60-BN com 0.75 mm diâmetro (d_{fa}), 60 mm de comprimento (l_{fa}), relação comprimento/diâmetro (l_{fa}/d_{fa}) de 80 e tensão de cedência de 1100 MPa; fibra de polipropileno (FP) DURO-FIBRIL® com 31 μ m de diâmetro (d_{fp}) e 6 mm de comprimento. As composições adoptadas estão resumidas no Quadro 1. A inclusão das fibras de polipropileno tem como objectivo evitar o destacamento explosivo da superfície do betão (*spalling*) perante a exposição deste a temperaturas elevadas [6].

O método adoptado para obtenção da composição do betão 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 obtidas; iii) obtenção da percentagem de pasta por m^3 de BRFA que resulta numa mistura com as características de trabalhabilidade requeridas e resistência aos fenómenos de segregação e exsudação. A influência das FA na composição é tida em conta na fase ii do método, dado que as FA influenciam o arranjo do esqueleto sólido da composição. Assim, para cada tipo e quantidade de fibras é fundamental proceder à definição do esqueleto sólido correspondente. Mais detalhes sobre o método de composição para o BRFA pode ser encontrado em [7]. No Quadro 1, BRFA60 e BRFA75 representam o betão reforçado com 60 e 75 kg por m^3 de betão.

Quadro 1 – Composições adoptadas (por m^3 de betão)

Designação	CEM [kg]	FC [kg]	Água [dm ³]	SP [dm ³]	AF [kg]	BA [kg]	B1 [kg]	B2 [kg]	FP [kg]	FA [kg]
BRFA60	300.2	228.0	120.5	7.0	533.6	457.6	295.0	294.3	2.0	60.0
BRFA75	300.2	228.0	120.5	7.0	550.5	451.8	290.0	289.4	2.0	75.0

2.2 Propriedades geométricas dos provetes

As propriedades mecânicas referidas foram obtidas experimentalmente recorrendo a provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura e a vigas de 150 x 150 x 600 mm³.

2.3 Resultados experimentais

Os valores experimentais obtidos para E_c e f_{cm} relativos às composições desenvolvidas estão apresentados no Quadro 2 (valor médio dos resultados obtidos em três ensaios). As relações força-flecha vertical obtidas nos ensaios de flexão efectuados estão apresentadas na secção relativa à análise inversa. Como referido anteriormente, a análise inversa permitiu determinar a resistência à tracção do betão, f_{ctm} , e os parâmetros de fractura que definem o comportamento pós-fendilhado deste, os quais são necessários para a realização de análises numéricas em regime não linear material.

Composição	Quadro 2 – Resultados experimentais			
	E_c [GPa]		f_{cm} [MPa]	
	(24 horas)	(14 dias)	(24 horas)	(14 dias)
BRFA60	26.30	38.18	24.32	47.54
BRFA75	25.42	37.52	23.07	44.43

3. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

O presente capítulo refere-se à análise numérica efectuada com aduelas prefabricadas sujeitas aos casos de carga a que estarão sujeitas ao longo da sua vida útil, recorrendo-se, para tal, ao programa de cálculo automático FEMIX V4.0 [8].

Na tecnologia de túneis revestidos com aduelas prefabricadas, um anel é constituído, normalmente, por 7 aduelas, sendo uma delas de fecho. Atendendo à semelhança entre todos os elementos (somente pequenas variações geométricas, com excepção da aduela de fecho), a realização das simulações numéricas com uma única aduela é considerada suficiente. Neste sentido, as análises numéricas foram efectuadas com a aduela A2, cujas características estão apresentadas na Figura 2. O referencial adoptado nas análises numéricas está representado na Figura 3.

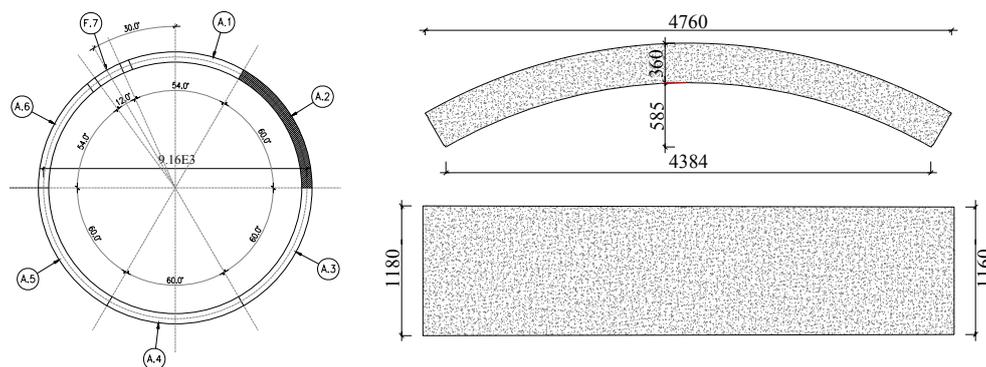


Figura 2: Aduela A2

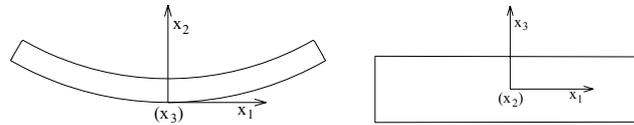


Figura 3: Sistema de coordenadas global

3.2 Casos de carga

O dimensionamento das aduelas passa pela análise de duas etapas do “ciclo de vida” destes elementos prefabricados: uma inicial, designada “fase de construção”, englobando armazenamento, transporte, manipulação pelo erector da tuneladora e a instalação pelo escudo; uma outra, correspondente ao comportamento a longo prazo.

3.2.1 Fase de construção

O ritmo de fabrico das aduelas prefabricadas para o revestimento de túneis exige condições especiais de armazenamento, nomeadamente a do seu empilhamento (ver Figura 4a). Este, por se processar poucas horas após a desmoldagem, poderá conduzir a danos nos elementos prefabricados, atendendo à menor capacidade resistente do betão.

A previsão dos esforços ocorridos durante o transporte de aduelas é efectuada, usualmente, de uma forma empírica (esforços obtidos na situação de armazenamento agravados por um coeficiente dinâmico). Esta situação não será abordada na presente comunicação.

A manipulação das aduelas, previamente à sua instalação, é realizada pelo erector da tuneladora. A verificação de resistência é feita considerando-se uma aduela apoiada numa região central, como observado na Figura 4b.

A instalação das aduelas, na sua disposição final, efectua-se por intermédio de macacos hidráulicos (ver Figura 4c). Em geral, esta fase corresponde ao carregamento mais desfavorável ao longo da vida útil das aduelas prefabricadas, dada a possibilidade de existência de pequenos desalinhamentos de montagem entre os elementos prefabricados, que estarão na base do desenvolvimento de uma elevada concentração de tensões na aduela que se instala. A determinação dos esforços que se desenvolvem nas aduelas durante a fase de instalação é efectuada considerando a acção dos cilindros hidráulicos (6 cilindros hidráulicos por aduela, de 2250 kN cada).

3.2.2 Comportamento a longo prazo

Após a instalação das aduelas, estas ficam sujeitas às solicitações em serviço, nomeadamente, à acção do solo ou do maciço rochoso e/ou níveis freáticos sobre os anéis. A verificação de resistência da solução de reforço proposta será efectuada recorrendo aos esforços de projecto fornecidos por uma empresa associada ao projecto de investigação FICOFIRE.

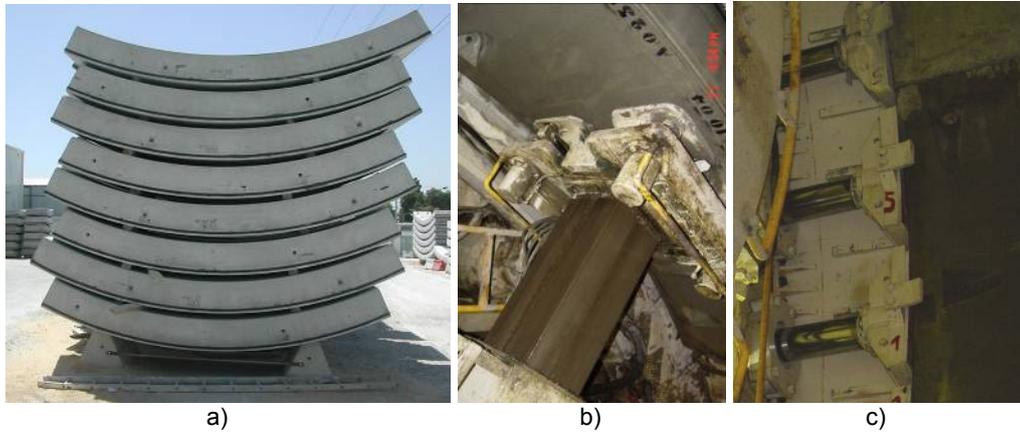


Figura 4: Fase de construção

3.3 Malhas adoptadas

O primeiro passo para a realização das análises numéricas foi a obtenção de uma malha com grau de refinamento que garantisse estabilidade de resultados, com tempo de cálculo não demasiado elevado.

A aduela foi discretizada em 9600 elementos tridimensionais de 20 nós (também designados por elementos de sólido), totalizando 45213 nós (ver Figura 5a). Para as análises numéricas em regime não linear material admitiu-se que a aduela é um elemento estrutural submetido a um estado plano de tensão (só admissível em alguns casos de carga que são, no entanto, os que condicionam o dimensionamento da aduela). A malha adoptada para este caso é constituída por 1400 elementos bidimensionais de 8 nós, como apresentado na Figura 5b. Os referenciais globais estão definidos na Figura 3.

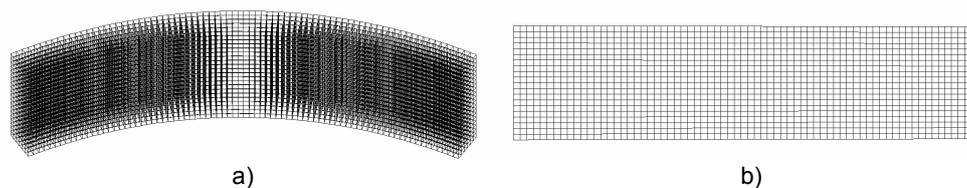


Figura 5: Malhas adoptadas

3.4 Análise linear

Os casos de carga a que as aduelas prefabricadas estão sujeitas durante a fase de construção, referidos em 3.2.1, foram analisados em regime linear. Esta análise prévia teve como objectivo a determinação dos casos de carga que condicionam de forma preponderante o dimensionamento das aduelas.

3.4.1 Armazenamento

Sob a aduela inferior, na situação de empilhamento, são colocados dois apoios rígidos (ver Figura 4a). Estes apoios estão espaçados entre si em 2,4 m. Esta distância é considerada “ótima”, na medida em que conduz a menores tensões na aduela inferior, comparativamente a outras distâncias entre apoios [9].

Contudo, como observado na Figura 4a, sobre a aduela apoiada nos apoios rígidos, são colocadas mais sete aduelas, separadas entre si por elementos de madeira isolados (apoios móveis). A aduela sujeita a maiores esforços é a colocada na zona inferior, suportando as outras sete aduelas e, neste sentido, será a analisada. O peso das aduelas será simulado por duas cargas tipo faca ($F = 21,04$ kN, ver Figura 6) que actuam sobre a aduela inferior. Atendendo à mobilidade dos elementos de madeira, analisou-se a colocação destes em diferentes posições, variando-se a sua distância ao centro geométrico da peça prefabricada. A Figura 6 apresenta os valores máximos e mínimos das tensões normais, relativas ao sistema de coordenadas global na direcção dos eixos x_1 , x_2 e x_3 , para diferentes localizações de F .

Tendo por base os coeficientes de endurecimento previstos em [10], e os resultados que serão apresentados na secção 3.5.1, relativa à análise inversa, determinou-se para tensão de tracção correspondente à formação da primeira fissura o valor de 1,15 MPa para o BRFA60 e 2,10 MPa para o BRFA75. Neste sentido, estabelecem-se zonas de segurança para a localização dos apoios móveis (Figura 6). Os resultados apresentados não contabilizam qualquer factor de segurança.

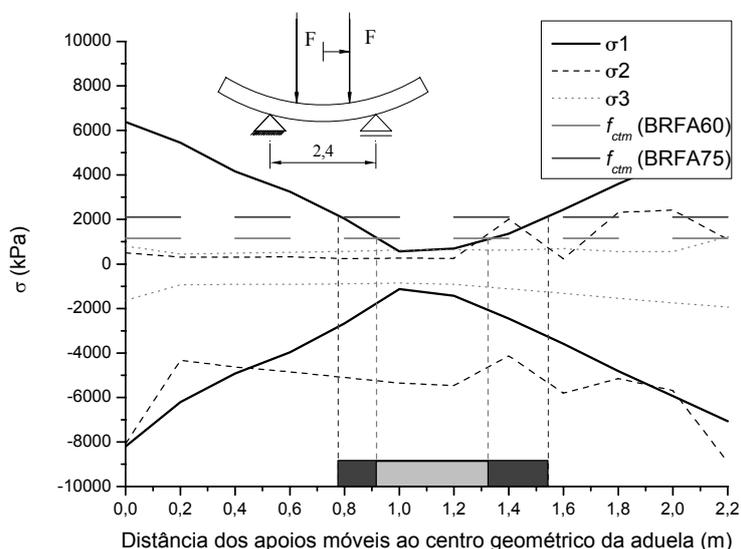


Figura 6 – Resultados obtidos para a disposição dos apoios móveis

Constata-se que, em condições normais de utilização, a fissuração dos elementos não ocorrerá. Assim, não será necessário proceder à análise em regime não linear material.

3.4.2 Manipulação pelo erector

A manipulação pelo erector é efectuada previamente à instalação das aduelas na sua disposição final. Admite-se que este caso de carga ocorre, pelo menos, 14 dias após a betonagem dos elementos prefabricados. Com base nos resultados apresentados na secção 3.5.1, para a tensão de tracção correspondente à ocorrência da primeira fissura admitiu-se o valor de 1,75 MPa para o BRFA60 e 3,0 MPa para o BRFA75. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 7. Constata-se que, no caso da composição BRFA60, poderá ocorrer fissuração dos elementos prefabricados. No entanto, como se estima que a abertura de fenda seja inferior à recomendável para este tipo de estruturas, não se verifica a necessidade de proceder à análise não linear material para a aduela submetida a este tipo de carregamento.

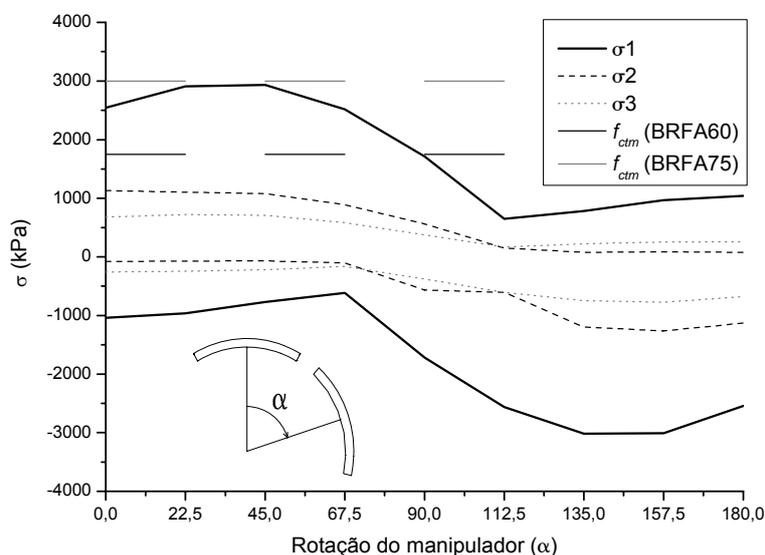


Figura 7 – Resultados obtidos para a manipulação pelo erector

3.4.3 Instalação

Quando a tuneladora avança, apoia-se no revestimento já instalado através de macacos hidráulicos (ver Figura 4c). Foi considerado que, sobre cada aduela, actuam 6 cilindros. Esta carga foi dividida pelo número de nós existente em cada face de aplicação, sob a forma de forças pontuais. Os eixos dos cilindros hidráulicos distam 80 cm entre si.

As condições fronteira adoptadas são as apresentadas na Figura 8a. As tensões obtidas, segundo x_3 , estão representadas na Figura 8b. Atendendo à magnitude dos valores obtidos (tensões de tracção ≈ 7 MPa), a análise em regime linear não permite simular com rigor suficiente o comportamento da aduela sob este carregamento. Além disso, a existência eventual de desalinhamentos agrava, significativamente, a magnitude dos esforços obtidos [9].

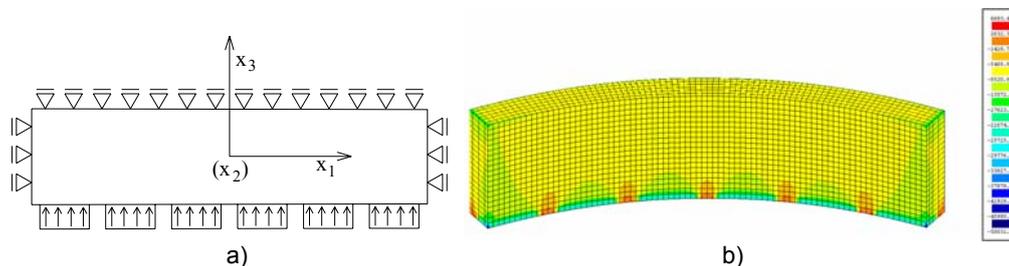


Figura 8 – Simulação numérica da instalação de uma aduela recorrendo ao MEF (regime linear)

Neste sentido, a instalação das aduelas pelo escudo da tuneladora, de entre os casos de carga previstos durante a fase de construção, é o que condiciona o dimensionamento das aduelas.

3.5 Análise não linear

3.5.1 Determinação dos parâmetros de fractura do BRFA por análise inversa

Na presente análise numérica, o comportamento pós fendilhado do BRFA é definido por um diagrama tensão-extensão trilinear.

As respostas força-flecha registadas nos ensaios de flexão poderão ser reproduzidas por simulação numérica, desde que se utilize um modelo constitutivo capaz de modelar o comportamento pós-fendilhado do betão. Para tal, no presente trabalho, utilizou-se o software FEMIX versão 4.0, encontrando-se na Figura 9 a malha de elementos finitos adoptada nas simulações numéricas.

A simulação numérica rigorosa das respostas registadas experimentalmente passa por um processo iterativo onde, entre iterações, são alterados os valores dos parâmetros de fractura do betão, tendo-se admitido que os reais parâmetros de fractura são os que permitiram simulações com maior aproximação à resposta média registada nos ensaios experimentais (ver Figura 10). Os valores dos parâmetros de fractura do betão que definem os diagramas trilinear tensão-extensão normal à fenda para BRFA60 e BRFA75, encontram-se no Quadro 3. Esses diagramas encontram-se representados na Figura 11.

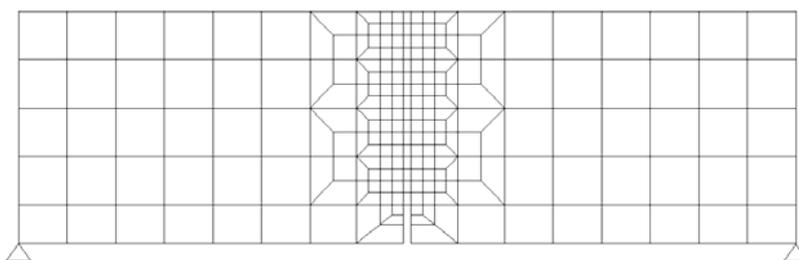


Figura 9 – Malha de elementos finitos adoptada nas simulações dos ensaios de flexão [5]

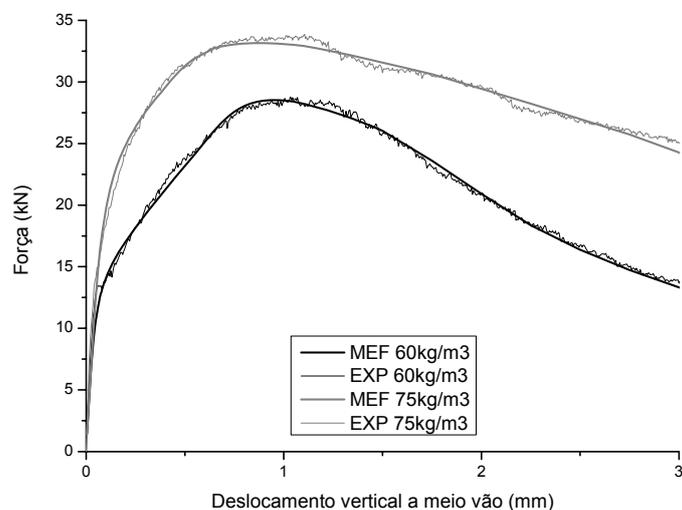


Figura 10: Relação força-flecha obtida nos ensaios experimentais (EXP) e nas simulações numéricas por análise inversa (MEF)

Quadro 3 – Valores dos parâmetros de fractura para os BRFA desenvolvidos, obtidos por análise inversa

	f_{ctm} (MPa)	G_F (Nmm/mm ²)	$\varepsilon_{n,2}^{cr} / \varepsilon_{n,ult}^{cr}$	$\sigma_{n,2}^{cr} / \sigma_{n,ult}^{cr}$	$\varepsilon_{n,2}^{cr} / \varepsilon_{n,ult}^{cr}$	$\sigma_{n,2}^{cr} / \sigma_{n,ult}^{cr}$
BRFA60	1.75	6.759	0.14	2.05	0.50	0.50
BRFA75	3.00	10.174	0.11	1.30	0.90	0.55

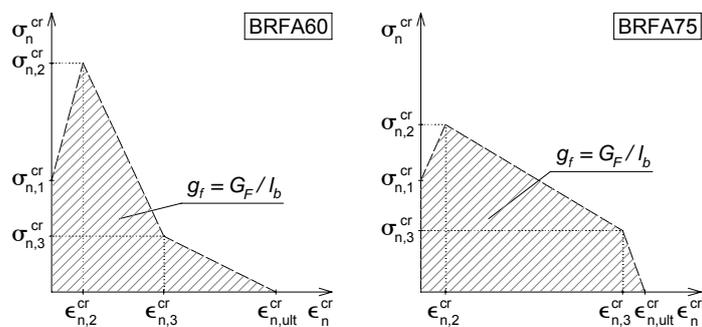


Figura 11: Lei de tensão-extensão normal à fenda

3.5.2 Simulação numérica

Os resultados apresentados no ponto 3.4 permitem constatar que o caso de carga que condiciona o dimensionamento das aduelas prefabricadas é a instalação pelo escudo. Neste sentido, procede-se à análise em regime não linear material somente deste caso de carga.

Admitiu-se que, para este tipo de solicitação, a aduela tem comportamento correspondente a uma estrutura submetida a estado plano de tensão, pelo que a superfície média da aduela foi discretizada pela malha plana de elementos finitos de oitos nós de Serendipity, representada na Figura 5b. Desta forma, o tempo de cálculo diminui de forma significativa, comparativamente a análises em que a estrutura é discretizada por elementos de volume, sem ser prejudicada, no entanto, a captação dos aspectos essenciais do comportamento da estrutura sob o referido carregamento. As propriedades dos parâmetros do material são as incluídas Quadros 2 e 3.

Inicialmente, analisa-se a instalação das aduelas numa situação considerada “óptima”, isto é, não se prevendo qualquer desalinhamento de montagem entre aduelas. Assumem-se, assim, as condições fronteira apresentadas na Figura 8a. As tensões máximas e mínimas obtidas após a imposição de todo o carregamento proveniente dos macacos hidráulicos estão apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4 – Instalação (situação “óptima”)

Composição	(MPa)	σ_2	σ_3	τ_{23}
BRFA60	máximo	1.98	1.16	3.25
	mínimo	-5.67	-13.4	
BRFA75	máximo	3.19	0.90	3.42
	mínimo	-5.23	-13.4	

Na Figura 12 apresenta-se a deformada, o padrão de fendilhação e representa-se o campo de deslocamentos e das tensões segundo x_3 , para a aduela em BRFA60, no final do carregamento.

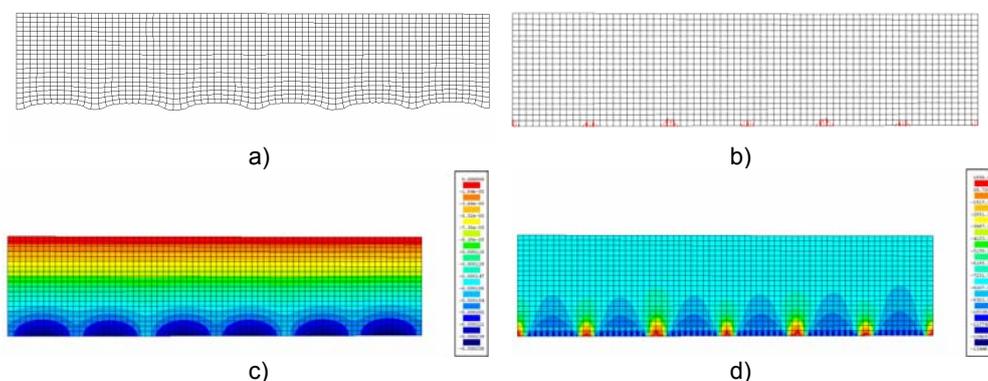


Figura 12 – a) Deformada, b) padrão de fendilhação, c) campo de deslocamentos segundo x_3 , d) campo de tensões segundo x_3 .

Os resultados obtidos permitem concluir que ambas as composições propostas apresentam resistência suficiente para as cargas previstas durante a instalação das aduelas, considerando a situação “óptima”. Nas zonas entre os macacos formam-se fendas cuja abertura máxima foi estimada em, somente, $6.507E-03$ mm para BRFA60 e em $4.336E-03$ mm para BRFA75, a qual foi obtida multiplicando a extensão máxima normal à fenda ($\epsilon_{n,max}^{cr}$) pela largura da banda de

fendilhação [11]. Esta última foi considerada como sendo igual à raiz quadrada da área associada ao elemento onde ocorreu $\varepsilon_{n,max}^{cr}$.

Contudo, e como referido em pontos anteriores, no decorrer do processo de instalação é corrente a existência de pequenos desalinhamentos entre aduelas que alteram, de forma significativa, as condições fronteira admitidas na anterior análise. Neste sentido, apresentam-se os resultados obtidos para a eventualidade de um desalinhamento da aduela de fecho durante o processo de instalação (ver Figura 13a). As condições fronteira do modelo de elementos finitos, para a simulação do desalinhamento admitido, encontram-se representadas na Figura 13b.

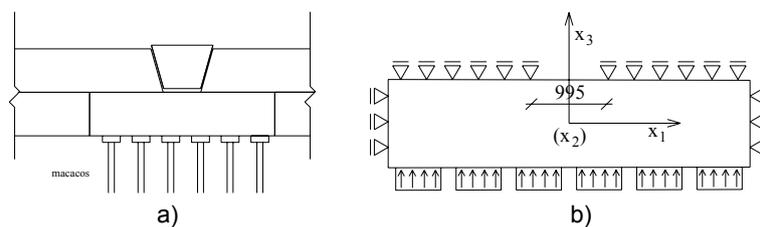


Figura 13 – Representação do desalinhamento de aduela de fecho durante o processo de instalação

Na Figura 14 representa-se a deformada, o padrão de fendilhação, e os campos de tensões segundo x_3 , para a aduela em BRFA60, no final do carregamento.

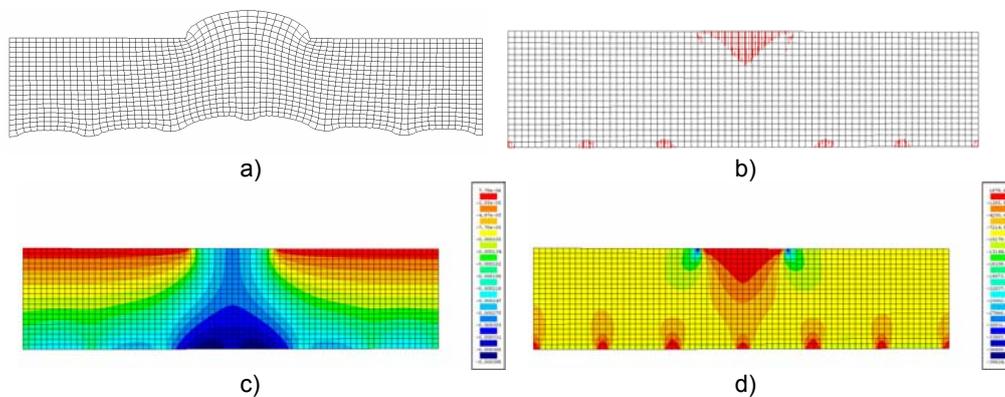


Figura 14 – a) Deformada, b) padrão de fendilhação, c) campo de deslocamentos segundo x_3 , d) campo de tensões segundo x_3

As tensões máximas e mínimas obtidas após a imposição de todo o carregamento proveniente dos macacos hidráulicos estão apresentadas no Quadro 5. As tensões máximas de corte são demasiado elevadas, o que indica que o modelo constitutivo utilizado não simula adequadamente a degradação da transferência de tensões entre faces da fenda que ocorrerá com a abertura destas faces, dado que, mesmo para um betão reforçado com 60 ou 75 kg/m³ de fibras, a sua resistência ao corte será, muito provavelmente, inferior aos valores indicados neste Quadro.

Importa salientar que o deslocamento máximo obtido segundo a direcção x_3 , na zona do desalinhamento, é de apenas 0.28 mm; isto é, a existência de um desalinhamento de dimensão muito reduzida conduzirá à ocorrência de um maior número de fendas na aduela que se instala. Contudo, adoptando procedimento similar ao descrito na anterior análise não linear, a abertura máxima de fenda foi estimada em, apenas, 13.57E-03 mm para BRFA60 e em 7.713E-03 mm para BRFA75.

Quadro 5 – Instalação (desalinhamento da aduela de fecho)

Composição	(MPa)	σ_2	σ_3	τ_{23}
BRFA60	máximo	3.38	1.08	11.1
	mínimo	-29.9	-39.5	
BRFA75	máximo	5.06	(-7.37)	11.0
	mínimo	-28.6	-38.6	

3.5.3 Momento resistente

A verificação de resistência à flexão das soluções de reforço propostas para as aduelas prefabricadas é efectuada comparando os momentos resistentes com o momento máximo solicitante de cálculo que, segundo a Spie Batignolles, é de 66.57 kN.m, para o caso do Metro de Lisboa. Recorrendo ao software DOCROS [12], obtiveram-se as curvas momento-curvatura da secção das aduelas em BRFA60 e BRFA75, cuja representação se encontra na Figura 15. Na determinação destas curvas adoptaram os valores dos parâmetros de fractura indicados no Quadro 3. Com o objectivo de se observar o efeito da presença das fibras de aço, apresenta-se, também, a título indicativo, a curva momento-curvatura para um betão com classe de resistência idêntica (C40/50), mas sem a inclusão de fibras, admitindo-se as propriedades referidas em [10].

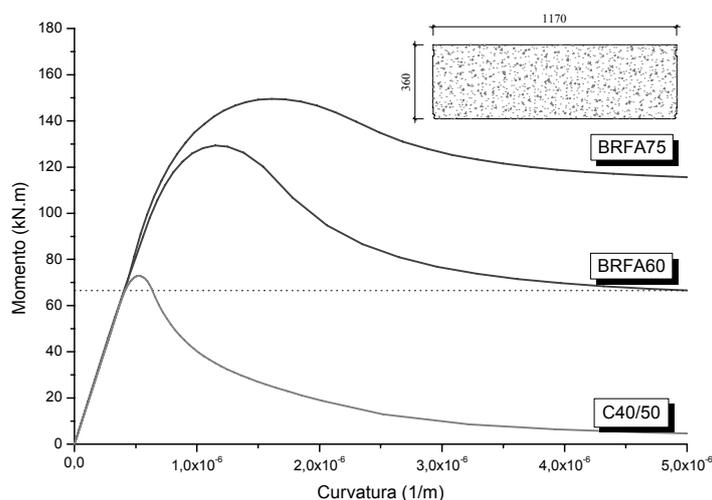


Figura 15 – Relação Momento-Curvatura para a secção da aduela prefabricada

Os valores apresentados no Quadro 6 consideram os factores de segurança para o valor de momento resistente e momento máximo solicitante de cálculo. Com base nos valores referidos, constata-se que somente a composição BRFA75 poderá corresponder de forma satisfatória aos esforços a que uma aduela estará sujeita durante o longo prazo, se admitirmos o momento solicitante previsto para o caso do Metro de Lisboa.

	BRFA60	BRFA75	C40/50
Momento resistente (kN.m)	86.22	99.70	48.61
Momento solicitante (kN.m)		89.87	

4. CONCLUSÕES

A análise das condições de carregamento a que uma aduela está sujeita durante a sua vida útil permitiu constatar a existência de estados de tensão que poderão conduzir ao aparecimento de danos irreversíveis nestes elementos prefabricados.

A fase de instalação das aduelas, na sua disposição final, apresenta-se como uma situação crítica, agravada pela existência comum de ligeiros desalinhamentos de montagem entre as aduelas. Os casos de carga que condicionam o dimensionamento do reforço a instalar nas aduelas prefabricadas são a instalação das aduelas e o comportamento a longo prazo.

A magnitude dos esforços obtidos, bem como a largura de fendas prevista, permite constatar que é possível a substituição total da armadura convencional por um sistema de reforço em fibras de aço. Contudo, qualquer conclusão definitiva só poderá ser assumida após ensaios experimentais em elementos estruturais à escala real.

Importa avaliar outras composições de betão, com diferentes classes de resistência e dosagem em fibras, optando-se, assim, pela composição que apresente um comportamento otimizado, com menor custo.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores pretendem agradecer o apoio disponibilizado pela FCT (Projecto FICOFIRE - POCTI/ECM/57518/2004), Spie Batignolles, Civitest, Secil e DuroEuropa. O terceiro autor agradece a bolsa concedida ao abrigo do referido projecto.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Ramos *et al.* – “Informe final del análisis del uso de fibras metálicas como único refuerzo del hormigón de las dovelas del túnel de la línea 9 del metro de Barcelona”, Informe C5065/F, Departamento de Ingeniería de la Construcción, Universitat Politècnica de Catalunya, Octubre, 2003, 46 p.

- [2] Kooiman *et al.* – “Steel fibre reinforced concrete segments in the second heinenoord tunnel”, fib Symposium, Prague, Czech Republic, 13-15 October, 1999, Session 5: Research and Innovation within a project.
- [3] Sorelli, L. - "Numerical analysis of the experimental results of pre-cast tunnel lining segments made of reinforced concrete and steel fibre reinforced concrete tested within the national project BEFIM", Septembre, 2005, 92 p.
- [4] Kooiman, A.; Walraven, J. – “Steel fibre reinforced high performance concrete for the application in shield tunnel linings”, *Tunnels and Metropolises*, Negro Jr. & Ferreira (eds), Rotterdam, Balkema, 1998, pp. 721-726.
- [5] Cunha, V. – “Investigação experimental e numérica do comportamento à tracção de betão reforçado com fibras de aço”, Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Julho, 2004, 122 p.
- [6] Lourenço *et al.* – "Composição de betão de resistência melhorada ao fogo para aduelas de túneis - parte I", Relatório 05-DEC/E-32, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Dezembro, 2005, 42 p.
- [7] Barros *et al.* – "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, 19 p., 21 Setembro de 2006.
- [8] Azevedo *et al.* – "Software no ensino e no projecto de estruturas", III Congresso Luso Moçambicano de Engenharia, p. 81-92, 19-21 Agosto 2003.
- [9] Mesquita *et al.* – "Simulação por elementos finitos do comportamento de aduelas de túneis em betão", Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho (a publicar).
- [10] Comité Euro-International du Béton (1993), CEB-FIP Model Code 1990, “Design Code”.
- [11] Barros, J. – “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.
- [12] Ribeiro *et al.* – "Modelo de secção para dimensionamento à flexão de estruturas de betão: formulação e manual do programa DOCROS", Relatório 03-DEC/E-25, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 59 p., Novembro 2003.