

Influência da geometria e propriedades mecânicas de fibras de aço no desempenho ao arrancamento



**Vítor M.C.F.
Cunha¹**



**José M.
Sena-Cruz²**



**Joaquim A.O.
Barros³**

RESUMO

A eficiência de uma fibra como meio de transferência de tensões é frequentemente determinada por intermédio de ensaios de arrancamento, sendo o deslizamento da fibra monitorizado em função da força de arrancamento aplicada na fibra. Nas últimas três décadas, vários fabricantes introduziram no mercado fibras com geometria melhorada, reivindicando melhores desempenhos comparativamente com as fibras lisas. Hoje em dia as fibras adicionadas a uma matriz cimentícia possuem, em geral, uma ancoragem mecânica. Recorrentemente, as fibras são produzidas por deformação mecânica das suas extremidades em forma de ganchos, cones, remos, etc. Não obstante, devido a diferentes materiais e processos de fabrico, as propriedades mecânicas das fibras como, a resistência à tracção, a eficiência da ancoragem mecânica diferem entre os vários fabricantes, mesmo considerando o mesmo tipo de fibra. Estas diferenças têm influência no comportamento ao arrancamento de uma fibra e, consequentemente, no comportamento mecânico de um material compósito reforçado com fibras.

No presente trabalho é realizada uma análise comparativa de três tipos de fibras de aço com ancoragens em forma de gancho produzidas por três fabricantes distintos. A influência da variação das dimensões da geometria das fibras e das propriedades mecânicas destas no comportamento ao arrancamento foi avaliada. Ensaios à tracção e de arrancamento com fibras dos distintos fabricantes são apresentados, sendo analisados os resultados obtidos.

PALAVRAS-CHAVE

Fibras de aço com ancoragens, arrancamento, controlo de qualidade

¹ ISISE, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães. vcunha@civil.uminho.pt

² ISISE, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães. jsena@civil.uminho.pt

³ ISISE, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães. barros@civil.uminho.pt

1. INTRODUÇÃO

O comportamento mecânico de um material compósito reforçado com fibras de aço, BRFA, é regido pelo somatório da contribuição unitária da interacção entre fibra e matriz. Apesar de teoricamente ser possível estimar o comportamento mecânico de um BRFA a partir do comportamento micro-mecânico de uma única fibra, esta tarefa é consideravelmente árdua devido a uma panóplia de complexos mecanismos envolvidos no comportamento mecânico global de um BRFA. No entanto, os testes de arrancamento de uma fibra unitária relativa a meio cimentício têm sido realizados nas últimas três décadas como um meio de otimizar a conjugação do tipo de fibra com o tipo de matriz cimentícia, assim como melhorar a compreensão dos mecanismos envolvidos no comportamento de um BRFA.

As fibras curtas usadas utilizadas no betão podem ser classificadas de diversas formas. Primeiramente, segundo o tipo de material da fibra, o qual pode ser natural, quer orgânico ou mineral, ou artificial (por ex. aço, titânio, carbono, vidro, etc.). Em segundo, de acordo com as suas propriedades físicas/químicas, tais como: densidade, rugosidade, reactividade com a matriz cimentícia, resistência ao fogo, etc. Em terceiro, segundo as suas propriedades mecânicas: resistência à tracção, módulo de elasticidade, deformação até à ruptura, aderência da superfície, etc. Adicionalmente, após a escolha de um tipo de fibra, uma infinidade de combinações das propriedades geométricas relacionadas com a forma da secção transversal, o comprimento, o diâmetro ou diâmetro equivalente e deformação da superfície podem ser seleccionadas. No mercado estão disponíveis diversos tipos de fibras de aço, as quais diferem em tamanho, forma ou nas propriedades do material. Devido a diferentes materiais e processos de fabricação, as propriedades mecânicas e performance da ancoragem mecânica diferem consideravelmente para cada tipo de fibra. Estas diferenças têm um impacto significativo no comportamento ao arrancamento da fibra e, consequentemente no comportamento global do BRFA sob carregamento [1-2]. O estudo do comportamento ao arrancamento de fibras lisas teve o seu auge nos anos 80. Estudos analíticos foram conduzidos com o intuito de justificar os benefícios da adição de fibras a uma matriz cimentícia [3]. Com o decorrer dos anos, fibras com geometria melhorada foram introduzidas no mercado por vários produtores com melhor comportamento do que as fibras lisas [4-5]. No caso de as fibras possuírem ancoragens mecânicas, estas podem ser “endireitadas” durante o seu arrancamento, sendo necessário ter em linha de conta a energia adicional dissipada no processo de endireitamento da fibra [5].

No presente artigo é apresentada uma análise comparativas de três tipos de fibras de aço com ancoragens em forma de “gancho” de três fabricantes distintos. A variação das dimensões da geometria das fibras foi aferida, assim como a sua influência nas propriedades mecânicas das fibras. Para cada tipo de fibras são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios à tracção e de arrancamento. Os ensaios de arrancamento foram realizados com três inclinações distintas (0°, 30° e 60°) para um comprimento embebido da fibra igual a 15 mm.

2. GEOMETRIA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS FIBRAS

Com o intuito de verificar a conformidade das fibras para a sua aplicação em betões reforçados com fibras foi seguida a norma ASTM A820-90 [6]. Apesar dos três tipos de fibras estudados serem comercializadas com este propósito e, consequentemente, à primeira vista cumprindo as especificações requeridas, a norma previamente referida foi utilizada sobretudo com a finalidade de proporcionar uma metodologia de base para a aferição da geometria das fibras em causa.

O comprimento anunciado pelos fabricantes para os três tipos de fibras é de 60 mm, por sua vez o diâmetro para as *Marca A* e *Marca B* é de 0,75 mm, e de 1 mm para a *Marca C*. Após uma inspecção visual das fibras, isto é, uma análise qualitativa, duas breves conclusões podem ser retiradas. Em primeiro, as fibras correspondentes à *Marca B* e *C* possuíam um ligeiro empenamento do seu eixo longitudinal, sendo tal facto mais pronunciado nas fibras da *Marca B*. Isto pode ser encarado como o resultado do método de comercialização destes dois tipos de fibras, designadamente, o seu transporte e empacotamento. Por outro lado, no caso das fibras da *Marca A* este empenamento não foi constatado,

devido a estas serem comercializadas em pentes colados, o que aumenta a rigidez à flexão e, naturalmente diminui o empenamento das fibras durante o procedimento de empacotamento e transporte. Por último, numa primeira análise às dimensões e forma geométrica das fibras, as da *Marca B* e *C* revelam-se algo irregulares.

2.1 Dimensões e tolerâncias

Para o controlo geométrico foram seleccionadas aleatoriamente 10 fibras de cada marca. O comprimento e diâmetro das fibras foram medidos com um paquímetro digital com uma precisão de $\pm 0,01$ mm. Por sua vez o peso das fibras foi aferido com o recurso a uma balança digital com precisão de $\pm 0,0001$ g. Como definido na norma ASTM A820-90, as fibras mecanicamente deformadas, como é o presente caso, são caracterizadas pelo seu diâmetro, d , ou diâmetro equivalente, d_e , e comprimento (de extremidade a extremidade) após serem mecanicamente deformadas, l_n . O coeficiente de forma nominal, λ_n , é definido como l_n/d ou l_n/d_e . No que respeita à conformidade geométrica das fibras a ASTM A820-90 preconiza que o diâmetro e comprimento não deverão ter uma variação superior a $\pm 10\%$ do que o anunciado na ficha técnica da fibra, enquanto o coeficiente de forma não deverá diferir mais de $\pm 15\%$ do que o anunciado. Adicionalmente, pelo menos 90% das fibras testadas deverão cumprir as tolerâncias referidas. No presente estudo a totalidade das fibras testadas está em conformidade com o estipulado na referida norma.

2.2 Parâmetros geométricos

No Quadro 1 indicam-se, para cada tipo de fibra, os valores médios do: peso, M_{avg} , comprimento nominal, $l_{n,avg}$, diâmetro ou diâmetro equivalente, d_{avg} , e coeficiente de forma nominal, $\lambda_{n,avg}$, bem como os correspondentes coeficientes de variação, CoV. Os resultados obtidos revelam que as fibras da *Marca A* e *B* possuem pesos similares, de aproximadamente 0,20 g, como esperado, visto que ambos os fabricantes anunciam nas fichas técnicas as mesmas dimensões geométricas. Contudo o valor do CoV é significativamente menor para a *Marca A*. Por sua vez, o peso das fibras da *Marca C* é aproximadamente duas vezes superior ao peso das outras fibras, com um valor médio de cerca de 0,42 g. Relativamente ao comprimento nominal das fibras, o valor do CoV para as fibras testadas é relativamente baixo. Para fibras da *Marca A* e *B* o comprimento médio medido é menor que o anunciado pelo fabricante, enquanto para a *Marca C* verifica-se o oposto.

Quadro 1. Valores médios dos parâmetros geométricos.

| Marca | M_{avg} [g] | CoV [%] | $l_{n,avg}$ [mm] | CoV [%] | d_{avg} [mm] | CoV [%] | $\lambda_{n,avg}$ [mm] | CoV [%] |
|-------|------------------|------------|---------------------|------------|-------------------|------------|---------------------------|------------|
| A | 0,2053 | 0,7 | 58,38 | 0,1 | 0,74 | 0,4 | 79,0 | 0,5 |
| B | 0,2038 | 5,8 | 57,56 | 0,6 | 0,74 | 2,7 | 77,4 | 2,6 |
| C | 0,4249 | 2,6 | 60,51 | 0,4 | 1,07 | 0,9 | 56,7 | 1,1 |

Convém referir que após algumas medições do diâmetro das fibras da *Marca C* constatou-se que algumas delas não apresentavam uma secção perfeitamente circular. De facto, a maioria das fibras apresentava uma secção rectangular com os cantos boleados. A dimensão do menor lado da secção variou entre 0,90 e 0,98 mm, enquanto a dimensão do maior lado variou entre 1,05 e 1,15 mm. Isto poder-se-á dever ao processo de deformação da fibra para a obtenção da ancoragem mecânica, isto é, o “gancho”. Por conseguinte, para as fibras da *Marca C*, o diâmetro indicado no Quadro 1 corresponde a um diâmetro equivalente, o qual foi calculado por intermédio da seguinte expressão:

$$d_e = \sqrt{\frac{4 \cdot M}{\pi \cdot l_n \cdot \rho}} \quad (1)$$

em que, ρ é o peso específico do aço, tendo sido adoptado o valor de $7,85 \times 10^{-3}$ g/mm³, como sugerido pela norma ASTM A820-90. No que respeita ao valor médio do coeficiente de forma, $\lambda_{n,avg}$, para as três marcas de fibras foi determinado um valor inferior ao anunciado pelos fabricantes.

Durante a aferição das dimensões das fibras constatou-se, em algumas delas, uma significativa irregularidade das dimensões e forma da ancoragem. Com o intuito de se aferir quantitativamente as dimensões das ancoragens, as fibras foram digitalizadas e procedeu-se à medição das dimensões da ancoragem com o recurso a um programa de CAD, i.e. desenho auxiliado por computador. Na Fig. 1 encontram-se representados os parâmetros que definem as dimensões e geometria da ancoragem. Estes parâmetros foram medidos segundo o eixo longitudinal das fibras.

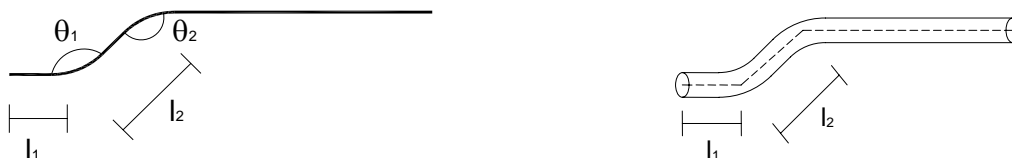


Figura 1. Parâmetros geométricos da ancoragem.

No Quadro 2 incluem-se os valores médios, *Avg*, dos referidos parâmetros e correspondentes valores dos coeficientes de variação, *CoV*. De salientar que para cada tipo de fibra foi utilizado um conjunto de 10 provetes, sendo que para cada fibra foram aferidas as dimensões das duas ancoragens, resultando assim em 20 medições por parâmetro. As fibras da *Marca A* e *B* apresentaram comprimentos de ancoragem quase idênticos (l_1 e l_2). Por outro lado, o comprimento da ancoragem das fibras da *Marca C* foi consideravelmente maior, sendo de salientar também o elevado valor do *CoV* para o parâmetro l_1 . Resumindo, na generalidade as fibras da *Marca A*, quando comparadas com as outras duas marcas, apresentaram valores do *CoV* significativamente mais baixos para as suas dimensões geométricas.

Quadro 2: Dimensões dos parâmetros geométricos das ancoragens.

| Marca | l_1 [mm] | | l_2 [mm] | | θ_1 [deg.] | | θ_2 [deg.] | |
|-------|------------|---------|------------|---------|-------------------|---------|-------------------|---------|
| | Avg. | CoV [%] | Avg. | CoV [%] | Avg. | CoV [%] | Avg. | CoV [%] |
| A | 2.2 | 8.9 | 2.5 | 5.6 | 139 | 1.6 | 138 | 1.4 |
| B | 2.2 | 8.6 | 2.6 | 10.0 | 145 | 4.7 | 145 | 3.9 |
| C | 3.3 | 24.9 | 4.0 | 13.3 | 147 | 2.1 | 140 | 4.2 |

2.3 Resistência à tracção

A resistência à tracção das fibras foi obtida numa prensa servo-hidráulica Lloyd LR30K com uma capacidade de 30 kN. Os testes foram efectuados sob controlo de deslocamento pelo transdutor interno da prensa, a uma velocidade de deformação de 10 μ m/s. No Quadro 3 indicam-se os valores da resistência à tracção médios, $f_{u,avg}$, característicos, $f_{u,k}$, e respectivo coeficiente de variação, *CoV*. A resistência característica à tracção foi calculada com a Eq. 2 para um intervalo de confiança de 95% admitindo uma distribuição “t-student”.

$$f_{u,k} = f_{u,avg} - t_{\alpha/2, n-1} \cdot s_d / \sqrt{n} \quad (2)$$

Em que s_d é o desvio padrão de uma amostra aleatória com uma distribuição normal, onde n é o número de provetes ensaiados. Para o tamanho da amostra em causa, $t_{\alpha/2, n-1}$ adopta o valor de 2,262. De referir que as amostras estudadas possuíam uma distribuição normal segundo o teste de normalidade de Shapiro-Wilk [7].

O valor da resistência à tracção para os três tipos de fibras estudados foi similar, contudo as fibras da *Marca A* possuem uma resistência aproximadamente 10% superior comparativamente com as outras marcas de fibras. Adicionalmente, constatou-se que as resistências à tracção obtidas experimentalmente são superiores às anunciadas pelos fabricantes.

Quadro 3: Resistência à tracção média e característica.

| Marca | $f_{u,avg}$ [MPa] | $f_{u,k}$ [MPa] | CoV [%] |
|-------|-------------------|-----------------|---------|
| A | 1313 | 1284 | 3.1 |
| B | 1184 | 1161 | 2.7 |
| C | 1153 | 1130 | 2.8 |

3. ESQUEMA DE ENSAIO E PROVETES

Os ensaios de arrancamento das fibras foram efectuados em provetes cilíndricos de betão, com um diâmetro e altura de 80 mm. Cada série é composta por 5 provetes. Tendo estes sido produzidos com recurso a um molde capaz de acomodar a totalidade dos provetes, permitindo um correcto posicionamento da fibra, de forma a garantir o comprimento embebido desejado (15 mm) e inclinação da fibra desejada (0°, 30° e 60°). Em [8] podem ser encontrados detalhes adicionais sobre o molde e produção dos provetes. Aproximadamente 28 dias após a betonagem, a laje de betão foi desmoldada, os provetes cilíndricos contendo cada uma das fibras foram caroteados da laje. Os testes de arrancamento das fibras foram efectuados com uma idade de 35 dias. A resistência à compressão foi aferida por intermédio de três provetes cúbicos com 150 mm de aresta que, à data dos ensaios, era de 59.8 MPa com um coeficiente de variação de 2.6%.

Os ensaios de arrancamento foram realizados numa prensa servo-hidráulica Lloyd LR30K com uma capacidade de 30 kN. O provete cilíndrico de betão contendo a fibra foi montado numa plataforma de aço especialmente concebida para o efeito, ver Fig. 2a. Esta plataforma é constituída por uma chapa de aço montada na parte inferior da prensa, e por um anel de aço acoplado à referida chapa com o recurso a três parafusos de aço. A extremidade da fibra saliente do provete de betão foi presa por uma amarra mecânica da prensa.



Figura 2. Perspectiva do ensaio de arrancamento: (a) vista geral, (b) detalhe da placa de alumínio acoplada à fibra.

O deslizamento da fibra foi medido com recurso a três transdutores de deslocamento (campo linear ± 5 mm). De forma a se excluírem das medições, deformações parasitas da prensa e escorregamento da fibra na amarra, as leituras dos transdutores foram efectuadas numa placa de alumínio directamente acoplada na fibra. Esta foi fixada à fibra por intermédio de dois pequenos parafusos (detalhe na Fig. 2b). Como os três transdutores foram dispostos em redor do provete, formando um ângulo de 120° entre eles, o deslizamento real entre a fibra e o betão envolvente é igual à média das leituras dos três transdutores. O ensaio foi efectuado sob controlo de deslocamento com o transdutor interno da prensa. Em todos os ensaios de arrancamento foi utilizada uma velocidade de deformação de 10 $\mu\text{m/s}$

4. COMPORTAMENTO DA FIBRA AO ARRANCAMENTO

4.1 Modos de ruptura

Os modos de ruptura observados durante os ensaios de arrancamento encontram-se esquematicamente representados na Fig. 3, como a projecção do plano longitudinal do cilindro de onde a fibra foi arrancada. Por sua vez, no Quadro 4 indicam-se os modos de ruptura obtidos para cada uma das séries. Sempre que foi observado mais do que um modo de ruptura numa série, é indicado o número de provetes entre parêntesis correspondente a cada um dos modos de ruptura.

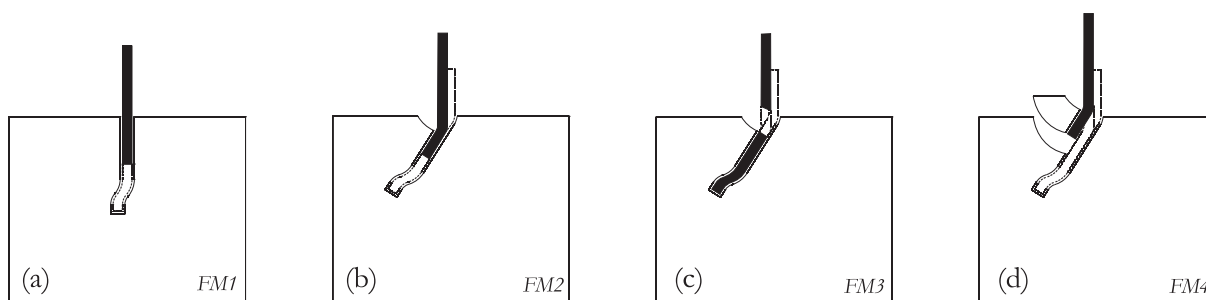


Figura 3. Modos de ruptura observados durante o arrancamento da fibra.

A totalidade das fibras alinhadas com a carga (ângulo de 0°) foram completamente arrancadas (ver Fig. 3a). Após descolagem da interface fibra/matriz, o gancho é completamente deformado e arrancado. Este modo de ruptura foi designado de *FM1*. Um modo de ruptura similar, *FM2*, foi observado para todas as fibras da *Marca A* com uma inclinação de 30° e para algumas fibras da *Marca C* com a mesma inclinação. Para este modo de ruptura, em contraste ao observado para fibras alinhadas, verifica-se o destacamento de betão no ponto de dobragem da fibra, Fig. 3b. No que concerne às fibras da *Marca B*, durante o arrancamento da fibra observou-se a fractura desta, acompanhado de destacamento de uma parcela de betão à saída da fibra do provete, *FM3* (ver Fig. 3c). Este modo de ruptura foi igualmente observado para algumas fibras da *Marca C* e para uma inclinação de 30° . Na Fig. 3d representa-se o modo de ruptura por destacamento de betão, *FM4*. Neste caso a fibra é quase na sua totalidade arrancada do betão, contudo à medida que o comprimento embebido da fibra diminui e a extremidade desta se aproxima do ponto de saída do provete de betão, ocorre o destacamento de volume de betão e consequentemente a ruptura prematura. O referido modo de ruptura somente foi verificado para fibras da *Marca A* e *C* com uma inclinação de 60° . A ruptura prematura das fibras durante o seu arrancamento foi observada exclusivamente para fibras inclinadas.

Quadro 4: Modos de ruptura observados para as séries testadas.

| Marca | Inclinação [$^\circ$] | | |
|-------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | 0 | 30 | 60 |
| A | <i>FM1</i> | <i>FM2</i> | <i>FM3</i> (3); <i>FM4</i> (2) |
| B | <i>FM1</i> | <i>FM3</i> | <i>FM3</i> |
| C | <i>FM1</i> | <i>FM2</i> (3); <i>FM3</i> (2) | <i>FM3</i> (2); <i>FM4</i> (3) |

4.2 Relação força de arrancamento vs. deslizamento

As curvas experimentais médias força de arrancamento vs. deslizamento, para as séries testadas, encontram-se representadas na Fig. 4. Estas curvas encontram-se representadas até um deslizamento máximo de 8 mm, devido ao campo de leitura estar limitado a um valor inferior ao do comprimento embebido da fibra (15 mm).

Para as fibras da *Marca A* e *B* alinhadas com a força de arranque (0°), a forma das curvas médias força de arrancamento vs. deslizamento foi similar, como seria esperado, pois como previamente aferido no estudo geométrico destas fibras, ambas possuem dimensões geométricas quase idênticas (ver Quadros 1 e 2). Apesar da curva média força de arrancamento vs. deslizamento das fibras da *Marca C*

ser similar às da *Marca A* e *B*, esta revelou um significativo aumento da sua força de arrancamento máximo e energia dissipada, como esperado. Isto prende-se com o facto da maior dimensão quer do diâmetro e ancoragem das fibras da *Marca C*. Apesar da forma das curvas médias para os três tipos de fibras ser similar existem pequenas diferenças que merecem ser discutidas. Relativamente ao tramo linear inicial, as fibras da *Marca C* revelaram um comportamento mais rígido quando comparado com os outros tipos de fibras. No que concerne ao comportamento pós-pico das fibras da *Marca A* e *B*, o processo de arrancamento da fibra a partir de um deslizamento aproximado de 4,5 mm decorre em atrito dinâmico. Este valor do deslizamento corresponde de uma forma aproximada ao comprimento da ancoragem deformada, isto é, “esticada”, de ambas as fibras (ver Quadro 2). De salientar que entre o final do ramo linear e o início da fase em que o arrancamento ocorre em atrito dinâmico, o comportamento ao arrancamento é governado pela deformação do gancho da fibra. Após o referido deslizamento ser atingido (4,5 mm), seria de todo espectável que a resistência residual ao arrancamento de ambas as fibras fosse similar, dado que ambas possuem diâmetros idênticos, resultando em resistências à fricção similares. Contudo, as fibras da *Marca B* apresentam uma resistência residual ao arrancamento ligeiramente maior na fase de arrancamento por atrito dinâmico. Isto poder-se-á dever ao empenamento do eixo longitudinal observado nas fibras da *Marca B*, o qual poderá ter contribuído para este ligeiro aumento da resistência à fricção. Por outro lado, para as fibras da *Marca C* o processo de arrancamento em atrito dinâmico inicia-se para um valor de deslizamento consideravelmente superior, aproximadamente 7 mm, devido ao comprimento da ancoragem desta fibra ser consideravelmente maior que o das fibras da *Marca A* e *B* (ver Quadro 2).

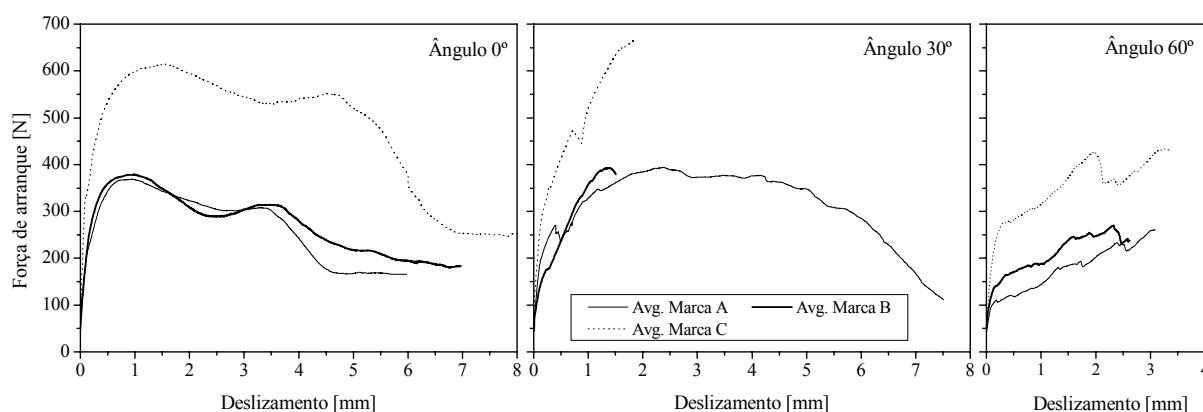


Figura 4: Curvas médias experimentais força de arrancamento vs. deslizamento.

Nas séries com uma inclinação de 30°, como previamente referido, ocorreram dois modos de ruptura, reflectindo-se isto em dois tipos de curvas força de arrancamento vs. deslizamento (Fig. 4). Todas as fibras da *Marca A* foram completamente arrancadas, contrariamente para as fibras da *Marca B* observou-se fractura da totalidade destas. Por sua vez, para a *Marca C* ambos os modos de ruptura foram observados. Na Fig. 4, a curva média experimental encontra-se representada até um deslizamento para o qual ocorreu a fractura. Quanto às fibras da *Marca A* e *B*, apesar de estas apresentarem forças de arrancamento máximas similares, a energia dissipada nas fibras da *Marca A* é significativamente superior à das fibras da *Marca B*. Por conseguinte, a ligeira diferença verificada na resistência à tracção entre as fibras das referidas marcas (aprox. 10%) desempenha um papel preponderante na energia dissipada durante o arrancamento das fibras com uma inclinação de 30°. Apesar da resistência à tracção das fibras da *Marca C* ser similar à resistência das fibras da *Marca B*, verificou-se que algumas fibras da *Marca C* foram completamente arrancadas. Tal deveu-se ao maior diâmetro das fibras da *Marca C*, isto é, maior área da secção transversal, à qual irá corresponder uma maior capacidade resistente da fibra. Contudo, deverá ser salientado que, apesar do maior diâmetro algumas das fibras fracturaram, o que pode ser justificado pelo maior comprimento da ancoragem nas fibras da *Marca C*. Como consequência de uma ancoragem maior, ir-se-á obter uma mobilização superior do mecanismo de ancoragem, visto se necessário uma força de arrancamento mais elevada para deformar a ancoragem, resultando numa concentração mais elevada de tensões e, consequentemente, a ocorrência da ruptura prematura da fibra. Finalmente, pode ser realçado que um

diâmetro maior, pode não ser uma condição “sine qua non” para evitar a fractura da fibra, dado que as dimensões da ancoragem deverão ser igualmente consideradas. O ramo do pré-pico das curvas referentes às fibras com uma inclinação de 30° é em tudo parecido com o observado para as fibras alinhadas. Contudo a parte não linear deste ramo é significativamente mais pronunciada que para as fibras alinhadas, em parte devido à fissuração e destacamento da matriz no ponto de dobragem da fibra, como consequência da concentração de tensões adicionais neste ponto de dobragem da fibra. Para alguns provetes, constatarem-se quedas abruptas da força de arrancamento antes de ser atingida a carga máxima, isto deveu-se à formação de cunhas na zona de saída da fibra do provete de betão que posteriormente se destacaram do provete. Após o completo destacamento de cada uma das cunhas, uma nova cunha mais estável é formada e o restante segmento de fibra embebido na matriz é arrancado.

No que respeita às séries com uma inclinação de 60° foi observado um comportamento completamente distinto (Fig. 4). O modo de fractura observado nestas séries ou foi por fractura da fibra, ou destacamento de betão. À medida que a inclinação aumenta, há um incremento na concentração de tensões no ponto de saída da fibra do provete de betão, consequentemente a matriz torna-se assim mais susceptível a fissuração e destacamento de porções de betão. Relativamente ao comportamento do pré-pico, este é caracterizado por uma perda de rigidez significativa. Comparado as curvas médias das séries com 30° e 60°, pode se constatar que para as séries de 60°, a ocorrência de fendilhação e destacamento de betão ocorre para um nível mais baixo de carga. Adicionalmente, à medida que uma maior porção de betão é destacada, um comprimento maior da fibra pode ser facilmente dobrado, o que favorece o decréscimo de rigidez até ao pico.

4.3 Propriedades micro-mecânicas

No Quadro 5 indicam-se os valores médios para as séries testadas dos seguintes parâmetros: força máxima de arrancamento, P_{max} , força de arrancamento para um deslizamento de 0,3 mm e 3 mm, respectivamente, $P_{0,3mm}$ e P_{3mm} , e a energia dissipada até um deslizamento de 3 mm, G_{3mm} . Adicionalmente, incluem-se entre parêntesis os valores do coeficiente de variação.

Quadro 5: Valores médios das propriedades micro-mecânicas.

| Ângulo / Marca | | P_{max} [N] | | $P_{0,3mm}$ [N] | | P_{3mm} [N] | | G_{3mm} [N·mm] | |
|-------------------|---|---------------|---------|-----------------|---------|---------------|---------|------------------|---------|
| 0° | A | 373,1 | (15,7%) | 301,6 | (18,5%) | 303,1 | (9,1%) | 0,964 | (12,1%) |
| | B | 387,6 | (9,4%) | 317,2 | (13,9%) | 304,0 | (5,1%) | 0,964 | (7,8%) |
| | C | 639,3 | (12,6%) | 462,1 | (11,7%) | 544,1 | (7,8%) | 1,665 | (10,2%) |
| 30° | A | 412,1 | (5,6%) | 250,1 | (17,8%) | 373,1 | (7,4%) | 1,000 | (6,9%) |
| | B | 420,4 | (4,9%) | 181,7 | (21,7%) | 0 | (-) | 0,569 | (28,5%) |
| | C | 696,6 | (14,4%) | 354,0 | (15,2%) | 500,0 | (61,6%) | 1,500 | (21,1%) |
| 60° | A | 360,1 | (5,7%) | 112,7 | (18,7%) | 259,0 | (37,3%) | 0,524 | (22,2%) |
| | B | 343,1 | (7,0%) | 157,2 | (24,6%) | 197,2 | (58,8%) | 0,616 | (14,9%) |
| | C | 560,7 | (33,3%) | 274,8 | (13,9%) | 414,6 | (55,7%) | 1,020 | (31,6%) |

Na generalidade, as fibras da *Marca A* e *B* apresentaram propriedades micro-mecânicas semelhantes para as diferentes inclinações, como seria expectável, pois ambas apresentavam geometrias quase idênticas. A principal diferença foi observada para a energia dissipada até um deslizamento de 3 mm na série com um ângulo de inclinação de 30°. Dado que para a referida inclinação, as fibras da *Marca A* não fracturaram, contrariamente às da *Marca B*, o G_{3mm} foi aproximadamente 76% superior para a *Marca A*. Por outro lado, as fibras da *Marca C* apresentaram melhores propriedades micro-mecânicas como seria espectável, dado que estas possuem um maior diâmetro e comprimento da ancoragem. Numa estimativa grosseira, as distintas propriedades micro-mecânicas das fibras da *Marca C* para as inclinações das fibras estudadas foram entre 35 a 100% superiores comparativamente aos outros tipos de fibras. Contudo, apesar das fibras da *Marca C* apresentarem melhores propriedades

micro-mecânicas, não é linear que o comportamento mecânico à tracção de um betão reforçado com estas fibras seja melhor do que um compósito reforçado com fibras da *Marca A* e *B*. Na realidade, para a mesma percentagem volumétrica de fibras, um betão reforçado com fibras da *Marca C*, comparativamente com outro reforçado com fibras da *Marca A* ou *B*, possui um número inferior de fibras por unidade de volume. Para a mesma percentagem volumétrica de fibras, o número estimado de fibras da *Marca A* e *B* é aproximadamente 2,1 vezes superior ao número de fibras da *Marca C*. Com a diminuição do número de fibras por unidade de volume, a probabilidade das fibras intersectarem uma fenda activa, e por conseguinte se tornarem efectivas, também diminui. O comportamento à tracção do compósito, após fissuração, pode ser encarado como o somatório do comportamento ao arrancamento das fibras que intersectam uma fenda activa. A título ilustrativo, se for ponderado em termos relativos, as propriedades micro-mecânicas de uma fibra da *Marca C* (entre 35 a 100% superiores à *Marca A* e *B*), com o número de fibras estimado por unidade de volume (112% superiores num compósito reforçado com fibras da *Marca A* e *B*), pode concluir-se que há uma forte probabilidade de o comportamento à tracção de um compósito reforçado com fibras da *Marca C* ser pior do que o comportamento de um compósito reforçado com a mesma percentagem volumétrica de fibras da *Marca A* e *B*. Contudo, existem uma panóplia de factores que afectam a distribuição das fibras num elemento de volume, pelo que esta afirmação deverá ser corroborada com outro tipo de ensaios.

Adicionalmente, convém referir que para cada série foi observado uma elevada dispersão das respostas ao arrancamento de cada uma das fibras. Tendo em linha de conta o estudo geométrico previamente efectuado, tal seria esperado para as fibras da *Marca B* e *C*, visto que estas apresentaram valores dos coeficientes de variação significativamente elevados das suas dimensões geométricas (ver Quadros 1 e 2). Contudo, esta elevada dispersão foi igualmente verificada para as fibras da *Marca A*, apesar de estas apresentarem uma menor variação das suas dimensões geométricas. Inclusivamente, as fibras da *Marca A* com uma inclinação de 0° apresentaram uma maior dispersão na resposta ao arrancamento do que as fibras da *Marca B* e *C* com a mesma inclinação. Tal facto poderá estar relacionado com a composição de betão utilizada, considerando que o betão não foi confeccionado em laboratório e que foi utilizada uma composição convencional com baixa trabalhabilidade, consequentemente a elevada heterogeneidade e índice de vazios da mistura poderá favorecer a dispersão nos resultados e naturalmente ter influenciado os resultados obtidos. Pode então ser apontado que para as fibras e matriz estudadas, a heterogeneidade da matriz desempenha um papel mais importante na dispersão das respostas ao arrancamento, do que nomeadamente a variação nas dimensões geométricas das fibras. Em contrapartida, para fibras com ancoragens em forma de “gancho” arrancadas de uma matriz mais compacta, isto é, menor índice de vazios, como é o caso por exemplo de um betão auto-compactável, a variação nas respostas ao arrancamento é significativamente inferior à observado no presente trabalho, ver [8].

5. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi efectuado um estudo estatístico da variação das dimensões geométricas de três tipos de fibras com ancoragens em forma de “gancho”, e verificada a sua influência no comportamento da fibra ao arrancamento.

Na generalidade, as fibras da *Marca A* e *B*, ambas com o mesmo coeficiente de forma (80) e diâmetro (0,75 mm), apresentaram propriedades micro-mecânicas similares para os diferentes ângulos estudados. Contudo, a ligeira diferença observada de resistência à tracção entre a *Marca A* e *B* (aproximadamente 10% superior na *Marca A*) evitou a ruptura das fibras da *Marca A* para uma inclinação de 30°, influenciando consideravelmente a energia dissipada para a referida inclinação. Por sua vez, as fibras da *Marca C*, com um coeficiente de forma mais baixo (60) e diâmetro superior (1 mm), revelaram um melhor comportamento micro-mecânico. Contudo, o maior diâmetro das fibras da *Marca C* não evitou, em alguns casos, a ruptura da fibra durante o arrancamento, o que significa

que aumentando a secção da fibra não é uma condição unívoca para se evitar a ruptura da fibra, visto que as dimensões da ancoragem deverão ser igualmente consideradas.

As três marcas de fibras estudadas apresentaram uma variação relativamente pequena das suas propriedades geométricas. A *Marca A* exibiu uma menor variação da sua geometria, quando comparada com as fibras das outras marcas. Contudo, tal não influenciou a variação das respostas das fibras ao arrancamento, tendo sido obtida uma elevada dispersão no comportamento ao arrancamento dos três tipos de fibras. Para a composição de betão utilizada, a heterogeneidade da matriz desempenha um papel mais importante na dispersão dos resultados dos ensaios ao arrancamento do que propriamente a variação observada nas dimensões das fibras.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam agradecer o apoio concedido pela companhia Mota Engil, S.A. O primeiro autor deseja igualmente agradecer a bolsa de doutoramento SFRH/BD/18002/2004 concedida pela FCT.

REFERÊNCIAS

- [1] BANTHIA, N.; TROTTIER, J. – Concrete reinforced with deformed steel fibers, Part I: Bond-slip mechanisms. *ACI Materials Journal* 91 (5) (1994) 435-446.
- [2] NAAMAN, A. – Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites. *Journal of Advanced Concrete Technology* 1 (3) (2003) 241-252.
- [3] BRANDT, A. M. – On the optimal direction of short metal fibres in brittle matrix composites. *Journal of Materials Science* 20 (1985) 3835-3841.
- [4] NAAMAN, A. E. and NAJM, H. – Bond-slip mechanisms of steel fibers in concrete. *ACI Materials Journal* 88 (2) (1991) 135-145.
- [5] CHANVILLARD, G. – Analyse expérimentale et modélisation micromécanique du comportement des fibres d'acier tréfilées, ancrées dans une matrice cimentaire. Laboratoire Central de Ponts et Chaussées, 1993. Tese de Doutoramento.
- [6] ASTM A820-90 – Standard specification for steel fibres for fibre reinforced concrete. (American Concrete Institute, Detroit, USA, 1990).
- [7] MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. – Applied statistics and probability for engineers. John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 1994.
- [8] CUNHA, V.M.C.F.; BARROS, J.A.O.; SENA-CRUZ, J.M. – Pullout behaviour of hooked-end steel fibres in self compacting concrete. Report 07-DEC/06, Universidade do Minho, 2007.