

Geometric characterization of polymeric macrofibers

Caracterização geométrica de macrofibras poliméricas

A. R. E. CÁCERES^a
alan.estrada@usp.br

I. GALOBARDES^a
isaac.galobardes@usp.br

M. S. REBMANN^a
markusrebmann@usp.br

R. MONTE^a
renata.monte@usp.br

A. D. DE FIGUEIREDO^a
antonio.figueiredo@usp.br

Abstract

The geometric characteristics of synthetic macrofibers are important because they affect the behavior of fiber-reinforced concrete (FRC). Because there is a lack of specific, relevant publications in Brazil, the European standard EN14889-2:2006 was adopted as a reference to perform the characterization. Thus, an experimental plan was developed to assess the adequacy of testing procedures for the qualification of synthetic macrofibers for use in FRC. Two types of macrofibers were evaluated. The length measurement was performed using two methods: the caliper method, which is a manual measurement, and the digital image analysis method using the ImageJ software for image processing. These aforementioned methods were used to determine the diameter together with the density method, which is an indirect method that uses the developed length obtained by one of the previous methods. The statistical analyses revealed that the length results are similar regardless of the method used. However, the macrofibers must be pre-stretched to maximize the accuracy of caliper measurements. The caliper method for diameter determination has the disadvantage of underestimating the macrofiber cross-section because of the pressure applied by the load claws. In contrast, the digital image analysis method obtains the projected diameter in a single plane, which overestimate the diameter because the macrofibers are oriented with the pressure of the scanner cover. Thus, these techniques may result in false projections of the diameters that will depend on the level of torsion in the macrofibers. It was concluded that both the caliper method using previously stretched macrofibers and the digital imaging method can be used to measure length. The density method presented the best results for the diameter determination because these results were not affected by the method chosen to determine the length.

Keywords: fiber-reinforced concrete, synthetic macrofibers, geometric characterization, length measurement, diameter measurement, test method.

Resumo

As características geométricas das macrofibras poliméricas são importantes porque afetam o comportamento do concreto reforçado com fibras (CRF). Em vista da carência de publicações específicas no Brasil, adotou-se a norma europeia EN14889-2:2006 como parâmetro de referência para efetuar a caracterização. Assim, foi desenvolvido um plano experimental com o objetivo de avaliar a adequação de procedimentos de ensaio para a qualificação das macrofibras poliméricas destinadas ao CRF. Foram avaliados dois tipos de macrofibras. As medições do comprimento se efetuaram por dois métodos: o método do paquímetro, o qual consiste em uma medição manual, e o método de análise de imagens digitais, empregando o software ImageJ para processamento das imagens. Para a medição do diâmetro, além das metodologias já mencionadas, foi utilizado ainda o método da densidade, um método indireto que precisa do comprimento desenvolvido obtido por um dos métodos mencionados anteriormente. Da análise estatística se conclui que ambos os métodos de medição do comprimento são semelhantes e apresentam resultados equivalentes do ponto de vista estatístico. Porém, salienta-se que as macrofibras precisam ser previamente esticadas para ter maior exatidão nas medições com o paquímetro. Na determinação do diâmetro, o método do paquímetro tem a desvantagem de subestimar a seção transversal da macrofibra pela pressão que exercem as garras. Por outra parte, o método de imagens digitais apresenta a projeção do diâmetro em um único plano, com muita variação dimensional, porque as macrofibras são orientadas com a pressão da tampa do escâner. Assim, podem-se ter falsas projeções do diâmetro o que também depende do nível de torção das macrofibras. Conclui-se que o método do paquímetro, com o cuidado de esticar previamente as macrofibras, e o método das imagens digitais podem ser igualmente utilizados para medir o comprimento. Já para determinar o diâmetro da macrofibra, recomenda-se o método da densidade, cujos resultados não são influenciados pelo método escolhido para determinar o comprimento.

Palavras-chave: concreto reforçado com fibras, macrofibras poliméricas, caracterização geométrica, medição do comprimento, medição do diâmetro, método de ensaio.

^a Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

1. Introdução

O uso do concreto reforçado com fibras (CRF) é crescente no mercado internacional e brasileiro. Este tipo de tecnologia permite obter vantagens aplicativas importantes, pois o reforço é adicionado ao concreto no processo de mistura, reduzindo o número de etapas de aplicação. Além disso, o CRF possibilita minimizar as limitações tecnológicas do concreto simples, como a fragilidade e a baixa capacidade de deformação do concreto quando submetido a esforços de tração. No entanto, a eficiência do reforço de fibras depende de várias características, incluindo a geometria das mesmas (NAAMAN, 2003; PRUDENCIO Jr. et al, 2006; HTUT, 2010; ZILE, ZILE, 2013). Isto acaba gerando a necessidade de parametrização da geometria das macrofibras, o que já ocorre para as fibras de aço em diversas normas internacionais (ASTM A820/A820M: 2011; EN14889-1:2006) e brasileira (ABNT NBR 15575:2007).

A necessidade desta parametrização reside no fato de que a geometria da fibra acaba por afetar a sua capacidade de reforço (NAAMAN, 2003; FIGUEIRODO, 2008). A norma específica sobre macrofibras poliméricas (EN14889-2:2006) também exige a qualificação geométrica das referidas macrofibras e estabelece tolerâncias de variação das principais grandezas geométricas: comprimento desenvolvido, diâmetro equivalente e fator de forma. No entanto, dada a grande diversidade de formas geométricas que as macrofibras poliméricas podem apresentar, há uma série de procedimentos distintos que podem ser seguidos para as determinações dos valores medidos em relação aos declarados pelos fabricantes. Por esta razão, também é possível afirmar que a mensuração das características geométricas das macrofibras poliméricas é algo bem mais complexo do que ocorre para as fibras de aço, onde o uso do paquímetro é suficiente (FIGUEIRODO et al., 2008).

A norma europeia EN14889-2:2006 indica que o comprimento deve ser medido utilizando um dispositivo de medição de precisão mínima de 0,1 mm. Para a determinação do diâmetro equivalente, a situação é um pouco mais complexa. Assim, se um fabricante declara que a seção de sua macrofibra é circular, o ensaio deverá ser realizado por meio de um micrômetro com precisão de 0,001 mm se o diâmetro for maior que 0,3 mm; ou com um "equipamento ótico de medida", se o diâmetro for menor que esta medida. O problema ocorre com a omissão do nível de precisão da medida do diâmetro no caso do dispositivo ótico e, além disso, das dificuldades que são encontradas para a garantia da precisão da determinação do comprimento desenvolvido. Estes valores podem ser determinados com diferentes níveis de erro em função da qualidade da medida, cujo procedimento não é rigorosamente estabelecido nesta norma, a qual pode ser apontada como a única norma específica para macrofibras poliméricas destinadas ao reforço do concreto.

Como o Brasil não possui norma específica para macrofibras poliméricas e não há estudos específicos enfocando a avaliação geométrica das macrofibras poliméricas, deve-se ter em conta todos estes importantes aspectos para a sua futura normalização. A qualidade da caracterização geométrica também é fundamental em outras determinações muito importantes, como a caracterização do comportamento mecânico das macrofibras. Assim, para analisar a confiabilidade dos procedimentos de caracterização geométrica de macrofibras poliméricas para uso

no CRF, foi desenvolvido um estudo experimental com o objetivo de apontar métodos confiáveis para esta determinação.

2. Metodologia experimental

O estudo experimental procurou utilizar macrofibras disponíveis no mercado brasileiro e que fossem representativas da ordem de dificuldade que pode representar a caracterização geométrica das mesmas. A seguir são descritas as macrofibras utilizadas no estudo experimental, bem como os diferentes métodos de ensaio utilizados para as determinações.

2.1 Tipos de macrofibras

Duas macrofibras poliméricas disponíveis no mercado (denominadas A e B), compostas de polipropileno, foram avaliadas neste experimento. As características principais destas macrofibras, segundo as informações fornecidas pelos fabricantes, são apresentadas na Tabela 1. Note-se que o fator de forma das macrofibras é a relação entre o comprimento (L) e o diâmetro (D).

A macrofibra A é fornecida em formato de corda (Figura 1.a). Estas cordas podem ser decompostas em aproximadamente 20 feixes de macrofibras (Figura 1b), os quais apresentam múltiplos níveis de torção, gerando uma geometria complicada. Pode-se observar que cada feixe possui de um a três fios agrupados entre si, sendo este feixe dotado de seções transversais irregulares ao longo do comprimento. O fornecimento na forma de feixes enrolados como corda visa facilitar o procedimento de mistura do CRF, evitando aglomerados de macrofibras (embolamentos) associados àquelas de maior fator de forma (CECCATO, 1998). Assim, as cordas podem ser consideradas como fibras de baixo fator de forma que irão se dispersar na mistura com maior facilidade e, simultaneamente, propiciar uma dispersão dos filamentos de alto fator de forma. Dessa maneira torna-se possível aplicar uma macrofibra com elevado fator de forma final para propiciar melhor desempenho mecânico no comportamento pós-fissuração do CRF.

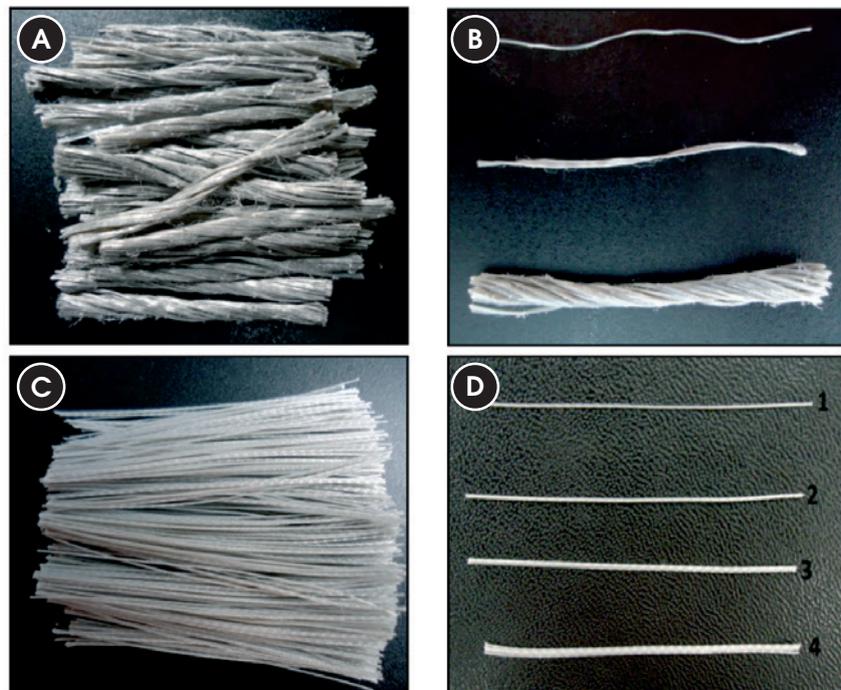
A macrofibra B (Figura 1.c) apresenta uma seção ovalada formada por feixes agrupados, mas com um formato distinto da macrofibra A. A Figura 1.d mostra os feixes individualizados da macrofibra B, os quais podem ser compostos por um, dois, três ou mais fios agrupados entre si. Esta macrofibra é produzida desta forma com a mesma finalidade que a macrofibra A, ou seja, pretende-se aumentar o fator de forma com mínimo impacto nas condições de mistura garantindo a homogeneização do material.

Tabela 1 – Características principais das macrofibras disponibilizadas pelo fabricante

Características	Macrofibra A	Macrofibra B
Densidade (g/cm ³)	0,91	0,90 - 0,92
Comprimento (mm)	54	58
Fator de forma	158	*

* Informação não declarada pelo fabricante.

Figura 1 - Amostra da macrofibra A a) e seus elementos separados b); amostra da macrofibra B c) e seus elementos separados d)

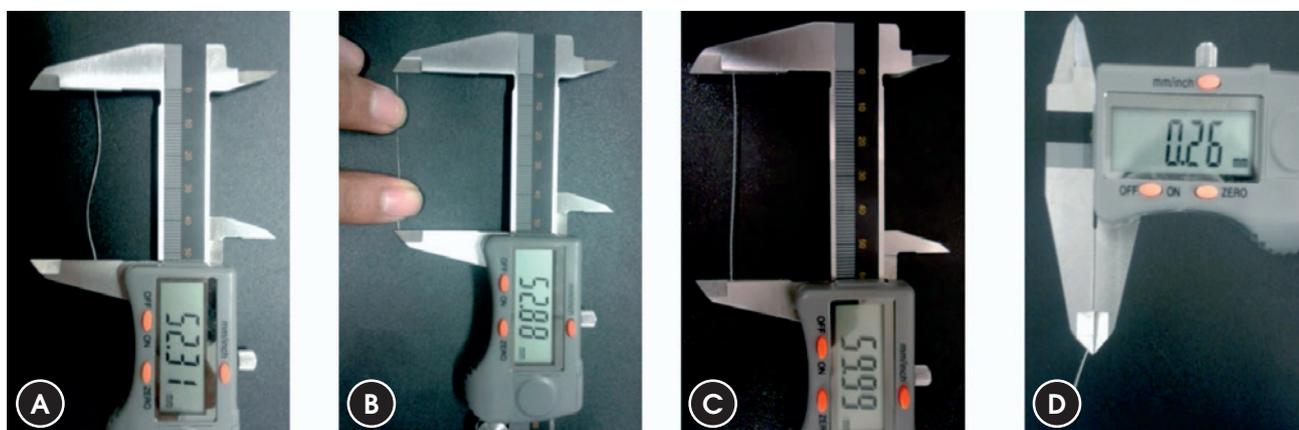


2.2 Ensaios

Para a determinação do comprimento das macrofibras foram considerados dois métodos básicos: o uso de um paquímetro e a análise de imagens digitalizadas do material. Para a determi-

nação do diâmetro equivalente das macrofibras, foram considerados três tipos de ensaio: paquímetro, as imagens digitais e o método da densidade. O método da densidade é uma concepção de determinação do diâmetro que depende da prévia mensuração do comprimento da macrofibra, o que pode ser realizado por

Figura 2 - Medição do comprimento da macrofibra A ondulada a); Medição do comprimento da macrofibra A esticada b); Medição do comprimento da macrofibra B c); Medição do diâmetro d)



um dos dois métodos anteriores. As medidas do diâmetro e do comprimento foram realizadas nos fios unitários já que são estes, e não o conjunto dos feixes, os que interferem no desempenho pós-fissuração do CRF. Um total de 60 macrofibras de cada um dos tipos considerados (A e B) foi caracterizado por cada um dos ensaios aqui indicados.

2.2.1 Paquímetro

O uso do paquímetro foi considerado devido ao fato de que a norma europeia EN14889-2:2006 prevê o uso deste instrumento para avaliar as características geométricas das macrofibras poliméricas. Empregou-se um paquímetro digital da marca Digimess, modelo 100_174BL com exatidão de 0,01 mm para a obtenção do diâmetro e do comprimento. Considerando a norma EN14889-2:2006 e tendo em conta a similitude nas configurações geométricas, ambas as macrofibras foram avaliadas como macrofibras Classe II.

Quanto ao comprimento, apenas um valor foi obtido em cada medição. Na macrofibra A, o formato ondulado que estas macrofibras apresentam pelo nível de torção, não permite uma correta determinação do comprimento desenvolvido na condição tal qual se encontram (Figura 2.a). Assim, optou-se por esticá-las previamente à medição de modo a se obter um valor mais acurado (Figura 2.b). Nas macrofibras B, ao fazer a medição do comprimento, não havia influência da ondulação, como é característica da macrofibra A (Figura 2.c). Por outro lado, qualquer que seja a macrofibra deve-se ter cuidado para evitar exercer pressão que cause arqueamento das mesmas quando do uso do paquímetro. No caso do diâmetro, para cada tipo de macrofibra se fez a medição em três pontos: nas extremidades e no ponto médio (Figura 2.d), sendo que em cada ponto se obteve duas medidas ortogonais da seção transversal.

2.2.2 Imagens digitais

Com o objetivo de se tentar minimizar a influência do fator humano no erro de determinação das dimensões das macrofibras, como o que ocorre no método do paquímetro, foi considerada uma metodologia baseada na análise de imagens digitais, a qual é amplamente utilizada em outras pesquisas (SHIN; CHO; KIM, 2008; DENG; KE, 2010; LI; YI; SHANG, 2012; ÖZNERGİZ et al., 2014). Ainda tem a vantagem de fazer a medição do comprimento desenvolvido e, assim, considerar as curvaturas ou tortuosidades das macrofibras. As imagens foram obtidas com um escâner de mesa marca HP, modelo Scanjet 8350.

Primeiramente as macrofibras foram dispostas sobre o escâner de forma individualizada, evitando que se tocassem durante a digitalização. Em seguida, as macrofibras foram cobertas cuidadosamente com uma folha de plástico negra e as luzes do ambiente foram desligadas, com o objetivo de garantir o contraste mais nítido possível entre as macrofibras e o fundo escuro. Utilizou-se uma resolução de 2400 ppi (pixels por polegada) durante a digitalização, obtendo-se uma imagem em tons de cinza, a qual foi gravada em formato PNG. Um exemplo de imagem gerada é apresentado na Figura 3.a. Posteriormente as imagens foram tratadas e analisadas com o software de imagens ImageJ, o qual é de domínio público, programado em Java e desenvolvido pelo 'National Institutes of Health' ("ImageJ", 2015).

O tratamento das imagens seguiu o seguinte processo: primeiro, se ajustou o contraste com a ferramenta 'Threshold' (Figura 3.b) com o objetivo de definir o limite entre a macrofibra e o fundo da imagem. Em seguida, as imagens foram transformadas em um sistema binário de cores, mediante a ferramenta 'Make Binary' definindo dois tipos de cores: preto e branco. Como se observa na Figura 3.c os pixels pretos representaram as macrofibras e os pixels brancos os vazios. Em seguida se utilizou a ferramenta 'Fill

Figura 3 - Imagens digitalizadas a); com ajuste do contraste b); e prontas para avaliação c)

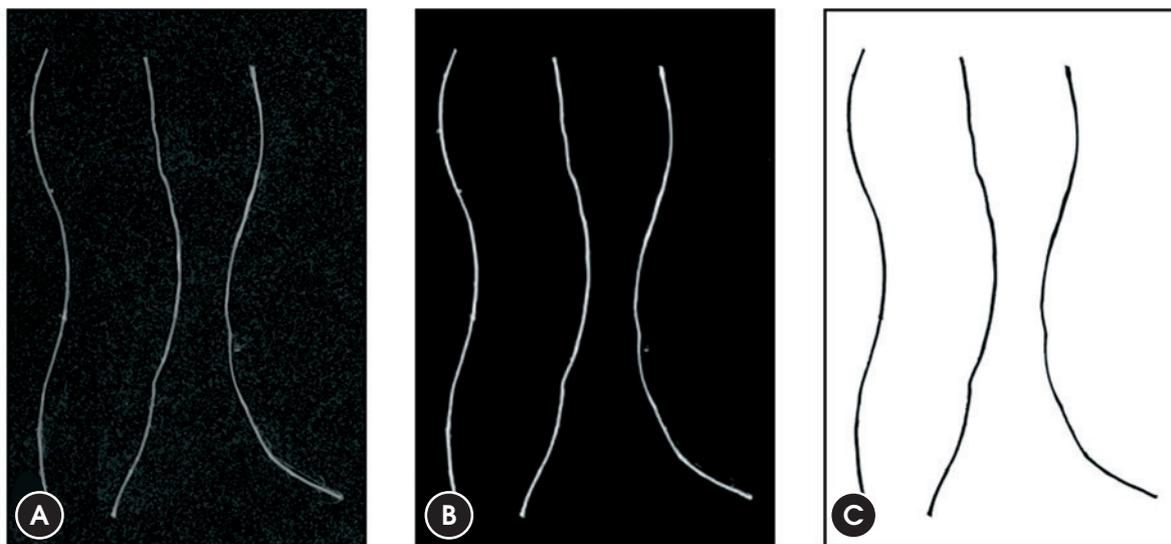
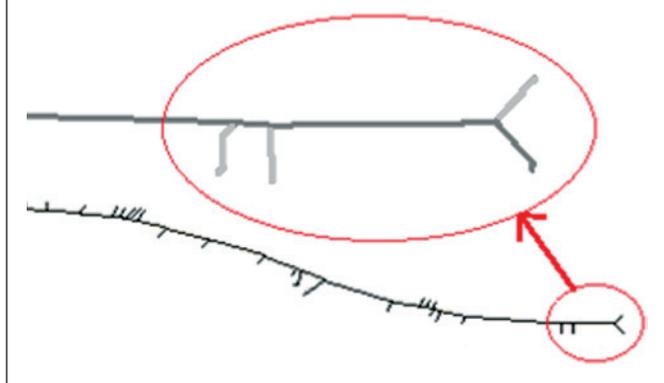


Figura 4 – Esqueleto da fibra. Note-se que no extremo da fibra se apresenta uma bifurcação



Holes' para preencher possíveis vazios presentes no interior das macrofibras, o que pode ocorrer em algumas situações devido a reflexos de luz ou devido a partes mais translúcidas da macrofibra. Também se suavizou o contorno das macrofibras empregando 3 etapas de erosão (eliminação de 1 pixel do contorno) seguidas de 3 etapas de dilatação (adição de 1 pixel ao contorno). Este processo, realizado com as ferramentas 'Erode' e 'Dilate', permite a eliminação de boa parte de ruídos da imagem, gerando contornos bem definidos, sem, no entanto afetar a área projetada. Em alguns poucos casos foi necessária ainda uma intervenção para pequenas correções da imagem, para eliminação de filamentos desfibrilados, que poderiam causar um aumento irreal da área projetada. Após este tratamento as macrofibras ficaram prontas para fazer a mensuração das dimensões (Figura 3.c). Para determinação do comprimento, inicialmente determinou-se

o eixo central da projeção digitalizada, usando a ferramenta 'Skeletonize'. Em seguida, com a ajuda do plugin "Analyze Skeleton (2D/3D)" (ARGANDA-CARRERAS, 2014), determinou-se o caminho mais longo neste esqueleto (trecho cinza escuro no detalhe ampliado da Figura 4). Note-se que foi necessária a realização de uma correção em ambos os extremos do caminho mais longo, devido ao fato de a definição do eixo central resultar em uma divisão em forma de "Y" nas extremidades (Figura 4). Além disto, ainda foi necessário desenvolver um método de suavização do caminho mais longo, uma vez que medidas de pixel em pixel podem sobre-estimar o real comprimento em até 8%. Por fim, o diâmetro da macrofibra foi obtido a partir da divisão da área projetada pelo comprimento total desenvolvido, sendo a área determinada pela ferramenta 'Analyze Particles...' do ImageJ. Finalmente, os resultados até então obtidos na forma de pixels, foram convertidos para milímetros, utilizando como fator de conversão 0,0106 mm/pixel. Este valor foi determinado mediante a digitalização de uma régua calibrada (régua do microscópio digital Hirox, modelo KH-7700).

2.2.3 Método da densidade

O método da densidade, que também é previsto pela norma europeia EN14889-2:2006, é um método indireto e permite obter o diâmetro médio da macrofibra utilizando a Equação 1. Esta equação apresenta a relação entre diferentes parâmetros das macrofibras: o diâmetro (D), o comprimento (L), a massa (m) e a densidade (ρ), sendo que as unidades dos parâmetros precisam ser compatíveis entre si.

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot m}{\pi \cdot \rho \cdot L}} \tag{1}$$

Tabela 2 – Resultados das medições com paquímetro

Macrofibra A					
	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D _e (mm)	L (mm)	λ
Média	0,24	0,24	0,24	54,07	249,66
DP	0,07	0,07	0,07	0,63	104,34
CV (%)	28,30	28,00	27,40	1,20	41,80
max	0,36	0,37	0,37	55,49	730,40
min	0,07	0,08	0,08	52,71	146,37
Macrofibra B					
	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D _e (mm)	L (mm)	λ
Mean	0.28	0.28	0.28	59.10	213.66
SD	0.02	0.02	0.02	0.70	17.91
CV (%)	7.60	8.10	7.10	1.20	8.40
max	0,31	0,32	0,31	60,02	282,86
min	0,22	0,20	0,21	58,09	189,66

Para a estimação do diâmetro por este método se necessita do comprimento desenvolvido da macrofibra obtido por algum dos métodos aqui já apresentados e analisados. A determinação da massa das macrofibras foi feita individualmente numa balança de precisão com exatidão de 0,0001 g, marca Metler-Toledo, modelo AB204-S. Finalmente, o valor da densidade das macrofibras foi avaliado mediante o uso de um picnômetro a gás hélio. Para este estudo, o picnômetro utilizado foi da marca Multipycnometer Quantachrome MVP 5DC e as estimativas foram obtidas a uma temperatura de 26 °C. Três amostras de macrofibras picadas, com cerca de 30 g cada uma, foram utilizadas para avaliar a densidade de ambas as macrofibras. Note-se que a densidade das macrofibras é útil também pelo fato de que as mesmas são controladas pelo volume incorporado no concreto (NAAMAN, 2003).

3. Resultados experimentais e análise

Os resultados experimentais obtidos para os valores de diâmetros e comprimentos das macrofibras são apresentados e analisados tomando-se como critério de avaliação as tolerâncias dimensionais especificadas pela norma EN14889-2:2006, específica para macrofibras poliméricas, de modo a se poder comparar os níveis de exigência estabelecidos para o material. Estes resultados são apresentados segundo os tipos de ensaio considerados (paquímetro, imagens digitais e método da densidade).

3.1 Paquímetro

A Tabela 2 apresenta o resumo dos resultados das características geométricas avaliadas com o paquímetro. Por restrições de espaço neste trabalho, foram omitidas as determinações individuais que foram obtidas em amostras de 60 macrofibras. Para as macrofibras A e B, os resultados apresentados são: a média dos diâmetros medidos nos extremos e na secção intermédia das macrofibras (D_1); a média dos diâmetros medidos nos mesmos pontos, mas numa secção ortogonal (D_2); o diâmetro equivalente (D_e) calculado como a média de D_1 e D_2 ; o comprimento (L) e, finalmente, o fator de forma (λ) ou relação entre o L e o D_e . Para todos os resultados médios, o desvio padrão (DP), o coeficiente de variação (CV), o valor máximo (max) e o mínimo (min) são também apresentados.

No caso da macrofibra A, o diâmetro nominal não foi fornecido pelo fabricante, então este dado foi calculado a partir dos valores nominais do comprimento (54 mm) e fator de forma (158) os quais sim foram disponibilizados. Assim se obteve o diâmetro nominal

igual a 0,34 mm. Para a macrofibra B, tanto o diâmetro equivalente quanto o fator de forma não foram declarados pelo fabricante. Portanto, não foi possível comparar as medições feitas com um valor nominal, assim não foi possível fazer as avaliações das tolerâncias dimensionais em relação ao diâmetro equivalente declarado. Ressalte-se que isto contraria a norma EN14889-2:2006 que indica estes valores como de declaração obrigatória por parte de fabricante ou de seu representante comercial.

Como se mencionou anteriormente, as macrofibras A e B foram classificadas como Classe II segundo a norma europeia EN14889-2:2006. Esta norma estabelece que a variação máxima do diâmetro individual e do fator de forma individual em relação ao valor nominal é de $\pm 5\%$. Já a variação máxima do valor do diâmetro médio e do fator de forma médio em relação aos valores nominais é de $\pm 5\%$ e $\pm 10\%$, respectivamente. Para o comprimento, a variação máxima do valor individual e do médio em relação aos valores nominais deve ser de $\pm 10\%$ e, $\pm 5\%$ respectivamente.

Ao se aplicar os critérios de tolerâncias dimensionais da norma europeia EN14889-2:2006 para a macrofibra A, observou-se que 15% das macrofibras têm um dos diâmetros individuais com valor maior a $\pm 50\%$ em relação ao valor nominal. Enquanto que o diâmetro médio se apresentou dentro da tolerância de $\pm 5\%$. Em relação ao fator de forma individual, 37% das macrofibras apresentaram valores que excediam a tolerância de $\pm 50\%$. O fator de forma médio também apresentou uma diferença superior à tolerância de $\pm 5\%$. No comprimento todas as macrofibras apresentaram valores dentro das tolerâncias exigidos para o valor individual em relação ao valor nominal. Da mesma maneira, a média do comprimento apresentou uma variação menor à tolerância de $\pm 5\%$. Conclui-se que a macrofibra A somente pode ser considerada em conformidade com as tolerâncias da norma europeia EN14889-2:2006 no que diz respeito ao comprimento.

No caso da macrofibra B, deve-se salientar que o fabricante não forneceu os valores nominais do diâmetro e do fator de forma. Portanto não foi possível ter um parâmetro de comparação para aplicar os critérios de tolerâncias dimensionais da norma europeia EN14889-2:2006. Assim, só se fez a avaliação para o caso do comprimento, da qual se conclui que todas as macrofibras cumpriram a especificação da norma, tanto no que se refere ao valor de comprimento individual quanto para o médio.

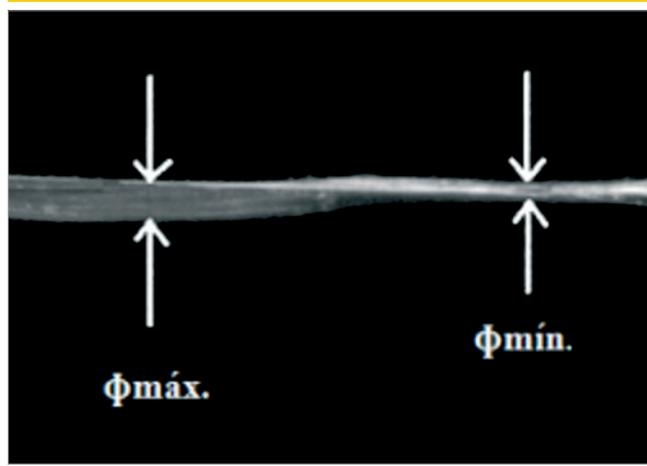
3.2 Imagens digitais

A Tabela 3 mostra os resultados das características geométricas das macrofibras avaliadas mediante as imagens digitais. Para as

Tabela 3 – Resultados das medições com imagens digitais

	Macrofibra A			Macrofibra B		
	L (mm)	D (mm)	λ	L (mm)	D (mm)	λ
Média	54,03	0,37	149,70	59,65	0,32	189,71
DP	0,76	0,07	26,05	0,80	0,03	15,28
CV (%)	1,40	17,90	17,40	1,30	10,00	8,10
max	55,66	0,56	234,11	60,88	0,43	215,69
min	52,57	0,23	96,25	58,29	0,27	141,21

Figura 5 - Variação do diâmetro ao longo do comprimento da macrofibra A devido à torção



macrofibras A e B os resultados apresentados são: o diâmetro médio medido da macrofibra em um único plano de acordo a projeção da imagem digitalizada (D); o comprimento desenvolvido (L); e finalmente, o fator de forma (λ) considerando a relação entre L e D. Para todos os resultados médios, o desvio padrão (DP), o coeficiente de variação (CV), o valor máximo (max) e o mínimo (min) são também apresentados.

Somente se considerou a imagem da macrofibra projetada em um único plano para se calcular o diâmetro pelo método de imagens digitais. Assim não se conseguiu uma avaliação mais exata, devido

Tabela 4 - Densidade das macrofibras utilizando picnômetro a gás hélio

Macrofibra	Amostra	ρ_1 (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)
A	1	0,937	0,930
A	2	0,934	0,930
A	3	0,921	0,930
B	1	0,939	0,935
B	2	0,934	0,935
B	3	0,933	0,935

ao fato da macrofibra ter uma seção transversal variável ao longo do comprimento. Isto acontece principalmente para o caso da macrofibra A que, em algumas partes, é mais fina e em outras partes mais grossa, de acordo com a torção que apresenta (Figura 5).

Considerando os critérios de tolerâncias dimensionais da norma europeia EN14889-2:2006, para o caso da macrofibra A se constatou que 3% das macrofibras apresentam resultados de diâmetro individual que não atendiam à tolerância de $\pm 50\%$ em relação ao valor nominal. O diâmetro médio se encontra fora da tolerância de $\pm 5\%$ em relação ao valor nominal. Ao considerar o fator de forma individual, todas as macrofibras estão dentro da tolerância máxima de $\pm 50\%$. E no caso do fator de forma médio, este valor também se encontra dentro da tolerância máxima permitida de $\pm 10\%$. Para o comprimento, todos os valores individuais das macrofibras estão dentro da tolerância de $\pm 10\%$. Igualmente o comprimento médio

Tabela 5 - Resultados das medições com o método da densidade

	Macrofibra A				Macrofibra A			
	Mass (g)	L_1 (mm)	D_e (mm)	λ	L_p (mm)	D_e (mm)	λ	
Média	0,0043	54,03	0,33	171,34	54,07	0,33	171,67	
DP	0,0015	0,76	0,06	31,56	0,63	0,06	32,65	
CV (%)	35,3	1,40	17,50	18,40	1,20	17,60	19,00	
max	0,0103	55,66	0,51	254,40	55,49	0,51	265,76	
min	0,0017	52,57	0,21	105,36	52,71	0,21	104,70	

	Macrofibra B				Macrofibra B			
	Mass (g)	L_1 (mm)	D_e (mm)	λ	L_p (mm)	D_e (mm)	λ	
Média	0,0046	59,65	0,32	185,74	59,10	0,32	183,18	
DP	0,0004	0,80	0,01	6,16	0,70	0,01	6,49	
CV (%)	8,8	1,30	4,00	3,30	1,20	4,10	3,50	
max	0,0057	60,88	0,36	200,09	60,02	0,36	196,39	
min	0,0038	58,29	0,30	167,74	58,09	0,30	165,98	

está dentro da tolerância de $\pm 5\%$ em relação ao valor nominal. Conclui-se que a macrofibra A só se enquadra nas tolerâncias da norma europeia EN14889-2:2006 no que diz respeito ao comprimento.

No caso da macrofibra B, já que não se têm os dados do fabricante tanto do diâmetro como do fator de forma, só foram avaliados os resultados do comprimento de acordo a norma EN14889-2:2006. Dessa forma todas as macrofibras cumprem com as exigências da norma, tanto no que se refere ao valor do comprimento individual como quanto ao médio.

3.3 Método da densidade

Primeiramente, os resultados obtidos para a densidade das macrofibras por meio do ensaio do picnômetro a gás hélio são apresentados na Tabela 4. Apresenta-se a densidade de cada amostra (ρ_p), e finalmente, a densidade média para cada uma das macrofibras (ρ). Estes resultados são fundamentais para a determinação das características geométricas das macrofibras mediante o método da densidade.

A Tabela 5 mostra os resultados das características geométricas das macrofibras A e B avaliadas com o método da densidade. Os resultados apresentados são: as massas; o comprimento desenvolvido pelo método de imagens digitais (L_i); o comprimento pelo método do paquímetro (L_p); o diâmetro equivalente (D_e) calculado mediante a Equação 1, e o fator de forma (λ) calculado considerando os dois comprimentos L_i e L_p , respectivamente. Para todos os resultados médios, o desvio padrão (DP), o coeficiente de variação (CV), o valor máximo (max) e o mínimo (min) são também apresentados.

Os valores médios da massa para cada macrofibra são de uma ordem de grandeza em relação à precisão da balança (0,0001 g). As massas da macrofibra A têm um intervalo de variação de 0,0017 g a 0,0103 g, com um coeficiente de variação da ordem de 35,3%, fato que demonstra que ao separar os fios individuais dos feixes, se apresentam fios de seção variável com muita variação de massa entre uma macrofibra e outra. No caso da macrofibra B, as massas têm uma faixa de variação de 0,0038 g a 0,0057 g, com um coeficiente de variação de 8,8%, portanto uma menor variação entre as massas.

Pelo método da densidade o diâmetro médio equivalente de cada macrofibra foi calculado diretamente. A faixa de variação deste diâmetro foi semelhante utilizando tanto o comprimento pelo método de imagens digitais (L_i), como pelo método do paquímetro (L_p); ficando entre 0,21 mm e 0,51 mm, com valor médio de 0,33 mm para a macrofibra A, e entre 0,30 mm e 0,36 mm, com valor médio de 0,32 mm, para a macrofibra B. Isto foi comprovado ao realizar a análise pelo teste 't' pareado, tanto para a macrofibra A como para a macrofibra B, na qual a diferença dos valores do diâmetro médio é praticamente zero, com um nível de confiança de 95%. Considerando o comprimento desenvolvido pelo método de imagens digitais, os valores do fator de forma foram da ordem de 171,34 e 185,74 para as macrofibras A e B, respectivamente. No entanto, ao considerar as medidas de comprimento pelo método do paquímetro, houve uma ligeira variação do fator de forma, obtendo-se valores agora de 171,67 e 183,18 para as macrofibras A e B, respectivamente.

Considerando as tolerâncias da norma EN14889-2:2006, todos os diâmetros individuais das macrofibras tipo A estão dentro da

tolerância máxima de $\pm 50\%$, ao se comparar com o valor nominal. Da mesma maneira, o valor do diâmetro médio se encontra dentro da tolerância de $\pm 5\%$. Já para o caso do fator de forma individual, constatou-se que 8% das macrofibras se encontram fora da tolerância de $\pm 50\%$ e, no caso do fator de forma médio, este valor se encontra dentro da tolerância máxima de $\pm 10\%$ ao comparar com o valor nominal. Portanto, a macrofibra A não cumpre com a norma europeia, já que 8% das macrofibras não ficaram dentro da tolerância do fator de forma individual.

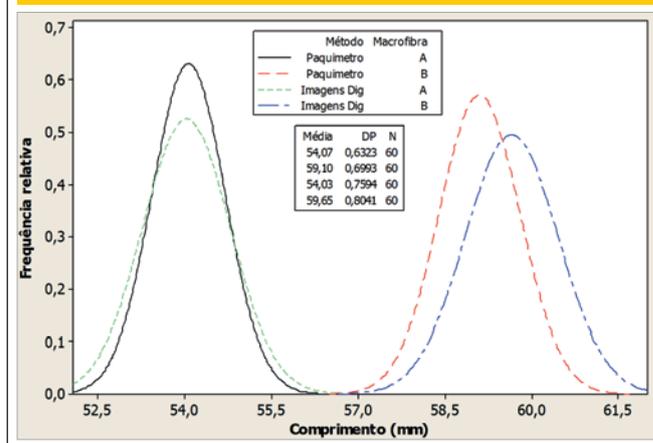
No que diz respeito à macrofibra B, não foi possível analisar se o diâmetro obtido pelo método da densidade atende aos critérios de tolerâncias dimensionais estabelecidos pela norma europeia EN14889-2:2006, uma vez que o diâmetro nominal não foi declarado pelo fabricante. Ressalte-se que este dado é de fato importante e que deve de ser exigida a sua declaração por parte do fabricante.

4. Análise comparativa dos métodos

Apresenta-se aqui uma análise comparativa dos resultados de diâmetro e comprimento das macrofibras obtidos pelos distintos métodos de ensaio. Além disso, os resultados experimentais são comparados com os dados disponibilizados pelos fabricantes. Primeiramente, são apresentados os resultados do comprimento obtidos com o paquímetro e com as imagens digitais e, finalmente, os resultados experimentais dos diâmetros segundo os três ensaios realizados (paquímetro, imagens digitais e densidade).

A análise estatística foi feita com ajuda do software MINITAB 17. Para avaliar se os resultados seguem a distribuição normal aplicou-se o teste de normalidade Anderson-Darling, a um nível de confiança de 95%. Os resultados também foram analisados quanto ao seu grau de distorção em relação a uma distribuição simétrica, através do cálculo do coeficiente de assimetria. Quando esse coeficiente resulta próximo de zero, a distribuição pode ser considerada simétrica. Para coeficientes de assimetria positivos ou negativos, a distribuição é considerada assimétrica à direita ou à esquerda, respectivamente. Como critério para detecção dos valores espúrios foi utilizado o gráfico de caixa. Neste método os

Figura 6 - Curvas de distribuição do comprimento das macrofibras A e B, respectivamente



valores espúrios são aqueles compreendidos fora dos limites superior e inferior da caixa (MONTGOMERY; RUNGER, 2004).

4.1 Comparação dos comprimentos

A seguir são apresentadas as curvas de distribuição dos resultados obtidos do comprimento para cada tipo de macrofibra (Figura 6). Mostram-se as distribuições tanto pelo método do paquímetro, quanto pelo método de imagens digitais.

A análise descritiva dos dados de comprimento indicou que para a macrofibra A, a distribuição de resultados de ambos os métodos seguem uma distribuição normal e não se verificou a existência de valores espúrios. Com um nível de confiança de 95%, a média do comprimento pelo método do paquímetro ficou entre 53,09 mm e 54,02 mm, e pelo método de imagens digitais ficou entre 53,83 mm e 54,22 mm. Ambos os intervalos incluem também o comprimento declarado pelo fabricante de 54 mm.

Ao fazer a análise de distribuição de dados, no caso da macrofibra B, os resultados indicaram não normalidade, mostrando claramente duas populações distintas, independentemente do método (Figura 7.a e 7.b). Atribui-se a existência de duas populações dis-

tintas à forma como foram coletadas as amostras. As macrofibras são fornecidas pelo fabricante na forma de grandes tarugos (grupo de macrofilamentos, Figura 7.c) e a amostragem empregada escolheu de maneira aleatória dois destes tarugos de um universo de cerca de 100 tarugos que usualmente vêm em uma mesma embalagem. A amostragem final consistiu na escolha aleatória de trinta macrofibras do primeiro tarugo e outras trinta do segundo tarugo. A existência comprovada de duas populações demonstra a variabilidade de produção, especificamente no corte dos tarugos. Sendo assim, a amostragem feita da maneira descrita não pode ser considerada como adequada e, por isso, se recomenda abrir todos os tarugos colhidos em uma embalagem, misturar bem as macrofibras soltas e, após isso, coletar aleatoriamente as macrofibras para análise. Apesar disso, foi possível concluir que o comprimento de ambos os grupos está acima da média no que se refere ao comprimento declarado pelo fabricante que é de 58 mm. Com um nível de confiança de 95% o valor médio se encontra entre 58,92 mm e 59,28 mm pelo método do paquímetro, e entre 59,44 mm e 59,86 mm pelo método de imagens digitais.

Mediante a análise teste 't' pareado ao fazer a comparação do comprimento pelo método do paquímetro com o método de ima-

Figura 7 - Histograma de distribuição do comprimento da macrofibra B, pelo do paquímetro a); e pelo método de imagens digitais b); tarugo ou grupo de macrofibras tipo B c)

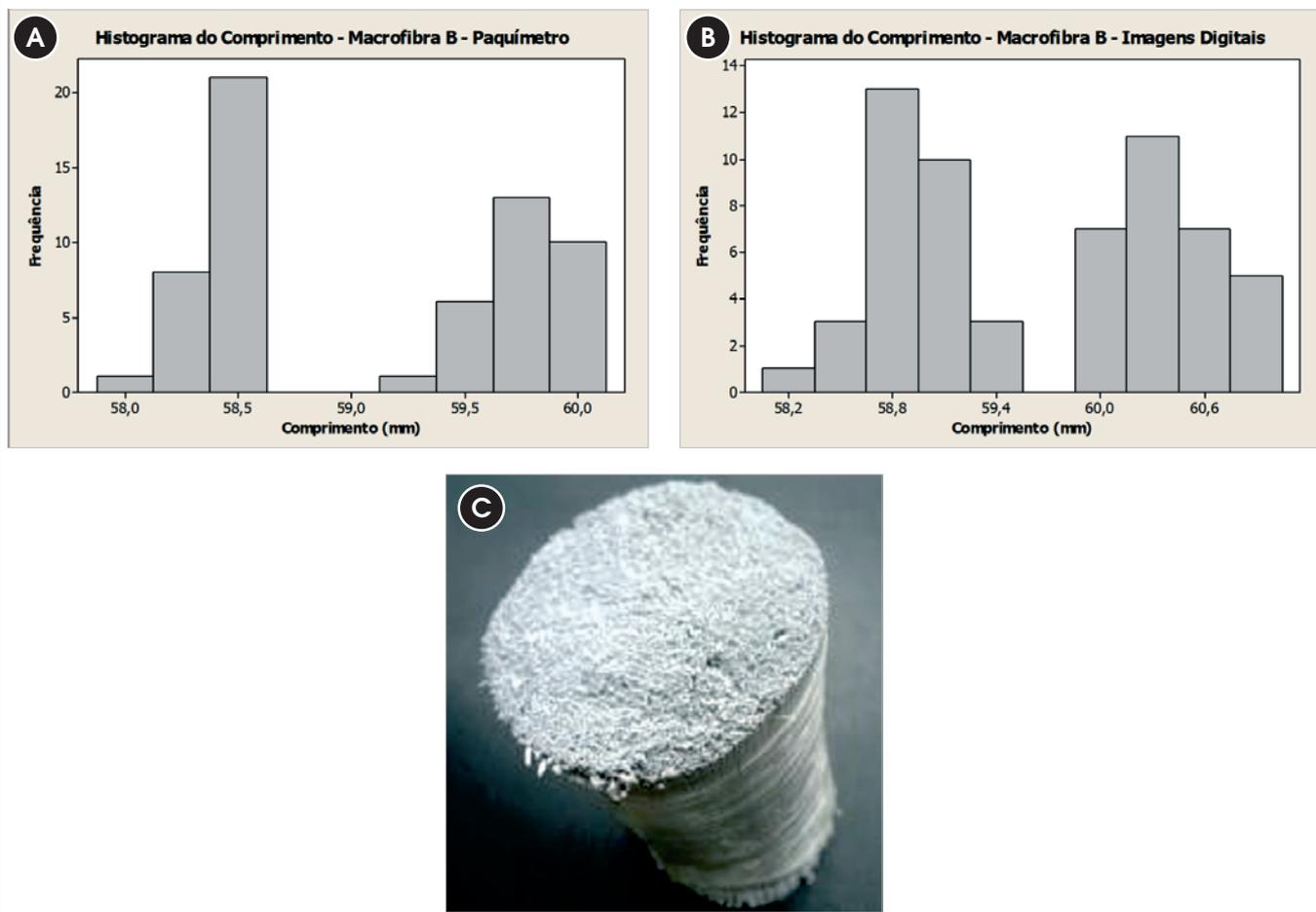
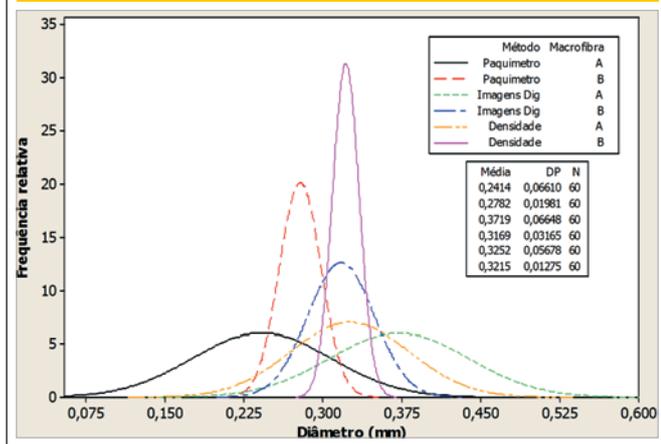


Figura 8 – Curvas de distribuição do diâmetro das macrofibras A e B pelos três métodos



gens digitais da macrofibras A, os resultados não apresentam diferenças significativas. Observa-se que a diferença das médias é praticamente zero. Este valor se encontra com um 95% de confiança entre -0,11 mm e 0,18 mm. O que confirma que ambas as metodologias podem ser consideradas como equivalentes. Isto ocorreu devido a fato de que as macrofibras A foram esticadas previamente à realização da medição com paquímetro (Figura 2.b), aproximando-se assim os valores medidos entre os diferentes métodos.

No caso da macrofibras B ao fazer a mesma análise comparativa mediante o teste 't' pareado, houve uma ligeira variação entre os métodos. A diferença das médias agora se encontrou no intervalo de -0,62 mm e -0,48 mm. Ambos os valores serem negativos confirmam que o comprimento da macrofibras B pelo método do paquímetro é sempre menor ao método de imagens digitais. Foi constatado então que as médias são significativamente diferentes com um nível de 95% de confiança. É possível que isto decorra do fato de durante a medição com paquímetro, estas macrofibras terem sido medidas diretamente (sem esticar) o que ocasionou uma ligeira diminuição do comprimento por menor que tenha sido a pressão das garras do paquímetro (Figura 2.c). A princípio, como estas macrofibras não eram onduladas como as anteriores, julgou-se desnecessário esticá-las para realizar a medida. No entanto, esta diferença a menor para o resultado do paquímetro demonstra que esta é uma boa prática mesmo quando a macrofibras não apresenta tortuosidades.

4.2 Comparação dos diâmetros

Primeiramente é apresentada a análise estatística mediante a prova teste 't' pareado do diâmetro pelo método da densidade. Isto se fez com o objetivo de comparar os valores deste diâmetro encontrados utilizando o comprimento obtido pelo paquímetro ou pela análise de imagens digitais. Para a macrofibras A, os resultados não apresentam diferenças significativas. Observa-se que a diferença das médias é praticamente zero. Este valor se encontra com um 95% de confiança entre -0,000382 mm e 0,000457 mm. O

que confirma que ambos os métodos de determinação dos comprimentos podem ser utilizados para calcular o diâmetro.

No caso da macrofibras B fazendo a mesma análise teste 't' pareado, houve uma ligeira variação no diâmetro pelo método da densidade. A diferença das médias também é próxima à zero, mas se encontra no intervalo de -0,001706 mm e -0,001318 mm, com um 95% de confiança. A média do diâmetro utilizando o comprimento obtido pelo paquímetro é ligeiramente superior ao comprimento pelo método de imagens digitais, apesar de serem estatisticamente equivalentes. Como já discutido, isto se deve ao fato das macrofibras B terem sido encurtadas levemente durante a medida, por não terem sido esticadas manualmente. Isto leva a concluir uma vez mais que esticar a macrofibras no momento da medição de seu comprimento com o paquímetro é uma prática muito importante, mesmo quando as macrofibras não sejam onduladas. Pelo exposto, para fins da presente análise comparativa se utilizará o diâmetro pelo método da densidade em função do comprimento desenvolvido pelo método de imagens digitais para ambas as macrofibras.

A seguir são apresentadas as curvas de distribuição dos resultados obtidos do diâmetro para cada tipo de macrofibras (Figura 8) segundo os distintos métodos apresentados anteriormente: paquímetro, imagens digitais e densidade.

Fazendo a análise descritiva da distribuição dos diâmetros da macrofibras A pelo paquímetro, verificou-se uma assimetria, não confirmando a distribuição normal. No entanto, não apresentou qualquer valor espúrio e os valores da média estão bem baixos em comparação aos outros dois métodos. Pelo método de imagens digitais obteve-se a confirmação de uma distribuição normal e a mesma apresentou um único valor espúrio. No método da densidade não se verificou uma distribuição normal, e se apresentam cinco valores espúrios uma vez que este método depende da medição da massa da macrofibras, a que apresenta também variabilidade por si só. Esta variação também pode ser creditada à possível variação de seção das macrofibras no momento da separação dos feixes sendo que algumas podem ter ficado mais grossas que outras.

Figura 9 – Posições prováveis a); pouco prováveis b); e improváveis c); para a medição do diâmetro equivalente de uma macrofibras com seção elíptica

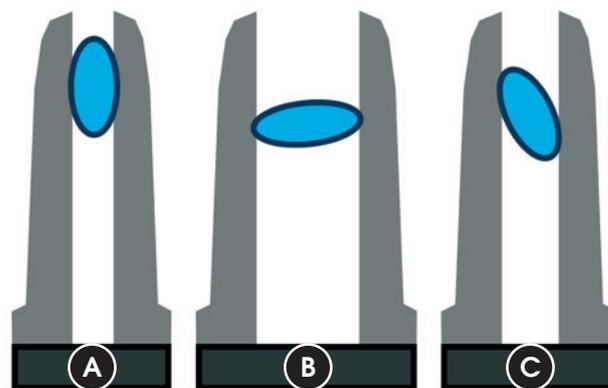
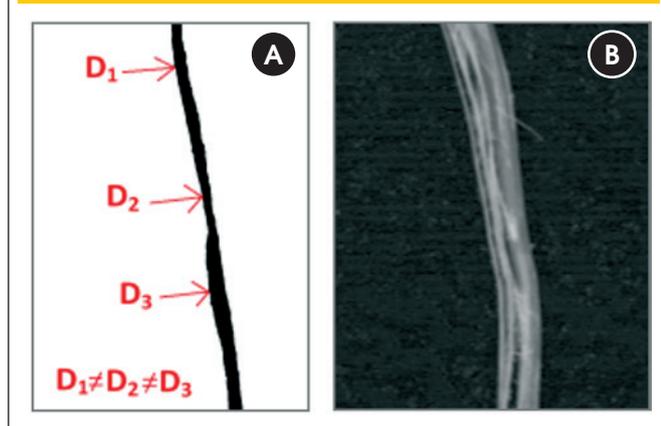


Figura 10 - Variação do diâmetro projetado da macrofibra pelo método de imagens digitais a); seção da macrofibra com desfibrilamento que pode ser considerado como uma sobre-estimação do diâmetro b)



No caso da macrofibra B (Figura 8) a distribuição do diâmetro não deu normalidade, também apresenta assimetria e com valores espúrios para os três métodos. Isto comprova que a macrofibra B também apresenta uma seção irregular dentro da mesma macrofibra e, principalmente, diferenças entre uma macrofibra e outra. O fato de existirem duas populações bem definidas também afeta os distintos métodos de análise aplicados neste estudo.

Para a macrofibra A com um nível de confiança de 95%, a média do diâmetro pelo método do paquímetro ficou entre 0,22 mm e 0,26 mm, pelo método de imagens digitais ficou entre 0,35 mm e 0,39 mm, e pelo método da densidade ficou entre 0,31 mm e 0,34 mm. O diâmetro nominal de 0,34 mm unicamente encaixa-se dentro do intervalo de variação do diâmetro médio, pela densidade. No caso da macrofibra B com um nível de confiança de 95%, a média do diâmetro pelo método do paquímetro ficou entre 0,27 mm e 0,28 mm, pelo método de imagens digitais ficou entre 0,31 mm e 0,33 mm, e pelo método da densidade ficou entre 0,3153 mm e 0,3218 mm. Não obstante, não foi possível comparar estes valores com um diâmetro nominal, já que este dado não foi declarado pelo fabricante.

Comparando a distribuição do diâmetro pelos três métodos para ambas as macrofibras (Figura 8), os resultados obtidos pelo paquímetro foram menores que os obtidos pelos outros dois métodos. Isto pode ser creditado, em parte, à diminuição do diâmetro pela pressão que exercem as garras do paquímetro, uma vez que é natural a tendência do operador de pressionar a amostra quando da medição. Além disso, o paquímetro apresenta a tendência de orientar a medida pela menor dimensão da seção transversal quando a macrofibra tem um formato elíptico, conforme ilustrado na Figura 9. Isto gera uma tendência de subestimação do valor médio do diâmetro da macrofibra quando mensurado por este método. Por mais que se exija uma elevada precisão do equipamento utilizado na medição (como o micrometro de precisão de 0,001 mm recomendado pela norma europeia EN14889-2:2006) sempre se estará subestimando a seção devido ao direcionamento preferencial da macrofibra.

No caso da macrofibra B pode-se verificar que os métodos de imagens digitais e da densidade praticamente resultaram no mesmo valor médio, apresentando, porém, diferente grau de dispersão dos resultados. Assim, outra diferença que existe entre os distintos métodos é o grau de dispersão. Observa-se que o método de imagens digitais apresenta a maior dispersão, além de apresentar os maiores valores médios. O que pode explicar este aumento de valor médio é o fato de que as macrofibras têm uma seção ovalada e, assim, pode haver a tendência de uma superestimação do diâmetro médio durante o processo de digitalização da imagem. Como as macrofibras são comprimidas pela tampa do escâner, é possível que ocorra uma orientação pela maior dimensão, numa condição oposta à do paquímetro e que superestima o diâmetro médio. Aliado ao nível de torção da macrofibra isto resulta em projeções com diâmetros variáveis (Figura 10.a).

Além disso, podem ser consideradas como parte da projeção as regiões com pouco contraste nas bordas da macrofibra. Quando o contraste entre a macrofibra e o fundo não é bem definido o processo de tratamento da imagem pode gerar uma ampliação do diâmetro. Outro fator que pode afetar o resultado é o fato de algumas macrofibras apresentarem regiões de desfibrilamento de sua estrutura (Figura 10.b) o que pode ser interpretado como uma macrofibra fechada de área de projeção durante o tratamento das imagens, levando a uma superestimação de seu diâmetro.

O teste de igualdade de variância para a macrofibra A indicou que pelos três métodos os valores das variâncias podem ser considerados estatisticamente iguais, com um nível de confiança de 95% pelo teste 't'. No caso da macrofibra B, ao fazer o teste de igualdade de variância, se observa que os métodos do paquímetro e de imagens digitais têm uma ampla faixa de variação, ao contrário do que acontece com o método da densidade que tem uma menor variação. Também se observa que as três metodologias estão um pouco afastadas em termos de variância e as mesmas foram consideradas estatisticamente distintas pelo teste 't'.

5. Conclusões

As seguintes conclusões podem ser extraídas dos resultados deste trabalho:

- Referente ao comprimento, pode-se considerar os critérios da norma EN14889-2:2006 para a avaliação das macrofibras poliméricas. A variação deste parâmetro é muito baixa, graças ao nível de controle de produção das macrofibras que garante um corte homogêneo de modo a manter o comprimento uniforme. Um bom procedimento de amostragem, no entanto é necessário, para evitar induções de variação de resultados, como o que foi observado pela alteração de valor em função do tarugo escolhido. A conformidade do comprimento é importante, pois o comprimento da fibra deve ser compatibilizado com o diâmetro máximo do agregado para propiciar boas condições de reforço no CRF (FIGUEIREDO, 2011). Ressalta-se que para fazer as avaliações das tolerâncias dimensionais é essencial que o fabricante declare os valores nominais do comprimento, diâmetro e fator de forma, o que nem sempre acontece.
- Na determinação do comprimento, para a macrofibra A, os métodos do paquímetro e de imagens digitais conduziram a resultados estatisticamente iguais, com um nível de confiança de 95%. Para que isto ocorresse foi necessário o cuidado de es-

ticar as macrofibras para a realização da medição pelo paquímetro, evitando que as mesmas se curvassem pelo efeito da pressão do instrumento. Isto acabou por aproximar ambas as medições em relação ao comprimento desenvolvido. No caso da macrofibra B, para a qual não se adotou o mesmo procedimento de esticar as macrofibras, obteve-se uma pequena diferença entre os resultados, mas ainda assim significativa, sendo que os valores obtidos pelo método das imagens digitais foram maiores que o do paquímetro. Isto demonstra a independência do método das imagens digitais em relação aos procedimentos manuais do operador.

- Em vista do anteriormente mencionado, se houver uma operação de medição cuidadosa da macrofibra com o método do paquímetro, ambos os métodos de determinação do comprimento podem ser considerados como equivalentes. Neste sentido, apesar do método de análise de imagens digitais requerer maior trabalho para a sua implementação inicial, o mesmo pode gerar no futuro sistemas automatizados de grande velocidade de análise em sistemas contínuos de amostragem. Por outro lado, será difícil utilizá-lo quando houver a necessidade do controle individualizado das macrofibras.
- O cálculo do diâmetro pelo método da densidade é o mais recomendável para obter o valor do diâmetro médio. Este método não é afetado pela forma como as imagens são obtidas ou processadas, como acontece no método das imagens digitais, nem é afetado pela pressão que exercem as garras do paquímetro, como acontece no caso da medição manual com paquímetro. Não obstante, o método da densidade necessita de uma balança de precisão adequada para determinar a massa das macrofibras, e de um picnômetro a gás hélio para a densidade. Na determinação do diâmetro pela densidade, ao utilizar tanto o comprimento pelo paquímetro como pelas imagens digitais, ambos os diâmetros resultam em valores estatisticamente iguais, com um nível de confiança de 95%, demonstrando a robustez do método. Salienta-se que a determinação do diâmetro, ou da área média da seção transversal por consequência, é extremamente importante devido ao papel que esse parâmetro tem na avaliação do comportamento mecânico da macrofibra.
- É importante estabelecer métodos de caracterização geométrica de macrofibras poliméricas que podem ser aplicados no controle corriqueiro de qualidade, uma vez que as informações dos fabricantes podem não ser suficientes ou até mesmo incorretas, e o usuário não pode se restringir a confiar apenas nesta fonte de informação. Ressalte-se que nem todos os resultados foram compatíveis, ou seja, uma fibra pode ser considerada conforme por um método e não conforme caso outro método de medida de suas dimensões seja utilizado. Isto demonstra a importância de se ter métodos confiáveis de medida estabelecidos nas futuras normas de especificação de macrofibras poliméricas.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo apoio prestado através da bolsa de pós-doutorado para o segundo autor (Processo 2014 / 24410-6) e da bolsa de doutorado fornecida para o terceiro autor (processo 2012 / 21134-2).

Os autores agradecem a Fundação para o Desenvolvimento Tec-

nológico de Engenharia projeto (USP / BRASKEM) Módulo 1: Caracterização mecânica macrofibras de polipropileno.

7. Referências

- [1] AMERICA SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM A820/A820M: Standard specification for steel fiber for fiber-reinforced concrete, 2011.
- [2] ARGANDA-CARRERAS, I. AnalyzeSkeleton. Available from: <http://fiji.sc/AnalyzeSkeleton>. Accessed on: 26 fev. 2015.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 15530: fibras de aço para concreto [NBR 15530: steel fibers for concrete]. Rio de Janeiro, 2007.
- [4] CECCATO, M. R. Estudo da trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras de aço [Study on the workability of steel fibers-reinforced concrete]. 1998. Dissertation (Masters). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 1998.
- [5] DENG, Z.; KE, WE. A new measuring method of wool fiber diameter based on image processing. 2nd International Conference on Signal Processing Systems (ICSPS), Jul. 2010, [S.l.: s.n.], Jul. 2010. p. V2–587–V2–590.
- [6] EN 14889-1. Fibras for concrete – Part 1: Steel fibres – Definitions, specifications and conformity. European Standard, 2006.
- [7] EN 14889-2. Fibras for concrete – Part 2: Polymer fibres – Definitions, specifications and conformity. European Standard, 2006.
- [8] FIGUEIREDO, A. D. A nova especificação brasileira das fibras de aço para concreto [The new Brazilian specification for steel fibers for concrete]. In: 50o. Congresso Brasileiro do Concreto - IBRACON 2008, 2008, Salvador. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2008.
- [9] FIGUEIREDO, A. D.; CHAMA NETO, P. J.; FARIA, H. M. A nova normalização brasileira sobre fibras de aço [The new Brazilian standard on steel fibers]. *Concreto e Construção*. , v.XXXVI, p.67 - 76, 2008.
- [10] FIGUEIREDO, A. D. Concreto com fibras [Concrete with fibers]. In: *CONCRETO: Ciência e tecnologia*. 2ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2011, v.2, p. 1327-1365.
- [11] HTUT TNS. Fracture processes in steel fibre reinforced concrete. PhD Dissertation, School of Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales, Sydney, 2010.
- [12] IMAGEJ. Available from: <http://imagej.nih.gov/ij/>. Accessed on: 24 fev. 2015.
- [13] LI, S.; YI, H.; SHANG, S. Measurement of diameter and scale of cashmere fibers by computer image analysis. *Journal of Fiber Bioengineering and Informatics*, v. 5, n. 1, p. 95–103, 5 mar. 2012.
- [14] MONTGOMERY, D.; RUNGER, G. Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería. 2. ed., México, D.F.: Limusa Wiley, 2004.
- [15] NAAMAN, A. Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*, v. 1, n. 3, p. 241–252, 2003.
- [16] OZNERGIZ, E.; KIYAK, Y. E.; KAMASAK, M. E.; YILDIRIM, I. Automated nanofiber measurement in SEM images using a robust image analysis method. Volume 2014, Article

ID 738490, 6 pages. Journal of Nanomaterials, v. 2014, p. e738490, 6 nov. 2014.

- [17] PRUDENCIO Jr., L.; AUSTIN, S.; JONES, P.; ARMELIN, H.; ROBINS, P. Prediction of steel fibre reinforced concrete under flexural from an inferred fibre pull-out response. *Materials and Structures*, v. 39, n. 6, p. 601–610, 16 jun. 2006.
- [18] SHIN, E. H.; CHO, K. S.; KIM, M.H.S. Determination of electrospun fiber diameter distributions using image analysis processing. *Macromolecular Research*, v. 16, n. 4, p. 314–319, 1 jun. 2008.
- [19] ZĪLE, E.; ZĪLE, O. Effect of the fiber geometry on the pull-out response of mechanically deformed steel fibers. *Cement and Concrete Research*, v. 44, p. 18–24, fev. 2013.