ALAN RENATO ESTRADA CÁCERES

**CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA E MECÂNICA DE
MACROFIBRAS POLIMÉRICAS**

São Paulo

2016

ALAN RENATO ESTRADA CÁCERES

**CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA E MECÂNICA DE
MACROFIBRAS POLIMÉRICAS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil.

Área de concentração: Engenharia de
Construção Civil e Urbana.

Orientador: Professor Livre-Docente
Antonio Domingues de Figueiredo.

**São Paulo
2016**

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catlogação-na-publicação

Estrada Cáceres, Alan Renato

CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA E MECÂNICA DE MACROFIBRAS
POLIMÉRICAS / A. R. Estrada Cáceres -- versão corr. -- São Paulo, 2016.
80 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1.Concreto reforçado com fibras 2.Fibras artificiais 3.Geometria 4.Ensaio
mecânicos 5.Tensão dos materiais I.Universidade de São Paulo. Escola
Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Antonio Domingues de Figueiredo, pelo acolhimento, orientação, incentivo e participação em minha formação profissional.

Ao Isaac Galobardes Reyes, pelo enorme apoio na realização deste trabalho.

À Renata Monte e ao Markus Rebmann pela contribuição no desenvolvimento deste trabalho.

Aos técnicos de laboratório do CPqDCC e do Laboratório de Microestrutura da Escola Politécnica da USP pelo auxílio na realização dos ensaios experimentais.

Aos colegas e amigos da pós-graduação.

A todos meus familiares e amigos do Peru.

Às pessoas as quais devo o mérito deste trabalho: a minha mãe Hortencia Cáceres, a meu pai Abdón Estrada, e a meu irmão Delver Plinio, pelo apoio incondicional, carinho e incentivo.

MUITO OBRIGADO!

Cuando las cosas no tenían marcha atrás,
no valía la pena perder el tiempo
preguntándose si hubiera sido preferible
que no ocurrieran. Mejor tratar de
enrumbarlas por el buen camino.

(Mario Vargas Llosa)

RESUMO

Uma grande diversidade de macrofibras poliméricas para reforço de concreto se encontram disponibilizadas hoje em dia. Por natureza estas fibras apresentam grande diversidade de características e propriedades. Estas variações afetam sua atuação como reforço no concreto. No entanto, não há normas brasileiras sobre o assunto e as metodologias de caracterização de normas estrangeiras apresentam divergências. Algumas normas definem que a caracterização do comportamento mecânico deva ser feita nos fios originais e outras que se devam utilizar métodos definidos para caracterização de materiais metálicos. A norma EN14889-2:2006 apresenta maior abrangência, mas deixa dúvidas quanto à adequação dos critérios de caracterização geométrica das fibras e não define um método de ensaio específico para sua caracterização mecânica. Assim, há a necessidade de estabelecimento de uma metodologia que permita a realização de um programa de controle de qualidade da fibra nas condições de emprego. Esta metodologia também proporcionaria uma forma de caracterização do material para estudos experimentais, o que permitiria maior fundamentação científica desses trabalhos que, frequentemente, fundamentam-se apenas em dados dos fabricantes. Assim, foi desenvolvido um estudo experimental focando a caracterização de duas macrofibras poliméricas disponíveis no mercado brasileiro. Focou-se o estudo na determinação dos parâmetros geométricos e na caracterização mecânica através da determinação da resistência à tração e avaliação do módulo de elasticidade. Na caracterização geométrica foi adotada como referência a norma europeia EN14889-2:2006. As medições do comprimento se efetuaram por dois métodos: o método do paquímetro e o método de análise de imagens digitais, empregando um software para processamento das imagens. Para a medição do diâmetro, além das metodologias mencionadas, foi usado o método da densidade. 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, recomenda-se o método da densidade. Quanto à caracterização mecânica, foi desenvolvida uma metodologia própria a partir de informações obtidas de outros ensaios. Assim, efetuaram-se ensaios de tração direta nas macrofibras coladas em molduras de tecido têxtil. Complementarmente, foi avaliado também o efeito do contato abrasivo das macrofibras com os agregados durante a mistura em betoneira no comportamento mecânico do material. Também se avaliou o efeito do método de determinação da área da seção transversal nos resultados medidos no ensaio de tração da fibra. Conclui-se que o método proposto para o ensaio de tração direta da fibra é viável, especialmente para a determinação da resistência à tração. O valor do módulo de elasticidade, por sua vez, acaba sendo subestimado. A determinação da área da seção da fibra através do método da densidade forneceu também os melhores resultados. Além disso, comprovou-se que o atrito das fibras com o agregado durante a mistura compromete o comportamento mecânico, reduzindo tanto a resistência quanto o módulo de elasticidade. Assim, pode-se afirmar que a metodologia proposta para o controle geométrico e mecânico das macrofibras poliméricas é adequada para a caracterização do material.

Palavras-chave: Macrofibras poliméricas. Caracterização geométrica. Caracterização mecânica. Resistência à tração. Módulo de elasticidade. Concreto reforçado com fibras.

ABSTRACT

A wide variety of synthetic macrofibers for concrete reinforcement are available nowadays. By nature, these fibers exhibit great diversity of properties and characteristics. These variations affect its performance as reinforcement in concrete. However, there are no Brazilian standards on the subject and characterization methodologies available in foreign standards present divergences. Some standards define that the characterization of the mechanical behavior should be made in the original filaments and others that the test should be performed according methods for metallic materials characterization. The standard EN14889-2:2006 provides greater coverage about the subject, but leaves doubts about the suitability of the geometric characterization criteria of the fibers and does not set a specific testing method for its mechanical characterization. Thus, there is a need to establish a methodology that allows to carry out a quality control program of the fiber in the onsite conditions. This approach would also provide a way of materials characterization for experimental studies, which would allow better scientific basis of these works, which often rely exclusively on data taken from manufacturers. Thus, an experimental study focusing on the characterization of two polymer macrofibers available in Brazil was developed. The study aims at the determination of the geometrical and mechanical characteristics, such as the tensile strength and the elastic modulus. The geometric characterization was based on the prescriptions of the European standard EN14889-2:2006. Measurements of length were made by two methods: the caliper method and digital image analysis method, employing software for image processing. For the measurement of the diameter, besides the aforementioned methodologies, the density method was also used. It is concluded that the caliper method, taking care to stretch the macrofibers previously, and the method of digital images can also be used to measure the length. To determine the diameter, it is recommended the density method. As for the mechanical characterization, a methodology was developed taking in consideration the previous information related to other tests. Thus, the direct tensile test was carried out in macrofibers glued in textile fabric frames. In addition, it was also evaluated the effect of the abrasive contact of macrofibers with the aggregates during mixing on the mechanical behavior of the material. Also, the effect of the method of determining the cross-sectional area in the results measured in fiber tensile test was evaluated. It is concluded that the proposed method for direct tensile test of the fiber is feasible, especially for tensile strength assessment. The value of the modulus of elasticity, in turn, has been underestimated. The determination of the fiber section area through the density method also gave the best results. Furthermore, it was found that the friction of the fibers with aggregate during mixing compromises the mechanical behavior reducing both strength and elastic modulus. Thus, it can be said that the proposed methodology for the geometric and mechanical control of polymer macrofibers is suitable for the material characterization.

Keywords: Polymeric macrofibers. Geometric characterization. Mechanical characterization. Tensile strength. Elastic modulus. Fiber reinforcement concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Zigurate “Aqar-Quf” de tijolos reforçado com palha no Iraque a); Ninho de barro reforçado com palha b)	9
Figura 2.2 - Usos do CRMFP: Pavimento industrial a); Concreto projetado com fibras b); Segmento pré-fabricado para um túnel c)	12
Figura 2.3 - Diferentes tipos de fibras poliméricas a); Polímero semicristalino com regiões cristalinas dispersas numa matriz amorfa b).	13
Figura 3.1 - Amostra da macrofibra A a) e seus elementos separados b); amostra da macrofibra B c) e seus elementos separados d)	22
Figura 3.2 - 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).....	23
Figura 3.3 - Imagens digitalizadas a); com ajuste do contraste b); e prontas para avaliação c)	24
Figura 3.4 - Esqueleto da fibra. Note-se que no extremo da fibra se apresenta uma bifurcação.....	26
Figura 3.5 - Variação do diâmetro ao longo do comprimento da macrofibra A devido à torção.	30
Figura 3.6 - Curvas de distribuição do comprimento das macrofibras A e B, respectivamente.	35
Figura 3.7 - Histograma de distribuição do comprimento da macrofibra B, pelo método do paquímetro a); e pelo método de imagens digitais b); tarugo ou grupo de macrofibras tipo B c)	37
Figura 3.8 - Curvas de distribuição do diâmetro das macrofibra A e B pelos três métodos.....	38
Figura 3.9 - Posições prováveis a); pouco prováveis b); e improváveis c); para a medição do diâmetro equivalente de uma macrofibra com seção elíptica.	40
Figura 3.10 - Variação do diâmetro projetado da macrofibra pelo método de imagens digitais a); seção da macrofibra com desfibrilamento que pode ser considerado como superestimação do diâmetro b)	41
Figura 4.1 – Macrofibras poliméricas entrelaçando os grãos do agregado grosso após batimento.....	47

Figura 4.2 - Diferentes formatos de molduras, para fazer o ensaio de tração de macrofibras poliméricas a); e moldura definitiva feita de tecido têxtil b).....	48
Figura 4.3 - Dimensões da moldura em milímetros (mm) a); Pequenas placas coladas na parte posterior b); Fibra colada na moldura e local de corte c)	49
Figura 4.4 - Ensaio de tração de macrofibra polimérica: conjunto colado nas garras da prensa a); corte das laterais da moldura b); Desenvolvimento do ensaio de tração na macrofibra.	50
Figura 4.5 - Macrofibra tracionada durante o ensaio (desfibrilamento) a); Fibras desfibriladas após ensaio b).....	51
Figura 4.6 – Curvas de carga por deformação: macrofibra A (em condições normais) a); macrofibra A (misturadas) b); macrofibra B (em condições normais) c); macrofibra B (misturadas) d).....	52
Figura 4.7 – Curvas médias de tensão por deformação específica: macrofibra A (em condições normais) a); macrofibra A (misturadas) b); macrofibra B (em condições normais) c); macrofibra B (misturadas) d)	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Questões principais a serem abordadas.....	4
Tabela 1.2 - Objetivos específicos.	5
Tabela 3.1 - Características principais das macrofibras disponibilizadas pelo fabricante.....	21
Tabela 3.2 - Resultados das medições com paquímetro.	27
Tabela 3.3 - Resultados das medições com imagens digitais.	29
Tabela 3.4 - Densidade das macrofibras utilizando picnômetro a gás hélio.....	31
Tabela 3.5 - Resultados das medições com o método da densidade.	31
Tabela 3.6 – Tamanho da amostra ‘n’ segundo os valores estatísticos de medição.	33
Tabela 4.1 – Cargas máximas das macrofibras em condições normais e misturadas.	53
Tabela 4.2 – Áreas transversais das macrofibras segundo o diâmetro por diversas metodologias.	54
Tabela 4.3 – Tensões máximas das macrofibras de acordo aos diâmetros por diversas metodologias.....	56
Tabela 4.4 – Tamanho da amostra de acordo ao método empregado para determinar a tensão.....	57
Tabela 4.5 – Módulo de elasticidade das macrofibras em condições normais e misturadas.....	62
Tabela 4.6 – Tamanho da amostra de acordo ao método para estimar o módulo de elasticidade.	64

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Justificativa.....	1
1.2	Objetivos	5
1.3	Metodologia.....	6
2	ESTADO DA ARTE	8
2.1	Introdução	8
2.2	Concreto reforçado com macrofibras poliméricas	8
2.3	Aplicações do concreto reforçado com macrofibras poliméricas.....	11
2.4	Fibras poliméricas	13
2.5	Caracterização de macrofibras poliméricas	15
2.6	Comentários finais.....	18
3	CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA DE MACROFIBRAS POLIMÉRICAS.....	20
3.1	Introdução	20
3.2	Metodologia experimental	20
3.2.1	Tipos de macrofibras	21
3.2.2	Ensaio.....	22
3.2.2.1	Paquímetro.....	23
3.2.2.2	Imagens digitais	24
3.2.2.3	Método da densidade	26
3.3	Resultados experimentais e análise.....	27
3.3.1	Paquímetro	27
3.3.2	Imagens digitais	29
3.3.3	Método da densidade	30
3.3.4	Representatividade da amostra ensaiada.....	33
3.4	Análise comparativa dos métodos	34

3.4.1	Comparação dos comprimentos	34
3.4.2	Comparação dos diâmetros	37
3.5	Comentários finais.....	41
4	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE MACROFIBRAS POLIMÉRICAS	44
4.1	Introdução	44
4.2	Metodologia experimental	44
4.2.1	Caracterização geométrica: área da seção transversal	45
4.2.2	Mistura das macrofibras.....	46
4.2.3	Preparação dos corpos de prova	47
4.3	Ensaio	49
4.3.1	Resistência à tração	50
4.3.2	Módulo de elasticidade	51
4.4	Resultados e análise	52
4.4.1	Tração direta das macrofibras	52
4.4.2	Áreas transversais das macrofibras.....	53
4.4.3	Resistência à tração das macrofibras	55
4.4.3.1	O efeito da mistura na resistência à tração das macrofibras.....	58
4.4.4	Módulo de elasticidade	62
4.5	Comentários finais.....	65
5	CONCLUSÕES	67
5.1	Conclusão geral	67
5.2	Conclusões específicas.....	67
5.3	Propostas de trabalhos futuros	69
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
	ANEXO 1.A – Avaliação geométrica pelo método do paquímetro (Macrofibra A)	76
	ANEXO 1.B – Avaliação geométrica pelo método do paquímetro (Macrofibra B)	77
	ANEXO 2 – Avaliação geométrica pelo método de imagens digitais	78

ANEXO 3.A – Avaliação geométrica pelo método da densidade (Macrofibra A).....	79
ANEXO 3.B – Avaliação geométrica pelo método da densidade (Macrofibra B).....	80

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

O material de construção mais empregado mundialmente é o concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014). No entanto, este material apresenta limitações devido a fato das matrizes cimentícias terem baixa resistência à tração e, também, um comportamento frágil especialmente à tração (BENTUR; MINDESS, 2007; FIGUEIREDO, 2011; NEVILLE, 2013).

Devido a estas limitações surgiram numerosas pesquisas, as quais demonstraram que a adição de fibras nas matrizes cimentícias melhora as propriedades mecânicas do concreto, em particular sua ductilidade e capacidade de absorção de energia de impacto (NAAMAN, 2003). Neste sistema, tanto a fibra quanto a matriz são assumidas para trabalhar em conjunto, através de uma interação, e proporcionar a sinergia necessária para fazer um compósito eficaz (NAAMAN, 2007). Isto levou a que o uso de fibras para reforço de misturas cimentícias apresentasse grande progresso nas últimas décadas (BENTUR; MINDESS, 2007; LÓPEZ, 2013; SALVADOR, 2013). Assim sendo, o concreto reforçado com fibras (CRF) constitui uma das inovações mais relevantes no campo dos concretos especiais (PUJADAS, 2013).

Neste tipo de concreto, o fato de que as fibras são discretas e distribuídas aleatoriamente na mistura, leva a um mecanismo de reforço tridimensional diferente do concreto armado (CA) convencional. Enquanto que as barras de aço são posicionadas na seção em um plano específico de fissuração para o reforço do CA, as fibras trabalham usualmente com menos eficiência que o CA quando o esforço de tração é bem definido. Contudo, este reforço tridimensional fornece uma capacidade de ponte de transferência de tensões melhorada, incrementando a tenacidade e ductilidade do concreto, o que pode ser muito conveniente para certas aplicações onde ocorrem carregamentos variáveis ou com incertezas quanto ao direcionamento dos esforços (BLANCO, 2013). Desse modo, se elimina o comportamento frágil do concreto; e assim o CRF torna-se um compósito que pode ser utilizado como uma

alternativa ao uso do CA para estruturas contínuas e pré-moldados (FIGUEIREDO, 2011).

No CRF, uma vez que o concreto fissura a contribuição à tração ocorre devido ao efeito ponte das fibras aumentarem a resistência residual do compósito. Sendo assim, e graças aos mecanismos de perda de aderência e arrancamento das fibras, ocorre à dissipação de uma maior energia, o que conduz a um importante incremento da tenacidade e maior controle da fissuração (PUJADAS, 2013). Com o reforço da matriz cimentícia com fibras pode-se ter o aumento da resistência à tração, quando os teores forem superiores ao crítico (FIGUEIREDO, 2011). Também pelo retardo da propagação de fissuras e pelo aumento da tenacidade pela transmissão de tensões através de uma seção fissurada é possível uma deformação muito maior após a tensão de pico do que sem o reforço com fibra (NEVILLE, 2013). Além disso, é frequente uma melhoria na resistência ao impacto e propriedades como a resistência à fadiga (BENTUR; MINDESS, 2007) afetando positivamente na durabilidade da estrutura. Obviamente, isto depende da quantidade e da qualidade das fibras adicionadas (FIGUEIREDO, 2011).

Uma vasta gama de fibras de diferentes propriedades mecânicas, físicas e químicas são consideradas e utilizadas para reforçar o concreto (BENTUR; MINDES, 2007). Estas podem ser produzidas a partir de material natural orgânico (por exemplo, sisal, celulose, juta, bambu) ou são produtos industrializados como, vidro, aço, carbono e polímeros (por exemplo, polipropileno ou kevlar) (NAAMAN, 2013; NEVILLE, 2013). Entre as fibras poliméricas, as fibras de polipropileno são cada vez mais utilizadas para reforço da matriz de concreto (BENTUR; MINDESS, 2007).

As fibras de polipropileno são fornecidas em duas formas básicas: as microfibras e as macrofibras. As microfibras de polipropileno são aquelas largamente empregadas como reforço secundário, visando principalmente controlar a fissuração nas primeiras horas após o lançamento do concreto ou argamassa, e possuem pequenas dimensões (TIGUMAN, 2004; PELISSER *et al.*, 2010). Já as macrofibras de polipropileno possuem maiores dimensões e são concebidas para obter reforço estrutural, nos mesmos moldes que uma fibra de aço (FIGUEIREDO, 2011). Contudo, o conhecimento sobre o comportamento do concreto reforçado com macrofibras poliméricas (CRMFP) é limitado (BURATTI; MAZZOTTI; SAVOIA, 2011; BABAFEMI; BOSHOF, 2015).

A utilização de macrofibras poliméricas em aplicações estruturais necessita da compreensão de seu comportamento mecânico, o que depende da sua caracterização geométrica. A maioria dos estudos publicados até agora focam na caracterização do compósito em geral e na validação de sua aplicação para fins estruturais (PUJADAS, 2013). Tais estudos carecem de caracterização específica da macrofibra polimérica que é utilizada, baseando-se somente em informações dos fabricantes.

Além disso, a matéria prima das macrofibras poliméricas pode gerar uma ampla faixa de variação comportamental a depender, por exemplo, do grau de polimerização, do grau de cristalização e da quantidade de aditivos utilizada na sua produção, bem como de outros parâmetros (SALVADOR, 2012). Isto não ocorre da mesma maneira com o aço que possui baixa variação de seu módulo de elasticidade, que depende fundamentalmente da energia de ligação, e da densidade que é definida pela massa atômica do elemento e do arranjo cristalino (CALLISTER, 2002).

No Brasil não se tem norma específica de caracterização de macrofibras poliméricas. Além disso, existe carência de publicações que se foquem exclusivamente na caracterização desse material. Entre os fatores que influem na falta de aplicação das macrofibras poliméricas com responsabilidade estrutural, se destaca a falta de experiência e o desconhecimento entre os profissionais sobre o CRMFP, suas propriedades, suas limitações e seus campos de aplicação.

Assim, é necessário desenvolver uma metodologia de caracterização de macrofibras poliméricas, que permita avaliar sua potencial capacidade de reforço durante o processo de fissuração do concreto. Este estudo já foi realizado no Brasil quanto às fibras metálicas que deu origem a uma especificação brasileira de fibras de aço para concreto, a norma NBR 15530:2007 (ABNT, 2007). No entanto, há a necessidade de desenvolvimento de metodologias confiáveis de modo a possibilitar a caracterização das macrofibras poliméricas e, conseqüentemente, estabelecer parâmetros para seu controle de qualidade.

De acordo com Pujadas (2013), a base fundamental do conhecimento que tem servido para o desenvolvimento das distintas normas e recomendações relativas ao CRF foi obtida a partir de estudos de concreto reforçado com fibras de aço (CRFA). Assim, é ainda mais necessário realizar uma revisão sobre a validade de utilização das bases de cálculo e projeto desenvolvidas para o CRFA sendo

aplicadas para o CRMFP, desde caracterizar o material até a definição das equações constitutivas, e do comportamento diferido.

A pesquisa destes aspectos deve procurar proporcionar uma maior margem de confiança aos projetistas para o emprego e proposta de soluções utilizando o CRMFP. Logicamente, a falta de dados confiáveis sobre estas fibras e a limitação de somente se ter como referência os dados dos fabricantes; expõe às estruturas projetadas com CRMFP a riscos de insucesso devido à falta de parâmetros mínimos que sirvam de referência para a especificação e seleção do material.

Então, a existência de um grande número de macrofibras poliméricas no mercado e o desconhecimento real dos materiais utilizados na fabricação das mesmas, implica a necessidade de estabelecer uma metodologia que possibilite uma caracterização confiável do material. Dessa forma, um bom conhecimento das macrofibras utilizadas para produzir CRMFP aperfeiçoarão os projetos futuros, podendo minimizar custos sem implicar em riscos de insucesso. Neste contexto, decidiu-se estudar as macrofibras poliméricas focando duas linhas de pesquisa: caracterização geométrica e caracterização mecânica. A Tabela 1.1 apresenta alguns aspectos que devem ser abordados para melhorar o conhecimento das macrofibras poliméricas para o seu uso no concreto. O estudo tem como meta proporcionar respostas aos problemas indicados na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 - Questões principais a serem abordadas.

Temas	Questões
Caracterização geométrica de macrofibras poliméricas.	<ul style="list-style-type: none"> Qual é a importância de caracterizar geometricamente as macrofibras poliméricas? Existem normativas nacionais ou internacionais que foquem na caracterização geométrica destas macrofibras? É possível aplicar as tolerâncias dimensionais de normas internacionais na caracterização geométrica de macrofibras poliméricas produzidas no Brasil? Quais métodos de caracterização existem, e que vantagens ou desvantagens apresentam? Como avaliar comparativamente os métodos de determinação do comprimento e do diâmetro médio? Qual é o método mais recomendável para a obtenção do comprimento e do diâmetro médio? Quais valores nominais da macrofibra devem ser declarados pelo fabricante?
Caracterização mecânica de macrofibras poliméricas	<ul style="list-style-type: none"> Como se relacionam a caracterização geométrica e a caracterização mecânica? Por que é importante a caracterização mecânica de macrofibras poliméricas? Existem normativas que se foquem na caracterização

	<p>mecânica destas macrofibras?</p> <ul style="list-style-type: none"> • É possível adaptar alguma destas normas para determinar as propriedades mecânicas das macrofibras poliméricas, nos formatos que estas são fornecidas? • Como preparar os corpos de prova e como efetuar os ensaios de caracterização mecânica das macrofibras? • Qual é o mecanismo de fratura que se apresenta na macrofibra quando é submetida à tração direta? • Como influência na tensão máxima a determinação do diâmetro da área da seção transversal da macrofibra, e por qual método de determinação do diâmetro a tensão máxima apresenta a menor variação? • Como determinar o módulo de elasticidade? • Como influência nas propriedades mecânicas das macrofibras poliméricas o fato destas serem misturadas? • Quais são os fatores que podem influenciar nas propriedades mecânicas das macrofibras misturadas?
--	--

1.2 Objetivos

O objetivo geral do estudo é propor uma metodologia de caracterização de macrofibras poliméricas. Este objetivo é abordado considerando duas linhas de pesquisa: caracterização geométrica e caracterização mecânica de macrofibras poliméricas. Para esse fim, na Tabela 1.2 são propostos vários objetivos específicos, de acordo a cada linha de pesquisa.

Tabela 1.2 - Objetivos específicos.

Temas	Objetivos específicos
Caracterização geométrica de macrofibras poliméricas.	<ul style="list-style-type: none"> • Fazer uma pesquisa bibliográfica de normas nacionais e internacionais sobre caracterização geométrica de macrofibras poliméricas. • Mostrar a importância que tem a caracterização geométrica de macrofibras poliméricas no CRF. • Estudar os métodos existentes de caracterização geométrica, e mostrar as vantagens e desvantagens que apresentam. • Fazer a caracterização geométrica de macrofibras poliméricas pelos métodos existentes, e avaliar comparativamente os resultados obtidos. • Definir qual método de caracterização geométrica apresenta a menor variação de resultados na determinação das propriedades das macrofibras. • Verificar a possibilidade de empregar critérios de tolerâncias dimensionais de normas internacionais, na caracterização geométrica de macrofibras poliméricas produzidas no Brasil. • Mostrar a importância de serem declarados os valores nominais médios das propriedades geométricas das

	macrofibras, nas especificações do produto e por parte dos fabricantes.
Caracterização mecânica de macrofibras poliméricas	<ul style="list-style-type: none"> • Explicar a relação entre a caracterização geométrica das macrofibras poliméricas e sua caracterização mecânica. • Mostrar a importância que tem a caracterização mecânica de macrofibras poliméricas no CRF. • Fazer uma pesquisa bibliográfica das normativas que se focam na caracterização mecânica de macrofibras poliméricas. • Determinar a possibilidade de adaptar alguma destas normas, para determinar as propriedades mecânicas nos formatos em que estas macrofibras são fornecidas no Brasil. • Encontrar um método de ensaio e de preparação de corpos de prova, para que as macrofibras poliméricas sejam avaliadas mecanicamente. • Determinar qual é o mecanismo de fratura que se apresenta nas macrofibras quando são submetidas à tração direta. • Saber como se vê influenciada a tensão máxima da macrofibra, de acordo ao método de determinação do diâmetro da área da seção transversal, e por qual destes métodos a tensão máxima apresenta a menor variação. • Estabelecer um critério para a estimação do módulo de elasticidade de macrofibras poliméricas. • Avaliar como são influenciadas as propriedades mecânicas das macrofibras quando são misturadas.

Os resultados obtidos com os diversos métodos de caracterização empregados e a correlação entre eles podem fornecer dados necessários para uma futura normativa. O conhecimento das características físicas e mecânicas das macrofibras poliméricas é preponderante e é o primeiro passo para chegar a definir uma equação constitutiva para CRMFP. Finalmente, este trabalho pretende contribuir ao caminho para que estas fibras sejam utilizadas em elementos com responsabilidade estrutural.

1.3 Metodologia

Inicialmente, foi realizado um levantamento das normas e artigos científicos referentes a técnicas de caracterização geométrica e mecânica de macrofibras poliméricas. Assim, se logrou uma visão geral do estado da arte, sendo capaz de conhecer a importância dos métodos empregados na caracterização destas fibras.

Após conhecer os métodos de caracterização geométrica se fez uma avaliação de cada um de eles com o objetivo de determinar qual é o método mais

adequado na determinação do comprimento e do diâmetro. Para isto, se utilizou de um estudo comparativo mediante análise estatística.

Depois, para proceder com a caracterização mecânica, se fez a adoção de um método próprio de acordo com as informações obtidas da literatura. Assim se procedeu com o ensaio de tração direta determinando as propriedades mecânicas das macrofibras poliméricas. Optou-se, primordialmente, por se caracterizar a fibra tal qual é fornecida para o uso no concreto, já cortada, ao invés da utilização de fios utilizados na sua produção, o que é acessível apenas ao fabricante.

Previamente à realização dos ensaios mecânicos, as macrofibras foram caracterizadas geometricamente. Para determinar a área da seção transversal, o diâmetro foi obtido pelos diferentes métodos apresentados na caracterização geométrica. Neste sentido, foi possível conhecer como a tensão máxima se vê influenciada pelo critério de determinação da área da seção transversal. Da mesma maneira, com o objetivo de saber como são influenciadas as propriedades mecânicas das macrofibras pelo processo de mistura, se fez a caracterização mecânica de macrofibras previamente misturadas.

A dissertação está organizada em seis capítulos, que versam sobre os seguintes temas:

- Capítulo 1: Introdução ao tema, destacando os objetivos que se devem cumprir, a justificativa e a metodologia empregada;
- Capítulo 2: É resumida o estado da arte sobre as macrofibras poliméricas que são utilizadas como reforço do concreto;
- Capítulo 3: Descreve a caracterização geométrica de macrofibras poliméricas;
- Capítulo 4: Descreve a caracterização mecânica de macrofibras poliméricas;
- Capítulo 5: Conclusões e perspectivas futuras;
- Capítulo 6: Referências bibliográficas.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Introdução

Neste capítulo se realiza uma revisão do estado do conhecimento em relação a: concreto reforçado com macrofibras poliméricas, os campos de aplicação deste compósito, fibras poliméricas, e caracterização de macrofibras poliméricas. Ademais, se apresentam as normas e métodos existentes atualmente para a caracterização destas fibras. Os objetivos deste capítulo são: estudar e analisar as problemáticas em que se baseia o estudo e cobrir brevemente a literatura sobre vários dos aspectos que se abordarão durante o desenvolvimento desta dissertação.

2.2 Concreto reforçado com macrofibras poliméricas

O uso de fibras para reforço de materiais frágeis se remonta a tempos antigos. Há registros que indicam que sua utilização já ocorria no Antigo Egito e no Antigo Iraque (Figura 2.1a), cerca de 3500 anos atrás, na fabricação de tijolos com reforço de palha (BENTUR; MINDES, 2007). Mas o uso de fibras na construção ocorre mesmo antes do surgimento dos humanos, como exemplo disto se tem o joão-de-barro, que é um pássaro nativo da Argentina, Brasil, Chile e Bolívia. Este pássaro se empenha cuidadosamente na construção de ninhos de barro reforçado com palha no topo das árvores (MEHTA; MONTEIRO, 2008), como se observa na Figura 2.1b.

Os primeiros estudos científicos são devidos a Griffith, realizados em 1920. O enfoque científico teve continuidade nos estudos de Romualdi e Batson e Romualdi e Mandel em 1963 (PUJADAS, 2008). Durante os últimos 50 anos o emprego e estudo de fibras na construção levaram ao desenvolvimento e fabricação de tipos específicos de fibras que correspondem a diferentes necessidades. Atualmente, fibras de vários tipos são produzidas para reforçar diferentes materiais (BENTUR; MINDESS, 2007).

Figura 2.1 - Zigarette “Aqar-Quf” de tijolos reforçado com palha no Iraque (www.thinglink.com) a);
Ninho de barro reforçado com palha (www.fotolog.com) b)

No concreto as fibras são, sem dúvida, um reforço alternativo as barras de aço, que suprimem as atividades e os custos derivados da manipulação, montagem e instalação da armadura convencional, proporcionando assim uma grande facilidade executiva (FIGUEIREDO, 2011; SOUTSOS; LAMPROPOULOS, 2012; PUJADAS, 2013; BOLAT *et al.*, 2014). Vários tipos de fibras são empregados para melhorar a tenacidade do concreto, controlar a fissuração e até aumentar a resistência à tração. Dentre estes tipos de fibras existentes podem-se destacar as fibras de aço, fibras de polipropileno, e fibras de vidro (LÓPEZ, 2013; BOLAT *et al.*, 2014).

Nas fibras, há uma infinita possibilidade de combinações de características geométricas, podendo-se variar tanto a seção transversal como o comprimento, conferindo distintos valores de fator de forma. Por exemplo, a seção transversal pode ser circular, retangular ou poligonal. Para desenvolver uma melhor união entre as fibras e a matriz de concreto, as fibras podem ser modificadas ao longo do seu comprimento, induzindo deformações ou tornando-a mais rugosa na sua superfície. Assim as fibras podem ser lisas, endentadas, corrugadas, torcidas ou enroladas (NAAMAN, 2003).

No entanto, de acordo com Naaman (2003), para que uma fibra trabalhe eficientemente no concreto, deve apresentar alta resistência à tração e aderência com a matriz da mesma ordem ou até superior à resistência a tração da mesma. Também sugere que o módulo de elasticidade da fibra seja maior que a matriz correspondente e o coeficiente de Poisson ou de dilatação térmica de preferência semelhante à matriz. Isto, no entanto, não ocorre para as fibras poliméricas, uma vez que é sabido que têm módulo de elasticidade (por exemplo, o módulo das fibras

de polipropileno varia de 1 a 8 GPa) inferior ao dos materiais cimentícios que varia de 15 a 40 GPa.

Portanto, segundo a definição de Naaman (2013), as fibras poliméricas não seriam mecanicamente tão eficientes quanto às fibras de aço no reforço do concreto. Contudo, diversos estudos reportaram que fibras de menor módulo que a matriz podem conferir melhoria nas propriedades mecânicas do concreto (ZHENG; FELDMAN, 1995; ZOLLO, 1996; BENTUR; MINDESS, 2007).

É por isso que nos últimos anos os esforços crescentes da indústria foram dirigidos para desenvolver uma nova geração de fibras poliméricas com finalidade estrutural, as quais são conhecidas como macrofibras poliméricas. Estas foram disponibilizadas no mercado recentemente, especialmente no Brasil, com o objetivo de criar uma alternativa para fibras de aço em aplicações estruturais, mas seu uso é ainda limitado (BURATI; MAZZOTTI; SAVOIA, 2011; FIGUEIREDO, 2011; BABAFEMI; BOSHOF, 2015). Entre as principais vantagens apresentadas por esse tipo de fibras, pode-se citar: a maior facilidade de homogeneização e distribuição durante a mistura de concreto e no acabamento superficial, maior flexibilidade (o que prejudica menos a trabalhabilidade), maior resistência química e durabilidade (BENTUR; MINDESS, 2007).

No entanto, há que se ressaltar que as limitações em relação às fibras de aço (menor resistência e módulo) exigem que o volume de macrofibras utilizado para o reforço do concreto seja maior que o das fibras de aço (FIGUEIREDO *et al.*, 2012). Isto pode anular, por exemplo, a vantagem da maior flexibilidade porque o maior teor de fibras pode trazer uma redução mais intensa da fluidez do material. Nesse sentido, as macrofibras poliméricas devem ser analisadas com o devido cuidado de maneira a se obter, de fato, vantagens aplicativas com seu uso.

As macrofibras de base polimérica concebidas para se obter reforço estrutural no concreto surgiram no mercado internacional nos anos 1990 (FIGUEIREDO, 2011; BABAFEMI; BOSHOF, 2015). No Brasil, essas fibras foram inseridas no mercado em 2007, e atualmente há uma diversa gama de produtos e distribuidores (SALVADOR, 2012). O seu comprimento é variável, de 20 mm a 60 mm, e tem que guardar relação com o tamanho máximo do agregado (PUJADAS, 2008).

Existem, na literatura técnica, vários trabalhos e pesquisas nas quais se demonstra que se melhoram significativamente diversas propriedades mecânicas da matriz com a adição de macrofibras poliméricas, com destaque para a resistência à

flexão, resistência ao impacto, comportamento à fadiga (BARR *et al.*, 1996; TROTTIER; MAHONEY, 2001; TIGUMAN, 2004; OH; KIM; CHOI, 2006; HASAN; AFROZ; MAHMUD, 2011; BURATTI; MAZZOTTI; SAVOIA, 2011; SOUTSOS; LAMPROPOULOS, 2012; PUJADAS, 2013).

Salienta-se que, na maioria destas pesquisas, não foi realizado um estudo prévio de caracterização das macrofibras poliméricas empregadas, sendo utilizados ou referenciados somente os dados dos fabricantes. Apesar das possibilidades de variações comportamentais do material, não se tem uma investigação que se foque especificamente em avaliar as características intrínsecas deste material, principalmente a respeito das características geométricas e mecânicas.

2.3 Aplicações do concreto reforçado com macrofibras poliméricas

Os usos tradicionais das fibras poliméricas têm sido os pavimentos e a construção subterrânea, com o propósito de melhorar a durabilidade do elemento. Isto é devido à intenção de, com estas fibras, se controlar a fissuração em idades iniciais do concreto, sendo que a função estrutural não é contemplada neste tipo de fibras (FIGUEIREDO *et al.*, 2002; PUJADAS, 2013). As fibras poliméricas, também são usadas para a proteção contra danos físicos durante incêndios em túneis. Por exemplo, com a utilização de fibras de polipropileno pode-se evitar o lascamento explosivo do revestimento do concreto devido à tensão interna gerada pela pressão de vapor, pois as fibras se fundem produzindo um caminho livre para a saída do vapor de água (NINCE, 2007).

Quanto às macrofibras poliméricas, a incorporação destas em misturas cimentícias promove uma melhora significativa em diversas propriedades mecânicas da matriz, com destaque para tenacidade a flexão, resistência à fadiga e ao impacto. As primeiras aplicações das macrofibras poliméricas ocorreram para o concreto projetado, especialmente na Austrália e no Canadá (MORGAN; RICH, 1996). Aos poucos esta tecnologia se disseminou e chegou ao Brasil em anos mais recentes (FIGUEIREDO, 2011).

Na atualidade o uso está se estendendo devido às vantagens técnicas e econômicas que estas podem conferir ao concreto convencional. As macrofibras

poliméricas se mostram muito interessantes para aplicações em pisos e pavimentos (Figura 2.2a), concretos projetados (Figura 2.2b) e elementos pré-fabricados (Figura 2.2c) (TIGUMAN, 2004; FIGUEIREDO, 2011). Estas podem também proporcionar maior durabilidade em elementos expostos a ambientes agressivos; em virtude de sua maior resistência química (BENTUR; MINDESS, 2007; PUJADAS, 2008). Consequentemente, o uso de fibras poliméricas na indústria do concreto foi estendido mais além do mero controle da fissuração por retração plástica, como é o caso de novas aplicações com contribuição estrutural (PUJADAS, 2013).

No caso de revestimento de túneis, a utilização deste tipo de fibras tem a intenção de substituir o reforço com telas metálicas. Tal raciocínio é similar ao utilizado para as fibras de aço que já estão sendo utilizadas em substituição de telas metálicas como reforço (FIGUEIREDO, 1997). As fibras poliméricas para reforçar concreto chamaram a atenção dos pesquisadores na primeira metade dos anos 1960 (PUJADAS, 2008). Em vários estudos as macrofibras poliméricas vêm sendo empregadas junto com as fibras de aço na produção de concreto com reforço híbrido de fibras; isto com o propósito de incrementar as propriedades físicas e mecânicas do compósito a partir da ação de cada uma das fibras (OUCIEF; HABITA; REDJEL, 2006; PONS *et al.*, 2007; DAWOOD; RAMLI, 2012; CÁCERES; FIGUEIREDO; MONTE, 2013).

Figura 2.2 - Usos do CRMFP: Pavimento industrial (PUJADAS, 2008) a); Concreto projetado com fibras (www.djc.com) b); Segmento pré-fabricado para um túnel (www.tunelsonline.info) c)

2.4 Fibras poliméricas

A palavra polímero origina-se do grego poli (muitos) e mero (unidade de repetição). Assim, um polímero é uma macromolécula composta por muitas (dezenas de milhares) unidades de repetição denominadas meros, sendo que as ligações intramoleculares são covalentes (CANEVAROLO, 2006). A maior parte dos polímeros usados em engenharia se baseia nos hidrocarbonetos, que são moléculas formadas, fundamentalmente, a partir de átomos de hidrogênio e carbono, arranjados em distintas estruturas moleculares.

Estão formadas por um material polimérico como: polipropileno (PP), polietileno de alta densidade (PEAD), álcool de polivinil (PVA), nylon, aramida, poliéster (PES), etc. Na Figura 2.3a se mostram distintos tipos de macrofibras poliméricas existentes no mercado brasileiro.

A massa molecular dos polímeros utilizados para a produção das fibras deve ser alta para que a interação intermolecular seja grande. As cadeias devem ser lineares e com os átomos preferencialmente ligados uns a outros na mesma ordem, de forma que seja obtido alto grau de cristalinidade e alinhamento entre as massas (CALLISTER, 2002; CANEVAROLO, 2006). No entanto, a cristalização raramente é perfeita nos polímeros, em decorrência dos seus tamanhos e da sua frequente complexidade (VAN VLACK, 1970; CALLISTER, 2002; CANEVAROLO, 2006). Como exemplo, na Figura 2.3b se mostra um polímero semicristalino mostrando tanto a região com alta cristalinidade como a região amorfa.

Figura 2.3 - Diferentes tipos de fibras poliméricas (PUJADAS, 2008) a); Polímero semicristalino com regiões cristalinas dispersas numa matriz amorfa (CALLISTER, 2002) b).

A maioria das propriedades físicas, mecânicas e termodinâmicas dos polímeros semicristalinos depende do grau de cristalinidade e da morfologia das regiões cristalinas (CANEVAROLO, 2006). Do mesmo modo, o processo de produção apresenta grande influência sobre as propriedades finais da fibra. O método mais utilizado é a extrusão, no qual o polímero aquecido passa por uma matriz com múltiplos orifícios. O fio formado é estirado, a fim de introduzir deformações plásticas permanentes, aumentando o grau de cristalinidade e orientação das cadeias (VAN VLACK, 1970; CALLISTER, 2002).

De acordo com Zheng e Feldman (1995), uma fibra polimérica é definida como flexível, macroscopicamente homogênea, com elevada relação de aspecto e seção transversal pequena. Todas as fibras têm uma estrutura molecular em comum: uma orientação preferencial em seus elementos com respeito ao eixo das fibras que implica suas características.

Com respeito às propriedades mecânicas, os polímeros respondem a solicitações mecânicas aplicadas com variações que dependem da estrutura molecular, composição química, temperatura, tempo e histórico de processamento do polímero. Estas propriedades mecânicas são especificadas através de muitos dos mesmos parâmetros usados para os metais; isto é, o módulo de elasticidade, o limite de resistência à tração e as resistências ao impacto e à fadiga.

As propriedades mecânicas dos polímeros são dependentes de sua estrutura molecular, sendo a energia de ligação e as interações intermoleculares os principais fatores que influenciam sua resistência. Ressalta-se que o comportamento mecânico das fibras é afetado pelas propriedades intrínsecas do material ao longo do seu comprimento. Este comportamento pode ser atribuído a dois fatores: primeiro, a probabilidade de que pontos fracos existam é grande em fibras de maior comprimento e; segundo, no caso de fibras de formato corrugado, a ondulação inicial ao longo do comprimento dos filamentos conduz a uma desigual distribuição de tensões ao longo do comprimento (ZOHDI; STEIGMAN, 2002 *apud* ZHU *et al.*, 2012).

Para muitos dos materiais poliméricos, o ensaio simples de tensão-deformação é empregado para a caracterização de alguns desses parâmetros mecânicos (CALLISTER, 2002). Nas fibras, as propriedades que são mais relevantes são o módulo de elasticidade e a resistência mecânica (FIGUEIREDO, 2011).

As características mecânicas das fibras que interferem na sua capacidade de reforço podem vir a ser alteradas no processo de corte durante a sua fabricação (ASTM D2256/D2256M: 2010; ASTM D3822: 2007; THOMASON; KALINKA, 2001). Ainda assim, podem ser alteradas durante a mistura do concreto por possuírem baixa dureza. Por exemplo, na pesquisa de Salvador (2012), fibras poliméricas foram misturadas no concreto fresco por 20 minutos, e se constatou que após mistura, estas apresentavam uma superfície áspera e irregular com microfibras saindo do maior fio, devido ao processo abrasivo. Em vista disso, também é importante conhecer o potencial de degradação da tensão máxima da fibra com o atrito gerado durante a produção do concreto. Assim também, devem-se conhecer as propriedades mecânicas das fibras no mesmo estado e nas mesmas condições nas quais serão aplicadas.

2.5 Caracterização de macrofibras poliméricas

O Brasil não conta com uma norma de especificação de macrofibras poliméricas utilizadas no concreto. Quanto às fibras metálicas, a necessidade de parametrização deste material deu origem à norma brasileira de especificação, a norma NBR 15530:2007 (ABNT, 2007) intitulada “Fibras de aço para concreto - Especificações”. Isto também ocorre em diversas normas internacionais para fibras de aço, tais como a ASTM A820/A820M: 2011 (ASTM, 2011) e a EN14889-1:2006 (AENOR, 2006).

Estas normas destacam a importância da caracterização geométrica e mecânica das fibras. Assim, procurando nas normativas internacionais, foi encontrada a norma europeia EN 14889-2:2006 (AENOR, 2006). Esta é uma norma específica sobre macrofibras poliméricas, e pode ser considerada como a única que se foca exclusivamente na caracterização deste material. Deste modo, esta norma serviu como referência para realizar a caracterização geométrica das macrofibras neste estudo.

A norma EN14889-2:2006 (AENOR, 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 (FIGUEIREDO *et al.*, 2008).

A norma EN14889-2:2006 (AENOR, 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. 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 norma europeia também indica o método da densidade na determinação do diâmetro de fibras de seção variável, mas para isto o método precisa de dados como: o comprimento desenvolvido, a massa e a densidade da fibra. Por outra parte, também se encontraram publicações que fazem menção a um terceiro método de determinação do comprimento e do diâmetro de fibras por meio de imagens digitais (SHIN *et al.*, 2008; CHO; KIM, 2008; DENG; KE, 2010; LI; YI; SHANG, 2012; ÖZNERGİZ *et al.*, 2014; CÁCERES *et al.*, 2015). Os três métodos mencionados são mais detalhados no programa experimental desenvolvido e apresentado no Capítulo 3.

A caracterização geométrica é importante, porque a geometria da fibra acaba por afetar a sua capacidade de reforço no CRF (NAAMAN, 2003; PRUDENCIO Jr. *et al.*, 2006 FIGUEIREDO, 2008; HTUT, 2010; ZĪLE; ZĪLE, 2013). Quanto maior o comprimento da fibra, maior é o seu embutimento na matriz e, portanto, maior a capacidade resistente pós-fissuração conferida por sua ancoragem ao concreto. Além do comprimento, a variação da seção transversal da fibra também implica numa alteração do comportamento pós-fissuração do compósito. Isto decorre porque a maior seção transversal da fibra proporciona uma maior área de contato com a matriz e aumenta a resistência individual ao arrancamento. Por outro lado, para um

mesmo volume de fibras e com seção transversal menor, há uma maior área de contato e poder de reforço pós-fissuração (FIGUEIREDO, 2011).

Quanto à caracterização mecânica, a norma europeia EN 14889-2:2006 (AENOR, 2006) indica que os ensaios sejam feitos de acordo aos critérios da norma europeia EN 10002-1:2001 (AENOR, 2001), a qual é inerente a ensaios de tração de materiais metálicos. Assim, para realizar a caracterização mecânica específica da fibra, se continuou revisando e pesquisando nas normativas internacionais, onde não se encontrou muita informação. As normas encontradas indicam ensaios de caracterização mecânica de fibras em geral, como as normas americanas ASTM C1557-03:2008 (ASTM, 2008) e ASTM D3822:2007 (ASTM, 2007).

Também foram encontradas normas que prescrevem a determinação das propriedades mecânicas através do ensaio direto do fio original utilizado na produção da fibra, como o critério proposto pela norma ASTM D2256/D2256M (ASTM, 2010). Esta norma indica que se deve ensaiar à tração fios da ordem de 500 mm de comprimento, a desvantagem é que apenas os produtores têm acesso a este tipo de fio, impedindo que este ensaio seja aplicável para um controle de recebimento do material.

Assim, não foi possível encontrar uma norma específica de caracterização mecânica de macrofibras poliméricas para reforço de compósitos. E mais ainda, uma norma que indique ensaiar estas fibras nos formatos nos quais são vendidas, ou seja, comprimentos por volta de 60 mm. Então, foi necessário desenvolver uma metodologia própria baseada nas informações obtidas de cada uma das normas indicadas e da própria experiência vivenciada no desenvolvimento experimental do ensaio.

A importância da caracterização mecânica de macrofibras poliméricas reside no fato de que permite determinar sua resistência mecânica como também avaliar seu módulo de elasticidade. A resistência da fibra acaba afetando sua capacidade resistente pós-fissuração. Isto ocorre porque, no momento em que a matriz fissa há uma transferência de tensões da mesma para a fibra, cuja resistência é então acionada. Assim, quanto maior a resistência da fibra, maior será a capacidade resistente residual (FIGUEIREDO, 2011). O módulo de elasticidade da fibra é importante no sentido de proporcionar maior rigidez e capacidade de impedir que a fissuração se propague (TIGUMAN, 2004).

Previamente a efetuar os ensaios de caracterização mecânica é importante fazer a caracterização geométrica das fibras, pois a geometria define a área da seção transversal da macrofibra polimérica. A área transversal é importante, naturalmente, porque permite determinar as tensões aplicadas às fibras durante o ensaio, fundamentais para a avaliação do módulo de elasticidade, como também a tensão máxima que corresponde à resistência da fibra.

2.6 Comentários finais

As seguintes conclusões podem ser extraídas do estado da arte:

- A caracterização das macrofibras poliméricas é importante, porque com isso se tem um parâmetro fundamental que permita garantir seu uso submetido a um programa de controle de qualidade. Isto é particularmente importante no que se refere à caracterização geométrica e mecânica, dado que estas propriedades e características afetam a capacidade de reforço das fibras no concreto. Isto pode ser uma base para normatizar o uso de estas fibras no Brasil como reforço do concreto.
- Na maioria de pesquisas sobre CRMFP não foi realizado um estudo prévio de caracterização das macrofibras poliméricas empregadas, sendo simplesmente utilizados ou referenciados os dados dos fabricantes. Não se tem uma investigação que se foque especificamente em avaliar as características intrínsecas deste material, principalmente a respeito das características geométricas e mecânicas. No entanto, a caracterização da fibra permite um maior refinamento científico das pesquisas experimentais e pode contribuir com parâmetros para desenvolvimento de modelos de previsão de comportamento (BITTENCOURT JR., 2014).
- É também importante conhecer o potencial de degradação da tensão máxima da fibra com o atrito gerado durante a produção do concreto. Portanto, é fundamental ter uma metodologia de avaliação deste tipo de efeito, o que não é contemplado pelos ensaios normalizados que se concentram na avaliação

do fio original de produção da fibra. Assim, conhecer as propriedades mecânicas das fibras nas mesmas condições de aplicação.

- Ressalta-se que não existem normas para caracterizar geometricamente e mecanicamente as macrofibras poliméricas no Brasil. A norma europeia EN 14889-2:2006 (AENOR, 2006) pode ser considerada como a única norma que se foca exclusivamente na caracterização geométrica de macrofibras poliméricas e servirá como referência principal para a determinação das características geométricas das fibras. Por outro lado, o desenvolvimento de um ensaio específico para caracterização das macrofibras poliméricas se faz necessário.

3 CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA DE MACROFIBRAS POLIMÉRICAS

3.1 Introdução

Como se comentou no capítulo anterior, as características geométricas das macrofibras poliméricas são importantes porque afetam o comportamento do concreto reforçado com fibras (CRF) e são base para a determinação do comportamento mecânico das mesmas. Em vista da carência de publicações específicas no Brasil, adotou-se a norma europeia EN14889-2:2006 (AENOR, 2006) como parâmetro de referência para efetuar esta caracterização.

O presente capítulo mostra uma metodologia para caracterizar geometricamente macrofibras poliméricas. Para analisar a confiabilidade do método, foi desenvolvido um estudo experimental considerando dois tipos de fibras. Foi então feita a caracterização geométrica destas fibras com os distintos métodos indicados, previamente, no Capítulo 2, e aqui descritos em maior detalhe. Finalmente, mediante uma análise comparativa de resultados se definiu qual dos métodos é o mais indicado para determinar, tanto o comprimento quanto o diâmetro das macrofibras poliméricas.

3.2 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.

3.2.1 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 3.1. Note-se que o fator de forma das macrofibras é a relação entre o comprimento (L) e o diâmetro equivalente da mesma (D).

Tabela 3.1 - 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.

A macrofibra A é fornecida em formato de corda (Figura 3.1a). Estas cordas podem ser decompostas em aproximadamente 20 feixes de macrofibras (Figura 3.1b), 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; FIGUEIREDO, 2011). 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 sem embolamentos. 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 é uma fibra reta que apresenta uma seção ovalada formada por feixes agrupados. Ou seja, não apresenta o formato de corda da macrofibra A (Figura 3.1c), mas também pode ser considerado um feixe de fibras. A Figura 3.1d mostra os feixes separados 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. Ambas as macrofibras proporcionam uma maior dificuldade de caracterização geométrica em relação à macrofibras constituídas de um monofilamento reto.

Figura 3.1 - Amostra da macrofibra A a) e seus elementos separados b); amostra da macrofibra B c) e seus elementos separados d)

3.2.2 Ensaios

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

3.2.2.1 Paquímetro

O uso do paquímetro foi considerado devido ao fato de que a norma europeia EN14889-2:2006 (AENOR, 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 europeia EN14889-2:2006 (AENOR, 2006) e tendo em conta a semelhança 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 que gera sua produção, não permite uma correta determinação do comprimento desenvolvido na condição tal qual se encontram (Figura 3.2a). Assim, optou-se por esticá-las previamente à medição de modo a se obter um valor mais acurado (Figura 3.2b). Nas macrofibras B, ao fazer a medição do comprimento, não havia influência da ondulação, como é característica da macrofibra A (Figura 3.2c). 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 3.2d), sendo que em cada ponto se obteve duas medidas ortogonais da seção transversal.

Figura 3.2 - 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)

3.2.2.2 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 *et al.*, 2008; DENG; KE, 2010; LI; YI; SHANG, 2012; ÖZNERGİZ *et al.*, 2014; CÁCERES *et al.*, 2015). Esta metodologia ainda tem a vantagem de fazer a medição direta 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 cautelosamente 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 3.3a. 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).

Figura 3.3 - Imagens digitalizadas a); com ajuste do contraste b); e prontas para avaliação c)

O tratamento das imagens seguiu o seguinte processo: primeiro, se ajustou o contraste com a ferramenta 'Threshold' (Figura 3.3b) 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 3.3c os pixels pretos representaram as macrofibras e os pixels brancos os vazios. Em seguida se utilizou a ferramenta 'Fill 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 três 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 3.3c).

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 amarelo no detalhe ampliado da Figura 3.4). 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 3.4). 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).

Figura 3.4 - Esqueleto da fibra. Note-se que no extremo da fibra se apresenta uma bifurcação.

3.2.2.3 Método da densidade

O método da densidade, que também é previsto pela norma europeia EN 14889-2:2006, é um método indireto e permite obter o diâmetro médio da macrofibra utilizando a Equação 3.1. 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.

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot m}{\pi \cdot \rho \cdot L}} \quad (3.1)$$

Para a estimação do diâmetro por este método se necessita do comprimento desenvolvido da macrofibra obtido por algum dos métodos aqui 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).

3.3 Resultados experimentais e análise

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

3.3.1 Paquímetro

A Tabela 3.2 apresenta o resumo dos resultados das características geométricas avaliadas com o paquímetro. As determinações individuais que foram obtidas em amostras de 60 macrofibras estão apresentadas no anexo 1. Para as macrofibras A e B, os resultados apresentados são: a média dos diâmetros medidos nos extremos e na seção intermédia das macrofibras (D_1); a média dos diâmetros medidos nos mesmos pontos, mas numa seção 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.

Tabela 3.2 - Resultados das medições com paquímetro.

MACROFIBRA A					
	D_1	D_2	D_e	L	λ
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
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	D_2	D_e	L	λ
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
Média	0,28	0,28	0,28	59,10	213,66
DP	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

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 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.

Como se mencionou anteriormente, as macrofibras A e B foram classificadas como Classe II segundo a norma europeia EN14889-2:2006 (AENOR, 2006). Esta norma estabelece que a variação máxima do diâmetro individual e do fator de forma individual em relação ao valor nominal é de $\pm 50\%$. Já a variação máxima do valor médio do diâmetro 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 (AENOR, 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, o valor da 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 (AENOR, 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 EN14889-2:2006 (AENOR, 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.

3.3.2 Imagens digitais

A Tabela 3.3 mostra os resultados das características geométricas das macrofibras avaliadas mediante as imagens digitais. As determinações individuais que foram obtidas em amostras de 60 macrofibras estão apresentadas no anexo 2. Para as macrofibras A e B os resultados apresentados são: o diâmetro médio obtido para a 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.

Tabela 3.3 - 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

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 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 3.5).

Figura 3.5 - Variação do diâmetro ao longo do comprimento da macrofibra A devido à torção.

Considerando os critérios de tolerâncias dimensionais da norma europeia EN14889-2:2006 (AENOR, 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 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 (AENOR, 2006) no que diz respeito ao comprimento e fator de forma.

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 (AENOR, 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.

3.3.3 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 3.4. Apresenta-se a densidade de cada amostra (ρ_i), 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.

Tabela 3.4 - Densidade das macrofibras utilizando picnômetro a gás hélio.

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

A Tabela 3.5 mostra os resultados das características geométricas das macrofibras A e B avaliadas com o método da densidade. As determinações individuais que foram obtidas em amostras de 60 macrofibras estão apresentadas no anexo 3. 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 3.1, 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.

Tabela 3.5 - Resultados das medições com o método da densidade.

MACROFIBRA A					MACROFIBRA B		
	Massa (g)	L_i (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 A		
	Massa (g)	L_i (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

Os valores médios da massa para cada macrofibras são de uma ordem de grandeza em relação à precisão da balança (0,0001 g). As massas da macrofibras 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 gerando conseqüentemente, 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 europeia EN14889-2:2006 (AENOR, 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 (AENOR, 2006), uma vez que o diâmetro nominal não foi declarado pelo fabricante. Ressalte-se que este dado é de fato importante e que deve ser exigida a sua declaração por parte do fabricante.

3.3.4 Representatividade da amostra ensaiada

Para cada método de medição o número de macrofibras avaliadas foi de 60. Porém, é necessário conhecer se esta amostra escolhida foi suficiente. Assim, fez-se a determinação do tamanho mínimo confiável da amostra de acordo ao estabelecido por Bussab e Morettin (2002), utilizando os valores estatísticos encontrados a partir das medições do comprimento e do diâmetro por cada um dos métodos avaliados. Para isto empregou-se a Equação 3.2, onde se têm: o número ou tamanho da amostra (n); a distribuição t (t); o desvio padrão (s); e o erro aceitável, correspondente a 10% do valor médio (e). Isto é, considerando o tamanho da amostra mínima, o valor médio obtido a partir dela atenderia o erro máximo aceitável de 10%.

Os valores de ' n ' encontrados para as macrofibras A e B, se apresentam na Tabela 3.6, onde se têm o número da amostra para as medições do comprimento (L) e do diâmetro (D).

$$n = \frac{\tau_{n-1}^2 \cdot s^2}{e^2} \quad (3.2)$$

Tabela 3.6 – Tamanho da amostra ' n ' segundo os valores estatísticos de medição.

Método de medição	Macrofibra A		Macrofibra B	
	L	D	L	D
Paquímetro	1	44	1	3
Imagens	1	18	1	5
Densidade	-	17	-	1

Dos valores de ' n ' encontrados, na determinação do comprimento e para ambas as macrofibras, apenas um exemplar é necessário para ter uma amostra representativa; tanto pelo método do paquímetro quanto pelas imagens digitais. Provavelmente, isto seja devido ao nível de controle durante a produção das macrofibras, onde se garante um corte uniforme do comprimento. Por outro lado, na determinação do diâmetro, a macrofibra A considerando todos os métodos, precisa de um maior número de elementos na amostra em comparação à macrofibra B. Isto pode ser devido a que a macrofibra B tem uma seção mais regular ao longo do comprimento do que a macrofibra A.

Da análise feita, frisa-se que a amostra escolhida de 60 unidades pode ser considerada suficiente e representativa, tanto na determinação do diâmetro como do comprimento, para ambas as macrofibras e para todos os métodos de avaliação.

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

3.4.1 Comparação dos comprimentos

A seguir são apresentadas as curvas de distribuição dos resultados obtidos do comprimento para cada tipo de macrofibra (Figura 3.6). Mostram-se as distribuições tanto pelo método do paquímetro, quanto pelo método de imagens digitais.

Figura 3.6 - Curvas de distribuição do comprimento das macrofibras A e B, respectivamente.

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 3.7a e Figura 3.7b). Atribui-se a existência de duas populações distintas à forma como foram coletadas as amostras. As macrofibras são fornecidas pelo fabricante na forma de grandes tarugos (grupo de macrofilamentos, Figura 3.7c). Durante a amostragem empregada neste experimento se 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 pelas imagens digitais.

Mediante a análise teste 't' pareado ao fazer a comparação do comprimento pelo método do paquímetro com o método de imagens digitais da macrofibra A, os resultados não apresentam diferenças significativas. Observa-se que a diferença das médias é praticamente zero. Este valor de diferença se encontra entre -0,11 mm e 0,18 mm com um 95% de confiança. 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 3.2b), aproximando-se assim os valores medidos entre os diferentes métodos.

No caso da macrofibra 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. O fato de ambos os valores serem negativos confirma que o comprimento da macrofibra B, pelo método do paquímetro, é sempre menor em relação ao obtido pelo 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 B 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 3.2c). 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, esticar a fibra para a medição é uma boa prática mesmo quando a macrofibra não apresenta tortuosidades.

Figura 3.7 - Histograma de distribuição do comprimento da macrofibra B, pelo método do paquímetro a); e pelo método de imagens digitais b); tarugo ou grupo de macrofibras tipo B c)

3.4.2 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 macrofibra 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 de maneira equivalente.

No caso da macrofibra 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 obtido 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 3.8) segundo os distintos métodos apresentados anteriormente: paquímetro, imagens digitais e densidade.

Figura 3.8 - Curvas de distribuição do diâmetro das macrofibras A e B pelos três métodos.

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, o 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.

No caso da macrofibra B (Figura 3.8) a distribuição do diâmetro não confirmou normalidade, também apresentando 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 se encaixa 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 0,315 mm e 0,322 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 3.8), 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 3.9. 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 micrômetro de precisão de 0,001 mm recomendado pela norma europeia EN14889-2:2006 (AENOR, 2006)) sempre se estará subestimando a seção devido ao direcionamento preferencial da macrofibra.

Figura 3.9 - Posições prováveis a); pouco prováveis b); e improváveis c); para a medição do diâmetro equivalente de uma macrofibra com seção elíptica.

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 3.10a).

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 3.10b) o que pode ser interpretado como uma macrofibra fechada na área de projeção durante o tratamento das imagens, levando também a uma superestimação de seu diâmetro.

Figura 3.10 - Variação do diâmetro projetado da macrofibra pelo método de imagens digitais a); seção da macrofibra com desfibrilamento que pode ser considerado como superestimação do diâmetro b)

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’.

3.5 Comentários finais

As seguintes conclusões podem ser extraídas dos resultados do capítulo:

- No que se refere ao comprimento, pode-se considerar os critérios das normas EN14889-2:2006 (AENOR, 2006) para a avaliação das macrofibras poliméricas como adequados e aplicáveis às macrofibras analisadas. 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 esticar 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. O estudo aqui apresentado demonstra que as metodologias são aplicáveis, com preferência pelo método do paquímetro para a medida do comprimento da fibra e da densidade para a determinação de seu diâmetro médio em função da maior facilidade de aplicação em conjunto com a confiabilidade da medida.

4 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE MACROFIBRAS POLIMÉRICAS

4.1 Introdução

No Capítulo 3 foram estudados os métodos de caracterização geométrica; isto compreende os métodos de determinação do diâmetro médio da seção transversal das macrofibras, além de seu comprimento. A determinação da área da seção transversal é fundamental na determinação do comportamento mecânico de macrofibras poliméricas, conforme se indicou no Capítulo 2, e é parte essencial da análise experimental deste capítulo.

Em vista disso, no presente estudo serão avaliadas as propriedades mecânicas de resistência à tração e rigidez (módulo de elasticidade) das macrofibras, pois o objetivo é verificar o desempenho do material para fins de reforço estrutural. Além disso, como parte do ensaio de caracterização mecânica, e com objetivo de conhecer além dos resultados obtidos, se teve a idéia de saber como é influenciada a tensão máxima das macrofibras pelo efeito abrasivo gerado durante a mistura desta junto com agregado em betoneira, o que é uma prática corriqueira de mistura do material. Assim, desenvolveram-se os ensaios de tração tanto em macrofibras em condições normais quanto misturadas.

4.2 Metodologia experimental

Nesta seção são apresentadas as macrofibras avaliadas no experimento, bem como uma descrição da preparação das amostras, do processo de mistura e, finalmente, os ensaios utilizados para a caracterização mecânica. Os tipos de macrofibras utilizados na caracterização foram denominados A e B, os quais são os mesmos já detalhados no Capítulo 3. Salienta-se que, para que a caracterização mecânica das fibras seja bem feita, é fundamental caracterizar previamente com precisão a sua geometria, especialmente a sua seção transversal.

4.2.1 Caracterização geométrica: área da seção transversal

Previamente aos ensaios de tração, foi feita a determinação da área da seção transversal das macrofibras. Já que o limite de resistência à tração de um material é calculado ao dividir a carga máxima suportada pela área da seção transversal inicial.

A seção da macrofibras pode variar consideravelmente de uma macrofibras para outra, como também mesmo ao longo do comprimento de uma macrofibras individual (BENTUR; MINDESS, 2007). Além disso, também foi demonstrado no capítulo anterior que a sua determinação pode apresentar, por si, uma variação que pode interferir na precisão da determinação das tensões. Por essa razão, é primordial que o ensaio de tração seja realizado após uma caracterização geométrica precisa. Os ensaios de resistência à tração foram feitos em macrofibras de fios unitários; e para a determinação da tensão máxima se fez a medição da área transversal individual de cada macrofibras, o que garantiu um resultado mais exato.

Para determinar esta área, fez-se a determinação do diâmetro equivalente das macrofibras em condições normais e misturadas por três metodologias: medição com paquímetro, medição por imagens digitais, e pelo método da densidade; conforme indicado no Capítulo 3. Previamente à determinação da área, fez-se uma seleção aleatória de 10 macrofibras por cada tipo. O objetivo foi conhecer e mostrar como se vê afetado o valor da tensão máxima à tração das macrofibras em função de cada método empregado para a determinação de sua seção transversal.

Cabe ressaltar que, na determinação do diâmetro pelo método de imagens digitais e, em especial no caso das macrofibras misturadas, se teve que empregar um maior tempo no tratamento e digitalização das imagens, uma vez que as seções destas macrofibras, em várias partes, ficaram muito alteradas e irregulares pelo processo do desfibrilamento. Este fato originou distorção ao determinar os limites ou contorno da seção das macrofibras por este método. Então, houve uma maior atenção para não considerar essas áreas como parte do diâmetro.

4.2.2 Mistura das macrofibras

Para o estudo da influência da mistura nas macrofibras, primeiramente, estas foram submetidas ao efeito abrasivo dos agregados em uma betoneira de 120 litros. Para bater as macrofibras utilizou-se agregado grosso (pedrisco) em uma quantidade de 12 litros (10% da capacidade da betoneira), sendo a quantidade de macrofibra utilizada de aproximadamente 0,5% em volume de agregado solto. A escolha deste teor ocorreu porque é um teor médio, habitualmente usado com este tipo de macrofibra no CRF, correspondendo a um consumo de cerca de 4,5 kg/m³.

Uma vez colocado o agregado e com a betoneira em movimento, as macrofibras foram adicionadas tal qual são fornecidas pelo fabricante. Elas foram lançadas aos poucos para evitar possíveis embolamentos; este procedimento é o mesmo que se utiliza na elaboração do CRF segundo a recomendação japonesa JSCE-SF1 (1984). Uma vez terminado este processo, se deixou girar a betoneira durante 5 minutos, para que as macrofibras fossem batidas com os agregados.

Percebeu-se que as macrofibras se acumulam na vizinhança dos agregados, entrelaçando os grãos de alguma forma, como se observa na Figura 4.1. Devido a este fato as macrofibras obtêm uma geometria irregular, com desfibrilamentos, curvaturas e tortuosidades ao longo do comprimento.

Observou-se também que ainda permaneciam feixes agrupados de fibras após a mistura. Portanto, com a intenção de se avaliar a distribuição de separação das fibras que compõem os feixes, fez-se uma contagem do total de fibras soltas de uma quantidade de 2 litros de material misturado (pedrisco mais macrofibras). Dessa maneira, para a macrofibra A, encontraram-se 52 fios unitários, 106 feixes de dois fios, 20 feixes de três fios, 27 feixes de quatro fios, três feixes de seis fios e oito cordas de aproximadamente 20 feixes. Este último grupo, por sua vez, continha em torno de três fios agrupados. Então, pode-se afirmar que apenas 6% do total de fibras estavam presentes na forma de fios unitários. No caso da macrofibra B, foram encontrados 208 fios unitários, 101 feixes de dois fios e dez feixes de três fios. Assim sendo, para esta macrofibra, a grande maioria dos fios unitários foi liberada durante a mistura, representando 47% do total. Estes resultados irão proporcionar uma melhor condição de análise do potencial de degradação das fibras durante a mistura que está mais bem discutido no item 4.4.3.1.

Finalmente, após misturar as macrofibras com o pedrisco, se fez uma seleção aleatória de 10 fibras, tanto para a macrofibra A como para a macrofibra B, as quais foram lavadas e secas cuidadosamente, para evitar qualquer interferência na avaliação provocada pelas partículas de pó aderidas a sua superfície. Depois se procedeu à caracterização geométrica e mecânica das mesmas.

Figura 4.1 – Macrofibras poliméricas entrelaçando os grãos do agregado grosso após batimento.

4.2.3 Preparação dos corpos de prova

Foi necessário desenvolver uma metodologia própria, a qual consistiu em colar as macrofibras em placas feitas de tecido têxtil. Com esta proposta de avaliação se pretende fazer o ensaio de tração das macrofibras no verdadeiro formato em que estas chegam à obra, os quais são fios que têm um comprimento por volta de 60 mm, e não depender de fios de maior comprimento fornecidos exclusivamente pelos fabricantes, como prescrevem alguns métodos de ensaio.

Para desenvolver a caracterização mecânica das macrofibras poliméricas, pelo fato de não ter-se referência ou normativa a respeito no Brasil, procurou-se seguir o mais aproximadamente possível as recomendações da norma ASTM C1557-03: 2008, que é uma norma de ensaio de tração de fibras em geral. Esta norma estabelece colar as fibras em molduras, e indica que o comprimento total da fibra colada tem que ser 1,5 vezes maior que o vão central livre da moldura, para facilitar a manipulação e aperto permanente na região onde a fibra é colada. Porém, não se prescreve outras dimensões da moldura.

Foi necessário desenvolver uma moldura de fixação da fibra porque isto permitiu uma maior aderência e atrito quando a macrofibra é ensaiada, evitando assim que escorregue das garras da prensa. Ademais, serve como guia ou referência para alinhar a macrofibra coaxialmente às garras da máquina de ensaio e, conseqüentemente, ao seu eixo de aplicação de cargas.

Inicialmente foram feitas algumas tentativas que acabaram resultando em escorregamento das macrofibras, sem que as mesmas rompessem durante o ensaio. Com isso, não havia possibilidade de caracterização efetiva da resistência mecânica do material. Então, foram elaborados distintos sistemas de molduras para colagem das macrofibras que variaram quanto às dimensões e ao material utilizado, como se observa na Figura 4.2a. Finalmente, se chegou a um sistema de moldura constituído de tecido têxtil, o qual permitia boa aderência com a macrofibra colada, devido à textura superficial e aos vazios que o tecido apresenta na sua estrutura, como se mostra na Figura 4.2b.

Figura 4.2 - Diferentes formatos de molduras, para fazer o ensaio de tração de macrofibras poliméricas a); e moldura definitiva feita de tecido têxtil b)

As dimensões adotadas para as molduras que atuaram como suporte das fibras são aquelas apresentadas na Figura 4.3a. Estas dimensões são adequadas para uma macrofibra que tem um comprimento por volta de 60 mm. Escolheu-se um vão menor, da ordem de 10 mm, para garantir que tenham um maior comprimento embutido nas extremidades da moldura, e que permitam uma firme aderência com as garras da prensa, e desta forma não escorregassem.

Antes de colar as macrofibras, lixaram-se cautelosamente as suas superfícies nas extremidades, para que as mesmas tivessem maior aderência à cola e à moldura. Procurou-se, desta maneira, também evitar que as macrofibras se

soltassem das garras da prensa. Na parte posterior das molduras, colaram-se pequenas placas de tecido, as dimensões destas placas se mostram na Figura 4.3b. O objetivo foi cobrir as extremidades das macrofibras e, assim, incrementar a aderência (área hachurada da Figura 4.3c) bem como evitar endentamentos por parte das garras da prensa.

A cola sintética utilizada deve ser suficientemente forte para evitar que a macrofibra escorregue durante o processo de tração. Para o caso do estudo foi usada uma cola sintética composta de éster de cianoacrilato. É preciso ressaltar que se fizeram marcas no eixo central das placas da moldura de tal jeito que permitissem que as macrofibras fossem coladas coaxialmente com a linha de ação de cargas da máquina de ensaio (linha vertical continua da Figura 4.3c). Com isso procurou-se evitar qualquer desalinhamento ou torção que tendesse a induzir a erros na medição. Após fazer o processo de colagem das macrofibras deixou-se o conjunto um tempo necessário para que a cola endurecesse.

Figura 4.3 - Dimensões da moldura em milímetros (mm) a); Pequenas placas coladas na parte posterior b); Fibra colada na moldura e local de corte c)

4.3 Ensaios

O presente estudo se limita a avaliação mecânica das macrofibras mediante o ensaio de resistência a tração, o qual define a carga máxima, a tensão máxima ou

resistência do material e, estima o valor de seu módulo de elasticidade mediante as curvas tensão por deformação.

4.3.1 Resistência à tração

Os ensaios de resistência à tração foram conduzidos em uma máquina universal de ensaios Instron, modelo 5569, como se observa nas Figuras 4.5. A velocidade de aplicação da carga foi 0,5 mm/min, e a capacidade da célula foi de 1 KN.

Previamente ao ensaio, o conjunto (moldura com macrofibra colada), foi colocado cuidadosamente entre as garras da prensa (Figura 4.4a). Logo, se fez cuidadosamente o corte das laterais das molduras (Figura 4.4b), nas linhas tracejadas dentro do círculo da Figura 4.3c, para que apenas a macrofibra fosse tracionada. Assim, o sistema poderia ser considerado pronto para realizar o procedimento de ensaio de tração, sendo o corpo submetido ao ensaio (Figura 4.4c). É preciso frisar, que o maior cuidado deve ser exercido a fim de garantir que todas as amostras sejam preparadas exatamente da mesma maneira de modo a se atingir máximo grau de uniformidade em detalhes de preparação, tratamento e manuseio.

Figura 4.4 - Ensaio de tração de macrofibra polimérica: conjunto colado nas garras da prensa a); corte das laterais da moldura b); Desenvolvimento do ensaio de tração na macrofibra.

Durante as etapas de carregamento, à medida que se aumento a tensão aplicada, os filamentos da macrofibra romperam-se parcialmente, como se observa na Figura 4.5a, ficando ao final na região central apenas uma parcela restante de

filamentos ainda não rompidos, como se observa na Figura 4.5b. Assim, ao invés de romper por formação de uma superfície de fratura transversal, foi confirmando que o desfibrilamento era o mecanismo de ruptura preponderante. Isto significa que a macrofibra se rompe em inúmeros microfilamentos, pela quebra de ligações entre estes elementos.

Figura 4.5 - Macrofibra tracionada durante o ensaio (desfibrilamento) a); Fibras desfibriladas após ensaio b)

4.3.2 Módulo de elasticidade

Para a determinação do módulo foram utilizadas as curvas tensão por deformação, obtidas ao considerar a tensão em função do diâmetro pelo método da densidade. Para esse fim se traçou uma linha reta tangente, na região linear da curva, a qual estava invariavelmente associada a baixas deformações.

Para traçar a linha tangente, escolheram-se as tensões correspondentes a 5% e 30% da tensão máxima e suas deformações respectivas. Assim, o módulo de elasticidade foi obtido a partir da razão entre a variação de tensão e a variação da deformação nesse intervalo.

Julgou-se necessário o valor de 5% da tensão máxima como limite inferior da região linear, para evitar a região da acomodação inicial do ensaio. Esta região é um produto do acomodamento do corpo de prova às garras ao ser submetido às cargas de tração. Por outra parte, considerou-se 30% o limite superior, já que é um valor característico na determinação do módulo em distintos materiais, como o concreto.

4.4 Resultados e análise

Nesta seção são apresentados os resultados de carga máxima atingida no ensaio de tração direta, área da seção transversal, resistência à tração, e módulo de elasticidade das macrofibras ensaiadas.

4.4.1 Tração direta das macrofibras

Os resultados obtidos no ensaio de tração direta das macrofibras em termos de curvas individuais de carga por deslocamento se encontram apresentados na Figura 4.6. Destas curvas foram obtidos os valores de carga máxima para ambos os tipos de fibras, tanto em condições normais quanto misturadas. Estes valores são apresentados na Tabela 4.1:

Figura 4.6 – Curvas de carga por deformação: macrofibra A (em condições normais) a); macrofibra A (misturadas) b); macrofibra B (em condições normais) c); macrofibra B (misturadas) d)

Tabela 4.1 – Cargas máximas das macrofibras em condições normais e misturadas.

	Macrofibras normais		Macrofibras misturadas	
	A (N)	B (N)	A (N)	B (N)
Média	48,64	53,02	51,07	42,43
DP	2,94	1,88	8,01	2,52
CV (%)	6%	4%	16%	6%
N	10	10	10	10
max	54,28	56,47	63,96	45,90
min	45,10	49,62	37,83	39,25

Dos valores de carga máxima é possível depreender que, no caso das macrofibras em condições normais, a macrofibra B apresentou a maior carga máxima, atingindo a média de $53,02 \pm 1,88$ N, a qual é 9% superior ao valor médio da carga máxima da macrofibra A, que foi de $48,64 \pm 2,94$ N. Avaliando-se o efeito de mistura, foi observado que não houve variação expressiva para a macrofibra A, que apresentou um valor de carga máxima média de $51,07 \pm 8,01$ N. Ou seja, houve inclusive um incremento de 5%. No caso da macrofibra B, houve sim diminuição do valor da carga média, mostrando uma queda de 20 %, passando para um valor de $42,43 \pm 2,52$ N. Assim, pode-se concluir que a capacidade resistente total das macrofibras foi afetada de maneira distinta. Dessa forma, é importante verificar como a análise de tensões pode influenciar na análise deste efeito de mistura.

4.4.2 Áreas transversais das macrofibras

A seguir na Tabela 4.2 se apresentam os resultados das áreas transversais de um total de 10 macrofibras em condições normais e 10 macrofibras misturadas. As determinações foram feitas a partir da medição do diâmetro da área por três métodos: paquímetro, imagens digitais, e densidade. Ressalta-se que foram mensuradas exatamente as mesmas macrofibras que se ensaiaram à tração direta.

Tabela 4.2 – Áreas transversais das macrofibras segundo o diâmetro por diversas metodologias.

MACROFIBRAS EM CONDIÇÕES NORMAIS				MACROFIBRAS MISTURADAS			
Macrofibra A	Paquímetro S (mm ²)	Imagens S (mm ²)	Densidade S (mm ²)	Macrofibra A	Paquímetro S (mm ²)	Imagens S (mm ²)	Densidade S (mm ²)
Média	0,09	0,13	0,10	Média	0,11	0,14	0,13
DP	0,01	0,02	0,01	DP	0,02	0,02	0,01
CV (%)	11%	17%	9%	CV (%)	15%	17%	10%
N	10	10	10	N	10	10	10
max	0,10	0,18	0,11	max	0,12	0,16	0,12
min	0,07	0,10	0,08	min	0,07	0,08	0,09

Macrofibra B	Paquímetro S (mm ²)	Imagens S (mm ²)	Densidade S (mm ²)	Macrofibra B	Paquímetro S (mm ²)	Imagens S (mm ²)	Densidade S (mm ²)
Média	0,06	0,08	0,08	Média	0,11	0,11	0,11
DP	0,00	0,01	0,00	DP	0,01	0,01	0,00
CV (%)	5%	12%	3%	CV (%)	6%	8%	3%
N	10	10	10	N	10	10	10
max	0,07	0,10	0,08	max	0,09	0,10	0,09
min	0,06	0,07	0,07	min	0,07	0,07	0,07

Da Tabela 4.2 comparando a distribuição das áreas das seções transversais, para as macrofibras em condições normais, as menores áreas foram obtidas a partir do diâmetro obtido pelo paquímetro. Os valores obtidos foram de $0,09 \pm 0,01 \text{ mm}^2$ para a macrofibra A, e de $0,06 \pm 0,00 \text{ mm}^2$ para a macrofibra B. As maiores áreas foram obtidas a partir do diâmetro obtido pelo método de imagens digitais. Além disso, as áreas obtidas por este método apresentaram a maior variação: as áreas foram de $0,13 \pm 0,02 \text{ mm}^2$ para a macrofibra A, e de $0,08 \pm 0,01 \text{ mm}^2$ para a macrofibra B. O método da densidade se encontra em uma condição média e com menor variação. Os resultados foram de $0,10 \pm 0,01 \text{ mm}^2$ para a macrofibra A, e de $0,08 \pm 0,01 \text{ mm}^2$ para a macrofibra B.

Desta forma se confirma o concluído no Capítulo 3, onde também se caracterizou geometricamente macrofibras em condições normais, e se observou que o método da densidade é o mais recomendável para obter o valor do diâmetro médio uma vez que não é afetado pela forma de como as imagens são obtidas, como acontece no método de imagens digitais. O método da densidade também não é afetado pela pressão que exercem as garras do paquímetro e, assim, este método também é aconselhável para determinar a área da seção transversal.

Na macrofibra misturada A, as áreas determinadas a partir do diâmetro pelas imagens digitais foram as maiores, da ordem de $0,14 \pm 0,02 \text{ mm}^2$, além de possuírem o maior coeficiente de variação de 17%. Isto foi devido a que as imagens

ficaram muito alteradas pela abrasão que sofreram. A alta variação ocorreu mesmo tendo-se empregado um maior cuidado na digitalização, de modo a não considerar regiões com desfibrilamento como parte da seção. As áreas obtidas pelo paquímetro foram de $0,11 \pm 0,02 \text{ mm}^2$, com uma variação de 15%, sendo os menores valores obtidos. Isto confirmou uma vez mais que a pressão exercida pelas garras deste instrumento induz a uma subestimação da seção medida. Com o método da densidade obteve-se a área de $0,13 \pm 0,01 \text{ mm}^2$. Isto é um valor médio entre os dois métodos anteriores, além disto, apresentou uma menor variação de 10%.

Quanto à macrofibra misturada B, as áreas obtidas a partir dos três métodos de determinação do diâmetro são praticamente iguais. As áreas obtidas pelo paquímetro e pelas imagens digitais têm um valor semelhante de $0,11 \pm 0,01 \text{ mm}^2$, sendo os coeficientes de variação de 6% e de 8%, respectivamente. As áreas obtidas pela densidade mostram um valor médio de $0,11 \pm 0,00 \text{ mm}^2$ e apresentam um menor coeficiente de variação, da ordem de 3%. A maior variação obtida quando da utilização do método das imagens digitais é devida a que, na digitalização, se consideraram como parte da seção todos os pequenos filamentos que começaram a desfibrilar ao longo do comprimento durante a mistura da fibra com os agregados. Já no caso do paquímetro a maior variação obtida confirma novamente a influência do operador nas medições.

Dos parágrafos anteriores, conclui-se que as áreas das macrofibras misturadas obtidas a partir do diâmetro determinado pelo método da densidade mostraram a menor variação. Já que este método não tem muita influência das regiões que apresentam abundante desfibrilamento pela abrasão, como acontece nas imagens digitais, além de não ser influenciado pela tendência do operador de pressionar as garras do paquímetro, foi então considerado como o método adequado para ser utilizado na determinação das tensões aplicadas às fibras.

4.4.3 Resistência à tração das macrofibras

A seguir na Tabela 4.3 são apresentados os resultados das tensões máximas tanto das macrofibras em condições normais, quanto misturadas. Para determinar as tensões foram utilizados os valores das cargas do ensaio de tração direta da Figura

4.6 e as áreas das seções transversais da Tabela 4.2. Embora se tenha dito que a área obtida a partir do diâmetro pela densidade é a que apresenta a menor variação, aqui é apresentada a título de ilustração, os resultados de tensão em função da área obtida pelos três métodos de determinação do diâmetro. Uma vez que nos permite conhecer como variam os valores da tensão máxima em função do método empregado. Frisa-se que é importante ter um método de determinação da área da seção transversal que não apresente muita variação na macrofibra.

Como se observa nos resultados apresentados na Tabela 4.3, o valor da tensão máxima é grandemente influenciado pela forma de como se fez a medição do diâmetro da área; assim se pode ter variações de mais de 200 MPa para um mesmo tipo de macrofibra, quando se compara a medição feita entre um método e outro. Esta variação ocorre tanto nas macrofibras em condições normais, quanto nas misturadas.

Tabela 4.3 – Tensões máximas das macrofibras de acordo aos diâmetros por diversas metodologias.

MACROFIBRAS EM CONDIÇÕES NORMAIS				MACROFIBRAS MISTURADAS			
Macrofibra A	Paquímetro σ (MPa)	Imagens σ (MPa)	Densidade σ (MPa)	Macrofibra A	Paquímetro σ (MPa)	Imagens σ (MPa)	Densidade σ (MPa)
Média	562,28	376,66	510,49	Média	579,79	450,85	481,50
DP	78,38	72,35	66,26	DP	103,64	93,79	35,88
CV (%)	14%	19%	13%	CV (%)	18%	21%	7%
N	10	10	10	N	10	10	10
max	696,08	503,20	616,22	max	791,74	641,31	545,60
min	455,66	253,72	427,46	min	456,05	333,59	433,47
Macrofibra B	Paquímetro σ (MPa)	Imagens σ (MPa)	Densidade σ (MPa)	Macrofibra B	Paquímetro σ (MPa)	Imagens σ (MPa)	Densidade σ (MPa)
Média	817,25	660,28	680,00	Média	522,93	496,80	537,29
DP	31,42	79,75	23,82	DP	49,07	59,19	35,68
CV (%)	4%	12%	4%	CV (%)	9%	12%	7%
N	10	10	10	N	10	10	10
max	874,50	763,38	723,11	max	618,99	599,19	603,89
min	775,29	554,25	646,39	min	458,84	417,27	469,52

Nas macrofibras normais a maior tensão foi obtida quando se determinou a área a partir do diâmetro pelo paquímetro; para a macrofibra A foi de $562,28 \pm 78,38$ MPa, e para a macrofibra B foi de $817,25 \pm 31,42$ MPa. A menor tensão foi obtida ao considerar a área a partir do diâmetro pelas imagens digitais; para a macrofibra A foi de $376,66 \pm 72,35$ MPa, e para a macrofibra B foi de $660,28 \pm 79,75$ MPa. Enquanto a área obtida a partir do diâmetro pela densidade permaneceu em valores

intermediários sendo, para a macrofibra A de $510,49 \pm 66,26$ MPa, e para a macrofibra B foi de $680,00 \pm 23,82$ MPa. Isto comprova a importância da definição do critério de determinação da área da seção transversal.

Quanto à macrofibra misturada A, a maior tensão foi obtida com a área a partir do diâmetro pelo paquímetro, a tensão foi de $579,79 \pm 103,64$ MPa. Naturalmente, isto ocorre porque, como foi demonstrado no capítulo anterior, o paquímetro subestima o diâmetro da fibra e a área da seção transversal, o que implica numa superestimação da tensão calculada. O menor valor obtido foi de $450,85 \pm 93,79$ MPa, determinado a partir da área pelo método das imagens digitais. Ao se determinar a área pelo método da densidade tem-se um valor intermediário de $481,50 \pm 35,88$ MPa. Em relação à macrofibra misturada B as tensões não variaram muito, uma vez que as áreas pelos três métodos de determinação dos diâmetros são quase iguais. As tensões obtidas a partir da área determinada a partir do método do paquímetro e pela densidade, foram de $522,93 \pm 49,07$ MPa e de $537,29 \pm 35,68$ MPa, respectivamente. Pelas imagens digitais, a tensão diminuiu para $496,80 \pm 59,19$ MPa, devido a que o desfibrilamento superestima a seção da macrofibra obtida por este método, o que gera uma subestimação da tensão.

Para cada condição avaliada, o número de macrofibras utilizadas foi de 10 unidades. Porém, é importante conhecer se a amostra escolhida foi suficiente, ou se seria necessário ainda ensaiar mais amostras à tração, para se ter resultados mais confiáveis de tensão. Assim, fez-se a determinação do tamanho da amostra de acordo ao estabelecido por Bussab e Morettin (2002), com os valores estatísticos de tensão encontrados a partir das áreas pelos três métodos de obtenção do diâmetro. Isto se fez mediante a Equação 3.2. Assim, os valores de 'n' encontrados para as macrofibras A e B em condições normais e misturadas, se apresentam na Tabela 4.4. Para o cálculo destes valores empregou-se os valores estatísticos da tensão da Tabela 4.3.

Tabela 4.4 – Tamanho da amostra de acordo ao método empregado para determinar a tensão.

Método de medição	Macrofibras normais		Macrofibras misturadas	
	A	B	A	B
Paquímetro	10	1	16	5
Imagens	19	7	22	7
Densidade	9	1	3	2

Para a macrofibra A, em condições normais ou misturadas, o número mínimo de unidades na amostra para determinar a tensão através das áreas obtidas pelas imagens digitais e pelo paquímetro precisa ser maior do que 10 para que sejam representativas. Quanto às tensões determinadas a partir da área obtida pelo método da densidade, a amostra de 10 unidades já pode ser considerada suficiente. Para a macrofibra B, em todos os casos, a amostra escolhida de 10 é suficiente para obter resultados confiáveis. O número menor de amostras demandada para a macrofibra B pode ser devido a, provavelmente, ao fato da macrofibra B apresentar uma geometria bem mais regular ao longo do comprimento, em comparação à macrofibra A, como foi discutido no Capítulo 3. Isto facilita a determinação da área da seção transversal e diminui o erro intrínseco ao ensaio. Frisa-se também que em todos os casos, o método da densidade é o que apresenta o menor número de unidades na amostra para obtenção de resultados confiáveis. Isto, uma vez mais, demonstra a robustez deste método e a sua adequação para futura normalização.

4.4.3.1 O efeito da mistura na resistência à tração das macrofibras

Na Figura 4.7, são mostradas às curvas de tensão por deformação das macrofibras em condições normais e misturadas. Aqui estão apresentadas as curvas correspondentes às tensões determinadas pelo método da densidade. A deformação específica foi considerada dividindo-se a deformação total lida pelo comprimento de fibra livre na janela da moldura de ensaio. Não houve dispositivo de medida de deformação acoplado à fibra por indisponibilidade de equipamento. Em cada avaliação foram utilizadas dez macrofibras individuais (curvas de cor clara), também se apresentam os gráficos das curvas médias para cada condição (curvas de cor escura). Para analisar o efeito da mistura nas macrofibras, apenas foram consideradas as tensões máximas a partir da área pelo diâmetro da densidade. Assim evitaram-se superestimações ou subestimações das tensões, conforme discutido anteriormente.

Figura 4.7 – Curvas médias de tensão por deformação específica: macrofibra A (em condições normais) a); macrofibra A (misturadas) b); macrofibra B (em condições normais) c); macrofibra B (misturadas) d)

Das curvas médias dos gráficos de tensão por deformação apresentadas na Figura 4.7, pode-se constatar visivelmente que o efeito abrasivo diminuiu a tensão máxima de ambas as macrofibras. Portanto, fez-se a comparação entre os resultados de tensão em condições normais e batidas. Na macrofibra A, em condições normais, a tensão máxima média foi $510,49 \pm 66,26$ MPa, e após ser misturada, diminuiu para $481,50 \pm 35,88$ MPa, configurando uma queda de 6% no valor médio. Ressalte-se que este efeito de redução da capacidade resistente da fibra não é observado quando se analisa meramente a carga máxima como ocorreu no item 4.4.1. Isto pode estar associado a uma influência no critério de determinação da área da seção transversal que, neste caso, foi baseado no método da densidade. Ou seja, pequenas ramificações laterais da fibra, provocadas pelo efeito da mistura, irão produzir uma superestimação da seção transversal que, efetivamente, irá resistir ao esforço aplicado.

No caso da macrofibra B em condições normais a tensão máxima na média foi de $680,00 \pm 23,82$ MPa, e após misturada caiu para $537,29 \pm 35,68$ MPa,

portanto houve uma diminuição de 20%. Este nível de redução de capacidade resistente foi exatamente igual ao encontrado na avaliação das cargas máximas apresentadas no item 4.4.1. O que comprova, para este caso, que não há influência do critério de determinação da área da seção transversal na determinação da tensão última.

É provável que a menor diminuição da tensão que se obteve para a macrofibra A, seja devido a que são fornecidas em feixes agrupados em formato de corda (Figura 3.1a), os quais são constituídos por várias fibras que, por sua vez, contêm entre um e três filamentos agrupados entre si. O conjunto de macrofibras em formato de corda ao ser jogado ao concreto, aos poucos vai liberando os feixes e os filamentos, mas percebeu-se, em várias partes da mistura, que ainda permanecem feixes agrupados. Como se observou no item 4.2.2, apenas 6% das macrofibras misturadas, foram separadas completamente em filamentos unitários.

Este fato permite supor que as macrofibras que pertencem a esse conjunto de feixes, não sofram o efeito abrasivo do agregado com a mesma intensidade que a macrofibra B, já que as macrofibras A da parte externa da corda ou seus filamentos externos protegem as internas durante a mistura. Desse modo a estrutura das macrofibras permanece mais conservada após serem misturadas na betoneira. Na Figura 4.8a e na Figura 4.8b se mostra a imagem de uma macrofibra A antes e após ser misturada.

Além disso, observa-se que a macrofibra A em condições normais apresenta maior deformação. Este fato pode ser devido a que a fibra ensaiada ainda parece apresentar microfilamentos agrupados longitudinalmente; então, ao submeter carga, aos poucos estes microfilamentos vão se separando e rompendo gradativamente. Por outro lado, quando a macrofibra é misturada, o efeito abrasivo de alguma forma já desgastou ou rompeu vários destes filamentos, portanto a fibra ensaiada não rompe gradativamente, apresentando uma menor deformação.

Quanto à macrofibra B depois de batida, mostra numerosos microfilamentos que começam a desfibrilar ao longo da sua superfície. Isto pode ser a causa da maior diminuição da resistência (20%) que se observou para o caso destas fibras após serem misturadas. Atribui-se também o maior dano observado nesta fibra ao fato de que as mesmas, apesar de virem agrupadas em pequenos feixes constituídos apenas por dois ou no máximo três fios, não são fornecidas em formato de corda e têm dispersão mais rápida na mistura.

Portanto, durante a mistura os filamentos da macrofibra B são liberados facilmente, e, dessa forma, sofrem rapidamente o desgaste resultante do efeito abrasivo dos agregados na betoneira. Isto é confirmado pela avaliação realizada no item 4.2.2, onde do total de fibras misturadas, 47% são liberadas em fios unitários. Na Figura 4.8c e na Figura 4.8d observa-se a imagem de uma macrofibra B antes e após ser misturada com os agregados. Além disso, a macrofibra B tem menor diâmetro, e se o mesmo dano fosse gerado para ambas as macrofibras, ela apresentaria maior redução da tensão, porque a área seria provavelmente mais afetada que a da macrofibra A.

Também se observou que a deformação máxima atingida foi semelhante tanto para a macrofibra B em condições normais quanto misturadas. Fato que demonstra que as fibras ensaiadas não vêm agrupadas por filamentos longitudinais que rompem gradativamente e, portanto, rompem mais uniformemente, apresentando uma menor deformação.

Frisa-se que, apesar de a macrofibra B mostrar uma maior diminuição da tensão, a tensão máxima desta depois de misturada, de $537,29 \pm 35,68$ MPa, ainda é superior à tensão máxima da macrofibra A ($481,50 \pm 35,88$ MPa). Finalmente, verificou-se que cada macrofibra apresenta desfibrilamento após ser misturada, como se observa na Figura 4.8c e na Figura 4.8d. Isto está de acordo com indicado em alguns estudos que comentam a respeito de macrofibras poliméricas fabricadas com a capacidade de dividir-se em múltiplos filamentos quando são misturados com os ingredientes do concreto (BENTUR; MINDESS; VONDRAN, 1989; NANNI; MEAMARIAN, 1991; TROTTIER; MAHONEY, 2001).

Figura 4.8 – Imagens ampliadas: macrofibra A em condições normais a); macrofibra A depois de misturada b); macrofibra B em condições normais c); macrofibra B depois de misturada d)

4.4.4 Módulo de elasticidade

Os resultados dos módulos de elasticidade para ambos os tipos de macrofibras em condições normais e misturadas, se mostram na Tabela 4.5. Os módulos foram obtidos a partir das curvas tensão por deformação apresentadas na Figura 4.7.

Tabela 4.5 – Módulo de elasticidade das macrofibras em condições normais e misturadas.

	Macrofibras normais		Macrofibras misturadas	
	A (GPa)	B (GPa)	A (GPa)	B (GPa)
Média	3,42	3,62	2,90	2,91
DP	0,51	0,36	0,45	0,25
CV (%)	15%	10%	16%	9%
N	10	10	10	10
max	4,18	4,24	3,50	3,18
min	2,74	2,84	2,20	2,36

Inicialmente, deve-se frisar que os valores obtidos ficaram abaixo do indicado pelos fabricantes. O fato é que o módulo indicado pelos fabricantes é determinado através do ensaio de fios originais, com grande comprimento, e medida de deformação por análise de imagem diretamente no fio. No ensaio aqui desenvolvido, a extensão livre de fibra é muito pequena e se mediu a deformação diretamente pelo deslocamento da máquina de ensaio. Com isso, há uma tendência de incorporar nessas deformações todas as acomodações das fibras nas garras bem como os pequenos escorregamentos. Desse modo, a deformação medida tende a ser superestimada em relação àquela medida nos fios, isolando deformações extrínsecas do ensaio. Assim, conclui-se que este método de ensaio subestima o valor do módulo de elasticidade da macrofibra polimérica.

Não obstante, na pesquisa anterior realizada por Salvador (2012), na qual foram ensaiados filamentos de maior comprimento (da ordem de 500 mm e com comprimento útil de 250 mm) da mesma macrofibra A. O valor médio obtido do módulo de elasticidade foi de $2,63 \pm 0,09$ GPa, o qual inclusive é menor que o resultado obtido na presente pesquisa para esse tipo de macrofibra ($3,42 \pm 0,51$ GPa). Isto significa que ainda há a necessidade de desenvolver mais investigação a respeito.

Por outro lado, nas curvas de tensão por deformação apresentadas na Figura 4.8, observa-se claramente dois níveis de rigidez para o caso da macrofibra B. A mesma apresenta um módulo de elasticidade maior inicialmente e, após atingir uma tensão de, aproximadamente, 200 MPa, ocorre uma flexibilização do material. Isto pode estar associado a acomodações e danos gerados na estrutura interna do material cuja avaliação é complexa. Assim, para efeito do presente estudo, será considerado unicamente o módulo obtido a partir da linha reta que une os pontos correspondentes a 5% a 30% da tensão máxima atingida. Isto faz com que o módulo de elasticidade medido neste ensaio corresponde ao trecho de menores deformações, ou seja, maior módulo de elasticidade, uma vez que o valor de 30% ainda está inserido no primeiro trecho linear.

Sendo assim, as macrofibras após serem misturadas, apresentam uma diminuição do valor do módulo de elasticidade. Na macrofibra A, o módulo em condições normais foi de $3,42 \pm 0,51$ GPa, e após misturada foi de $2,90 \pm 0,45$ GPa, o que resultou numa redução de 15%. Na macrofibra B em condições normais, o

módulo foi de $3,62 \pm 0,36$ GPa e, após ser submetida à mistura, diminuiu para $2,91 \pm 0,25$ GPa, mostrando uma queda da ordem de 20%.

Este resultado não era esperado como ocorreu para a queda da resistência das fibras devido ao aumento dos defeitos na superfície. Esses defeitos, de alguma forma, podem ter cooperado para a redução do módulo de elasticidade das macrofibras. Outra hipótese cogitada está associada à energia aplicada nas macrofibras durante a mistura que, de alguma forma, pode ter diminuído o grau de cristalinidade destas. Ou seja, pode ter havido um desalinhamento das cadeias moleculares e isto tem uma influência significativa na diminuição das propriedades mecânicas e, em especial, do módulo de elasticidade (CALLISTER, 2002; CANEVAROLO, 2006). Outra hipótese está relacionada ao menor diâmetro da fibra B que pode ter gerado danos mais significativos, como comentado para a questão da resistência, e assim, pode ter diminuído a rigidez do filamento.

Para conhecer se a amostra escolhida é suficiente, ou se é necessário ensaiar mais amostras para ter resultados mais confiáveis do módulo de elasticidade, fez-se a determinação do tamanho da amostra de acordo a Bussab e Morettin (2002). Isto se fez mediante a Equação 3.2. Assim, os valores de 'n' encontrados se apresentam na Tabela 4.6. Para o cálculo empregou-se os valores estatísticos do módulo de elasticidade apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.6 – Tamanho da amostra de acordo ao método para estimar o módulo de elasticidade.

Macrofibras	Normais	Misturadas
A	11	12
B	5	4

Para a macrofibra A, em condições normais ou misturadas, o número mínimo de unidades na amostra para determinar o módulo de elasticidade precisa ser um pouco maior do que 10, para que sejam plenamente consideradas como representativas. Então, a amostra escolhida não pode ser considerada como plenamente representativa. No entanto, é possível prever que pouca alteração haveria se mais um ou dois ensaios fossem realizados e, com isso, pode-se afirmar que os valores obtidos são significativos para a análise do material aqui apresentada. Para o caso da macrofibra B, nas duas situações de análise a amostra escolhida de 10 unidades é suficiente para obter resultados confiáveis devido à menor variabilidade intrínseca nessa fibra.

4.5 Comentários finais

As seguintes conclusões podem ser extraídas dos resultados do capítulo:

- Os resultados obtidos comprovam a viabilidade de realizar a caracterização mecânica das macrofibras poliméricas no estado em que chegam à obra para sua utilização, especialmente no que se refere à sua resistência mecânica. Para o caso do módulo de elasticidade há uma subestimação do valor medido, mas, dada a confiabilidade do ensaio, o mesmo poderia ser utilizado como um parâmetro de controle, mesmo que subestimando o valor real. Assim, este fato pode ser considerado como um grande ganho para a implantação de um programa de controle de qualidade confiável para a aceitação do material.
- Quanto à metodologia em si, é possível afirmar que os resultados do ensaio variam com o valor do diâmetro, por exemplo, a tensão máxima das macrofibras poliméricas diminui com o incremento da área quando calculada pelo método das imagens digitais. Por conseguinte, se recomenda utilizar a área obtida pelo método da densidade para determinar a tensão, uma vez que esta técnica apresentou os melhores resultados, com baixo coeficiente de variação e evitando superestimações ou subestimações dos valores de tensão.
- Durante o ensaio de tração estabelecido, se constatou que os filamentos das macrofibras romperam parcialmente com o aumento de tensão aplicada. Assim se confirmou que o desfibrilamento foi o mecanismo de fratura preponderante das macrofibras testadas.
- Observou-se uma queda dos níveis das propriedades mecânicas quando as macrofibras eram misturadas com os agregados. Acredita-se que a menor queda na macrofibra A (6%) seja devido a que está constituída por feixes em formato de corda, o que origina uma proteção para os filamentos durante a mistura e, dessa maneira, a estrutura da macrofibra permanece mais preservada no processo. O contrário ocorre com a macrofibra B já que a

mesma é constituída por feixes isolados somente (não há cordas), os quais contêm aproximadamente três filamentos. Ademais, a macrofibra B apresenta uma menor seção, podendo sofrer maior desgaste pelos agregados.

- Fazendo a avaliação do módulo de elasticidade, constata-se que também houve uma diminuição deste valor em ambas as macrofibras após serem misturadas. As quedas foram de 15% e 20% para as macrofibras A e B, respectivamente. Provavelmente este fenômeno é devido a que a energia embutida nelas durante o batimento, alterou as cadeias moleculares e sua estrutura cristalina, assim houve uma diminuição das propriedades mecânicas do elemento.
- As diminuições dos valores de resistência à tração e do módulo de elasticidade das macrofibras poliméricas, podem afetar da seguinte maneira no CRF: em níveis elevados de tensão se produzirá uma maior deformação da macrofibra, o que pode incrementar a abertura da fissura. Além disso, poderá haver um maior número de fibras rompidas, o que também diminui a capacidade resistente residual. Assim os teores das macrofibras devem ser maiores para que aumentem sua capacidade de reforço.
- Vale ressaltar, no entanto, que se comprovou a possibilidade de perda de capacidade de reforço da macrofibra em função de condições específicas de mistura. Desta forma, recomendam-se estudos que indiquem a melhor maneira de proceder à mistura do material, a fim de minimizar danos às fibras para garantir um melhor comportamento da mesma.

5 CONCLUSÕES

5.1 Conclusão geral

Foi possível comprovar que, através das metodologias analisadas de caracterização geométrica e mecânica das macrofibras poliméricas, é possível implementar um programa de controle de qualidade para estas fibras na condição em que são aplicadas no concreto. Esta caracterização permite avaliar a adequação do material à sua função estrutural bem como parametrizá-lo para melhor fundamentação de trabalhos de pesquisa sobre o tema.

5.2 Conclusões específicas

Caracterização geométrica

- Quanto à caracterização geométrica das fibras verificou-se que os métodos de análise de imagem e do paquímetro podem ser considerados como equivalentes e eficazes para a mensuração do comprimento da fibra. O método do paquímetro deve estar associado à operação de estiramento da fibra para que os resultados sejam mais confiáveis. Para a determinação do diâmetro conclui-se que o método da densidade é aquele que apresenta os melhores resultados. Esta condição também foi verificada para o cálculo da área da seção transversal das fibras submetidas ao ensaio de tração direta.
- 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. O estudo aqui apresentado demonstra que as metodologias são aplicáveis, com preferência pelo método

do paquímetro para a medida do comprimento da fibra e da densidade para a determinação de seu diâmetro médio.

- No que se refere ao comprimento das macrofibras poliméricas os critérios de tolerâncias dimensionais da norma EN14889-2:2006 (AENOR, 2006), podem ser considerados como adequados e aplicáveis às macrofibras analisadas. 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.

Caracterização mecânica

- O ensaio proposto de tração direta das macrofibras poliméricas se mostrou eficaz, especialmente no que se refere à determinação da resistência da macrofibra. A determinação do módulo de elasticidade apresentou uma tendência de subestimação, não obstante possa ser utilizado para o controle do material. Através deste ensaio também foi possível demonstrar que o efeito abrasivo do contato das fibras com os agregados durante a mistura gera uma redução dos valores de resistência e módulo de elasticidade. Isto implica em que cuidados específicos sejam tomados para impedir que esses danos prejudiquem o desempenho do CRF.
- As diminuições dos valores de resistência à tração e do módulo de elasticidade das macrofibras poliméricas, podem afetar da seguinte maneira no CRF: em níveis elevados de tensão se produzirá uma maior deformação da macrofibra, o que pode incrementar a abertura da fissura. Além disso, poderá haver um maior número de fibras rompidas, o que também diminui a capacidade resistente residual. Assim os teores das macrofibras devem ser maiores para que aumentem sua capacidade de reforço.
- É possível afirmar que os resultados do ensaio variam com o valor do diâmetro, por exemplo, a tensão máxima das macrofibras poliméricas diminui com o incremento da área quando calculada pelo método das imagens

digitais. Por conseguinte, se recomenda utilizar a área obtida pelo método da densidade para determinar a tensão, uma vez que esta técnica apresentou os melhores resultados, com baixo coeficiente de variação e evitando superestimações ou subestimações dos valores de tensão.

5.3 Propostas de trabalhos futuros

Apesar dos avanços descritos ainda existe temas para estudos posteriores sobre a caracterização de macrofibras poliméricas. Assim sendo, nesta seção se apresenta algumas sugestões para futuras pesquisas:

- Realizar uma caracterização mais exaustiva, com maior variedade de fibras, com o objetivo de fixar uma metodologia que sirva para estabelecer uma futura normativa respeito à caracterização de macrofibras poliméricas. Recomenda-se caracterizar fibras das mais variadas formas geométricas, de modo a se obter um maior nível de confiabilidade para os métodos.
- É preciso melhorar a metodologia para avaliar a fibra no ensaio de tração direta, uma vez que o valor do módulo de elasticidade apresentou-se abaixo do esperado, conforme o declarado pelos fabricantes. Isto pode estar associado ao comprimento curto da macrofibra e a baixa precisão de determinação das deformações. Assim devem ser realizados ensaios comparativos entre as metodologias que empregam o fio original de maior comprimento e as fibras já cortadas.
- Como as macrofibras foram misturadas apenas com agregado graúdo, é interessante realizar esta mistura junto com todos os componentes do concreto. Isto porque poderá haver alterações no comportamento do material como a presença das outras matérias primas. Assim seria possível ter maior clareza sobre como realmente às propriedades mecânicas das macrofibras são afetadas na mistura. Também, recomendam-se estudos que indiquem a melhor maneira de proceder à mistura do material, a fim de minimizar danos às macrofibras para garantir um melhor comportamento da mesma.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICA SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM A820/A820M**: standard specification for steel fiber for fiber-reinforced concrete, 2011. 4 p.

_____. **ASTM C1557-03**: standard test method for tensile strength and Young's modulus for fibers, 2008. 10 p.

_____. **ASTM D2256/D2256M-10**: standard test method for tensile properties of yarns by the single-strand method, 2010. 13 p.

_____. **ASTM D3822-07**: standard test method for tensile properties of single textile fibers, 2007. 10 p.

ARGANDA-CARRERAS, I. AnalyzeSkeleton. Disponível em: <http://fiji.sc/AnalyzeSkeleton>. Acesso em: 26 fev. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – **ABNT. NBR 15530**: fibras de aço para concreto - especificações. Rio de Janeiro, 2007. 7 p.

BABAFEMI, A. J.; BOSHOFF, W. P. Tensile creep of macro-synthetic fibre reinforced concrete (MSFRC) under uni-axial tensile loading. **Cement and Concrete Composites**, v. 55, p. 62–69, 2015.

BARR, B.; GETTU, R.; AL-ORAIMI, S. K. A.; BRYARS, L. S. Toughness measurement - the need to think again. **Cement and Concrete Composites, Toughness of FRC Composites**, v. 18, n. 4, p. 281–297, 1996.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. United Kingdom: Elsevier, 2007. 600 p.

BENTUR, A.; MINDESS, S.; VONDRAN, G. Bonding in polypropylene fibre reinforced concretes. **The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, v. 11, n.3, p.153-158, ago. 1989.

BITENCOURT JR. L. A. G. **Numerical modeling of failure processes in steel fiber reinforced cementitious materials**. Tese (doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2014.

BLANCO, A. **Characterization and modelling of SFRC elements**. 2013. 282 p. Doctoral thesis. UPC, Barcelona, Spain, 2013.

BOLAT, H.; ŞİMŞEK, O.; ÇULLU, M.; DURMUŞ, G.; CAN, Ö. The effects of macro synthetic fiber reinforcement use on physical and mechanical properties of concrete. **Composites Part B: Engineering**, v. 61, p. 191–198, 2014.

BURATTI, N.; MAZZOTTI, C.; SAVOIA, M. Post-cracking behaviour of steel and macro-synthetic fibre-reinforced concretes. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 5, p. 2713–2722, 2011.

BUSSAB, W.; MORETIM, P. **Estatística básica**. 5 ed., São Paulo: Editora Saraiva, 2002.

CÁCERES, A. R.; REYES, I.; REBMANN, M. S.; MONTE, R.; FIGUEIREDO, A. D. Caracterização geométrica de macrofibras poliméricas. **Revista IBRACON de estruturas e materiais (RIEM)**, v. 8, n. 5, p. 644 – 668, 2015.

CÁCERES, A. R.; FIGUEIREDO, A. D.; MONTE, R. Avaliação do comportamento mecânico do concreto com reforço híbrido de fibras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. 55., 2013, Gramado. **Anais...** Ações concretas para o futuro da construção em concreto no Brasil. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2013.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. Ed., Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2002. 589 p.

CANEVAROLO, S. V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2. Ed., Artliber Editora, São Paulo, 2006. 280 p.

CECCATO, M. R. **Estudo da trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras de aço**. 1998. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

DAWOOD, E. T.; RAMLI, M. Mechanical properties of high strength flowing concrete with hybrid fibers. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 193–200, 2012.

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.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 14889-1**. Fibres for concrete – Part 1: steel fibres – definitions, specifications and conformity. European Standard, 2006.

_____. **EN 14889-2**. Fibres for concrete – Part 2: polymer fibres – definitions, specifications and conformity. European Standard, 2006.

_____. **EN 10002-1:2001**. Tensile testing of metallic materials. Method of test at ambient temperature. European Standard, 2001.

FIGUEIREDO, A. D. **Parâmetros de controle e dosagem do concreto projetado com fibras de aço**. São Paulo, 1987. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

FIGUEIREDO, A. D., TANESI, J., NINCE, A. A. Concreto com fibras de polipropileno. **Téchne. Revista de Tecnologia da Construção**. , v.10, p.48 - 51, 2002.

FIGUEIREDO, A.D. **Concreto com fibras**. In: Concreto Projetado: Ensino, Pesquisa e Realizações São Paulo: IBRACOM, 2005.

FIGUEIREDO, A. D. A nova especificação brasileira das fibras de aço para concreto In: 50º. Congresso Brasileiro do Concreto - IBRACON 2008, 2008, Salvador. **Anais**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2008.

FIGUEIREDO, A. D.; CHAMA NETO, P. J.; FARIA, H. M. A nova normalização brasileira sobre fibras de aço. **Concreto e Construção**. , v.XXXVI, p.67 - 76, 2008.

FIGUEIREDO, A. D. Concreto com fibras. In: CONCRETO: Ciência e tecnologia. 2ed. São Paulo: **Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON)**, 2011, v.2, p. 1327-1365.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. 248p. Tese (Livre-Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

FIGUEIREDO, A. D., de la FUENTE, A., AGUADO, A., SALVADOR, R. P., ESCARIZ, R. C. Fibras plásticas como reforço de tubos de concreto. Parte 1: Caracterização tecnológica In: 54º. Congresso Brasileiro do Concreto, 2012, Maceió. Fortalecendo o concreto no Brasil. **Anais**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON, 2012.

HAZAN, M. J.; AFROZ, M.; MAHMUD, H. M. I. An experimental investigation on mechanical behavior of macro synthetic fiber reinforced concrete. **International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS**. v.: 11 n.: 03, 2011.

HTUT TNS. **Fracture processes in steel fibre reinforced concrete**. PhD Dissertation, School of Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales, Sydney, 2010.

IMAGEJ. Disponível em: <http://imagej.nih.gov/ij/>. Acesso em: 24 fev. 2015.

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.

LOPEZ, R. **Determinación de cuantía y orientación de fibras en HRFA por inducción magnética: mejora de un método existente e implantación para probetas cilíndricas**. Tesis de máster. UPC, Barcelona, España, 2013.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto. Microestrutura, propriedades e materiais**. Terceira Ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2008.

MONTGOMERY, D.; RUNGER, G. **Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería**. 2. ed., México, D.F.: Limusa Wiley, 2004.

MORGAN, D.R.; RICH, L.D. Polyolefin fibre reinforced wet-mix shotcrete. In: ACI/SCA International Conference on Sprayed Concrete/Shotcrete - "Sprayed Concrete Technology for the 21st Century", 10 a 11 sept. 1996. **American Concrete Institute and Sprayed Concrete Association**. Proceedings. p.127-38.

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.

NAAMAN, A. E. High performance fiber reinforced cement composites: classification and applications. In: CBM-CI INTERNATIONAL WORKSHOP. Karachi, Pakistan, 2007. **Anais...** 2007.

NANNI, A.; MEAMARIAN, N. Distribution and opening of fibrillated polypropylene fibers in concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 13, n. 2, p. 107-114, 1991.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2da. ed. [S.l.]: Bookman, 2007. 448 p.

NINCE, A. A. **Lascamento do concreto exposto a altas temperaturas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo 336P, 2007.

OUCIEF, H.; HABITA, M. F.; REDJEL, B. Hybrid fiber reinforced self-compacting concrete: hardened properties. **International Journal of Civil Engineering**. v. 4, n. 2, June 2006.

OZNERGIZ, E.; KIYAK, Y. E.; KAMASAK, M. E.; YILDIRIM, I. Automated nanofiber measurement in SEM imagens using a robust image analysis method. Volume 2014, Article ID 738490, 6 pages. **Journal of Nanomaterials**, v. 2014, p. e738490, 6 nov. 2014.

PELISSER, F.; NETO, A. B. DA S. S.; ROVERE, H. L. L.; PINTO, R. C. DE A. Effect of the addition of synthetic fibers to concrete thin slabs on plastic shrinkage cracking. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 11, p. 2171–2176, 2010.

PONS, G.; MOURET, M.; ALCANTARA, M.; GRANJU, J. L. Mechanical behaviour of self-compacting concrete with hybrid fibre reinforcement. **Materials and Structures**, v. 40, n. 2, p. 201–210, 2007.

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.

PUJADAS, P. **Durabilidad del hormigón con fibras de polipropileno**. Tesina de especialidad. UPC, Barcelona, España, 2008.

PUJADAS, P. **Caracterización y diseño del hormigón reforzado con fibras plásticas**. Tesis Doctoral. UPC, Barcelona, España, 2013.

SALVADOR, R. P. **Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras**. Universidade de São Paulo, 20 dez, 2012.

SHIN, E. H.; CHO, K. S.; SEO, M. H.; KIM, H. Determination of electrospun fiber diameter distributions using image analysis processing. **Macromolecular Research**, v. 16, n. 4, p. 314–319, 2008.

SOUTSOS, M. N.; LE, T. T.; LAMPROPOULOS, A. P. Flexural performance of fibre reinforced concrete made with steel and synthetic fibres. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 704-710, 2012.

THE JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **JSCE-SF1**: Method of making steel fiber reinforced concrete in the laboratory. Concrete library of JSCE. Part III-2 Method of tests for steel fiber reinforced concrete. 1984.n.3,p.45-47.

THOMASON, J.L.; KALINKA, G. A technique for the measurement of reinforcement fibre tensile strength at sub-millimetre gauge lengths. **Composites**, 2001.

TIGUMAN, M. P. **Estudo comparativo entre métodos de quantificação de tenacidade usando concreto reforçado com macrofibras de polipropileno**. 2004. 85 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

TROTIER, J-F.; MAHONEY, M. Innovative synthetic fibers. **Concr. Int**, v. 23, p. 23-28, 2001.

VAN VLACK, L. H.. **Princípios de ciência dos materiais**. Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1970.

ZHENG, Z.; FELDMAN, D. Synthetic fibre-reinforced concrete. **Progress in Polymer Science**, v. 20, n. 2, p. 185–210, 1995.

ZHU, D.; MOBASHER, B.; ERNI, J.; BANSAL, S.; RAJAN, S. D. Strain rate and gage length effects on tensile behavior of Kevlar 49 single yarn. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 43, n. 11, p. 2021–2029, 2012.

ZİLE, E.; ZİLE, O. Effect of the fiber geometry on the pullout response of mechanically deformed steel fibers. **Cement and Concrete Research**, v. 44, p. 18–24, fev. 2013.

ZOLLO, R. F. Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development. **Cement and Concrete Composites**, v. 19, n. 2, p. 107–122, 1997.

ANEXO 1.A – Avaliação geométrica pelo método do paquímetro (Macrofibra A)

N	D ₁ (mm)					D ₂ (mm)					De=(D ₁ +D ₂)/2	L (mm)	λ=L/D _e
	med 1	med 2	med 3	Média	CV	med 1	med 2	med 3	Média	CV			
1	0,28	0,29	0,28	0,28	2%	0,31	0,34	0,28	0,31	10%	0,30	53,56	180,54
2	0,27	0,27	0,27	0,27	0%	0,27	0,29	0,27	0,28	4%	0,27	53,11	194,30
3	0,33	0,31	0,32	0,32	3%	0,26	0,25	0,26	0,26	2%	0,29	54,97	190,65
4	0,27	0,31	0,28	0,29	7%	0,27	0,27	0,29	0,28	4%	0,28	53,05	188,34
5	0,20	0,27	0,27	0,25	16%	0,21	0,23	0,26	0,23	11%	0,24	55,49	231,21
6	0,23	0,20	0,15	0,19	21%	0,25	0,26	0,16	0,22	25%	0,21	54,47	261,46
7	0,23	0,27	0,27	0,26	9%	0,29	0,31	0,28	0,29	5%	0,28	53,86	195,85
8	0,36	0,33	0,30	0,33	0%	0,34	0,27	0,32	0,31	12%	0,32	54,08	169,00
9	0,25	0,25	0,25	0,25	0%	0,25	0,32	0,30	0,29	12%	0,27	54,44	201,63
10	0,22	0,24	0,22	0,23	5%	0,22	0,25	0,23	0,23	7%	0,23	54,85	238,48
11	0,31	0,25	0,25	0,27	13%	0,26	0,33	0,30	0,30	12%	0,28	54,18	191,22
12	0,27	0,24	0,28	0,26	8%	0,29	0,30	0,26	0,28	7%	0,27	53,63	196,21
13	0,15	0,23	0,15	0,18	26%	0,11	0,14	0,17	0,14	21%	0,16	54,24	342,57
14	0,25	0,32	0,25	0,27	15%	0,24	0,26	0,25	0,25	4%	0,26	54,45	208,09
15	0,11	0,11	0,12	0,11	5%	0,11	0,14	0,12	0,12	12%	0,12	53,98	456,17
16	0,21	0,27	0,18	0,22	21%	0,20	0,19	0,18	0,19	5%	0,21	54,49	265,80
17	0,17	0,24	0,16	0,19	23%	0,17	0,33	0,20	0,23	36%	0,21	53,58	253,13
18	0,19	0,22	0,23	0,21	10%	0,17	0,27	0,22	0,22	23%	0,22	54,64	252,18
19	0,36	0,32	0,30	0,33	9%	0,30	0,35	0,34	0,33	8%	0,33	53,95	164,31
20	0,30	0,25	0,27	0,27	9%	0,27	0,32	0,25	0,28	13%	0,28	53,94	194,96
21	0,34	0,27	0,36	0,32	15%	0,27	0,40	0,27	0,31	24%	0,32	53,34	167,56
22	0,33	0,29	0,28	0,30	9%	0,29	0,38	0,30	0,32	15%	0,31	54,37	174,45
23	0,34	0,34	0,33	0,34	2%	0,26	0,26	0,27	0,26	2%	0,30	53,96	179,87
24	0,22	0,33	0,28	0,28	20%	0,29	0,28	0,27	0,28	4%	0,28	53,76	193,15
25	0,15	0,30	0,16	0,20	41%	0,25	0,34	0,15	0,25	39%	0,23	53,08	235,91
26	0,20	0,22	0,19	0,20	8%	0,17	0,25	0,22	0,21	19%	0,21	53,74	257,95
27	0,25	0,29	0,24	0,26	10%	0,24	0,26	0,27	0,26	6%	0,26	55,32	214,14
28	0,15	0,23	0,16	0,18	24%	0,11	0,26	0,09	0,15	61%	0,17	54,21	325,26
29	0,12	0,11	0,12	0,12	5%	0,14	0,12	0,12	0,13	9%	0,12	53,92	443,18
30	0,27	0,27	0,28	0,27	2%	0,27	0,38	0,28	0,31	20%	0,29	52,71	180,72
31	0,18	0,17	0,16	0,17	6%	0,20	0,20	0,14	0,18	19%	0,18	53,73	307,03
32	0,33	0,40	0,36	0,36	10%	0,39	0,32	0,40	0,37	12%	0,37	53,67	146,37
33	0,30	0,34	0,33	0,32	6%	0,32	0,30	0,32	0,31	4%	0,32	54,61	171,55
34	0,32	0,34	0,37	0,34	7%	0,33	0,24	0,37	0,31	21%	0,33	53,84	163,98
35	0,25	0,22	0,20	0,22	11%	0,32	0,37	0,26	0,32	17%	0,27	54,43	201,59
36	0,25	0,11	0,18	0,18	39%	0,18	0,20	0,11	0,16	29%	0,17	54,38	316,78
37	0,26	0,22	0,24	0,24	8%	0,27	0,31	0,24	0,27	13%	0,26	55,11	214,71
38	0,34	0,33	0,27	0,31	12%	0,33	0,20	0,26	0,26	25%	0,29	53,59	185,86
39	0,13	0,09	0,13	0,12	20%	0,11	0,11	0,12	0,11	5%	0,12	52,77	458,87
40	0,31	0,31	0,38	0,33	12%	0,35	0,37	0,32	0,35	7%	0,34	53,70	157,94
41	0,26	0,26	0,30	0,27	8%	0,24	0,21	0,21	0,22	8%	0,25	52,79	214,01
42	0,15	0,19	0,16	0,17	12%	0,12	0,17	0,15	0,15	17%	0,16	53,07	338,74
43	0,18	0,16	0,15	0,16	9%	0,17	0,23	0,15	0,18	23%	0,17	53,42	308,19
44	0,17	0,15	0,21	0,18	17%	0,25	0,25	0,18	0,23	18%	0,20	54,17	268,61
45	0,10	0,11	0,11	0,11	5%	0,11	0,14	0,10	0,12	18%	0,11	54,11	484,57
46	0,25	0,25	0,28	0,26	7%	0,25	0,28	0,24	0,26	8%	0,26	54,41	210,62
47	0,20	0,15	0,15	0,17	17%	0,21	0,24	0,16	0,20	20%	0,19	53,57	289,57
48	0,28	0,26	0,32	0,29	11%	0,34	0,25	0,28	0,29	16%	0,29	54,81	190,09
49	0,34	0,24	0,27	0,28	18%	0,34	0,32	0,32	0,33	4%	0,31	54,37	178,26
50	0,28	0,27	0,23	0,26	10%	0,28	0,35	0,22	0,28	23%	0,27	54,63	201,09
51	0,28	0,33	0,33	0,31	9%	0,28	0,30	0,28	0,29	4%	0,30	54,37	181,23
52	0,22	0,28	0,25	0,25	12%	0,20	0,33	0,17	0,23	36%	0,24	55,01	227,63
53	0,24	0,24	0,26	0,25	5%	0,22	0,34	0,31	0,29	22%	0,27	53,62	199,83
54	0,16	0,21	0,16	0,18	16%	0,20	0,16	0,15	0,17	16%	0,17	54,44	314,08
55	0,27	0,28	0,26	0,27	4%	0,25	0,27	0,27	0,26	4%	0,27	53,75	201,56
56	0,32	0,23	0,24	0,26	19%	0,24	0,23	0,24	0,24	2%	0,25	54,51	218,04
57	0,27	0,23	0,25	0,25	8%	0,11	0,18	0,18	0,16	26%	0,20	54,84	269,70
58	0,11	0,11	0,10	0,11	5%	0,12	0,13	0,11	0,12	8%	0,11	54,22	478,41
59	0,08	0,09	0,05	0,07	28%	0,06	0,10	0,07	0,08	27%	0,08	54,78	730,40
60	0,27	0,28	0,25	0,27	6%	0,26	0,26	0,28	0,27	4%	0,27	53,84	201,90

ANEXO 1.B – Avaliação geométrica pelo método do paquímetro (Macrofibra B)

N	D ₁ (mm)					D ₂ (mm)					D _e =(D ₁ +D ₂)/2	L (mm)	λ=L/D _e
	med 1	med 2	med 3	Média	CV	med 1	med 2	med 3	Média	CV			
1	0,22	0,33	0,25	0,27	21%	0,24	0,32	0,21	0,26	22%	0,26	58,55	223,76
2	0,26	0,27	0,27	0,27	2%	0,26	0,32	0,26	0,28	12%	0,27	58,50	214,02
3	0,27	0,29	0,24	0,27	9%	0,29	0,32	0,32	0,31	6%	0,29	58,47	202,79
4	0,25	0,32	0,28	0,28	12%	0,27	0,33	0,25	0,28	15%	0,28	58,49	206,44
5	0,27	0,27	0,23	0,26	9%	0,32	0,33	0,25	0,30	15%	0,28	58,49	210,14
6	0,33	0,29	0,29	0,30	8%	0,30	0,32	0,31	0,31	3%	0,31	58,53	190,86
7	0,26	0,31	0,23	0,27	15%	0,27	0,29	0,23	0,26	12%	0,27	58,34	220,15
8	0,26	0,31	0,23	0,27	15%	0,32	0,27	0,22	0,27	19%	0,27	58,35	217,45
9	0,32	0,31	0,26	0,30	11%	0,32	0,29	0,30	0,30	5%	0,30	58,44	194,80
10	0,30	0,31	0,19	0,27	25%	0,30	0,29	0,32	0,30	5%	0,29	58,34	204,70
11	0,33	0,29	0,31	0,31	6%	0,33	0,32	0,27	0,31	10%	0,31	58,48	189,66
12	0,27	0,30	0,23	0,27	13%	0,26	0,28	0,24	0,26	8%	0,26	58,43	221,89
13	0,26	0,28	0,25	0,26	6%	0,29	0,32	0,26	0,29	10%	0,28	58,55	211,63
14	0,26	0,33	0,23	0,27	19%	0,28	0,28	0,21	0,26	16%	0,27	58,26	219,85
15	0,28	0,29	0,25	0,27	8%	0,28	0,30	0,29	0,29	3%	0,28	58,46	207,55
16	0,29	0,29	0,30	0,29	2%	0,27	0,32	0,28	0,29	9%	0,29	58,33	199,99
17	0,29	0,33	0,31	0,31	6%	0,29	0,29	0,29	0,29	0%	0,30	58,09	193,63
18	0,28	0,28	0,25	0,27	6%	0,29	0,30	0,29	0,29	2%	0,28	58,44	207,48
19	0,28	0,28	0,28	0,28	0%	0,29	0,32	0,29	0,30	6%	0,29	58,44	201,52
20	0,28	0,30	0,29	0,29	3%	0,29	0,32	0,28	0,30	7%	0,29	58,47	199,33
21	0,29	0,29	0,33	0,30	8%	0,28	0,31	0,29	0,29	5%	0,30	58,45	195,92
22	0,27	0,26	0,32	0,28	11%	0,25	0,30	0,27	0,27	9%	0,28	58,41	209,86
23	0,28	0,28	0,25	0,27	6%	0,32	0,31	0,32	0,32	2%	0,29	58,41	199,13
24	0,28	0,33	0,30	0,30	8%	0,29	0,32	0,28	0,30	7%	0,30	58,47	194,90
25	0,29	0,29	0,25	0,28	8%	0,29	0,26	0,34	0,30	14%	0,29	58,36	203,58
26	0,27	0,31	0,29	0,29	7%	0,30	0,28	0,29	0,29	3%	0,29	58,41	201,41
27	0,29	0,30	0,27	0,29	5%	0,31	0,33	0,28	0,31	8%	0,30	58,22	196,25
28	0,30	0,30	0,28	0,29	4%	0,28	0,32	0,27	0,29	9%	0,29	58,53	200,67
29	0,28	0,31	0,26	0,28	9%	0,28	0,27	0,26	0,27	4%	0,28	58,50	211,45
30	0,29	0,27	0,25	0,27	7%	0,27	0,33	0,24	0,28	16%	0,28	58,29	211,96
31	0,30	0,38	0,24	0,31	23%	0,29	0,34	0,29	0,31	9%	0,31	59,85	195,16
32	0,23	0,31	0,26	0,27	15%	0,29	0,32	0,26	0,29	10%	0,28	59,33	213,16
33	0,32	0,29	0,31	0,31	5%	0,25	0,34	0,24	0,28	20%	0,29	59,81	205,06
34	0,29	0,34	0,30	0,31	9%	0,26	0,32	0,25	0,28	14%	0,29	59,95	204,38
35	0,26	0,36	0,22	0,28	26%	0,24	0,27	0,22	0,24	10%	0,26	59,88	228,84
36	0,28	0,29	0,29	0,29	2%	0,30	0,26	0,31	0,29	9%	0,29	59,61	206,74
37	0,31	0,29	0,22	0,27	17%	0,26	0,29	0,28	0,28	6%	0,28	59,75	217,27
38	0,27	0,30	0,27	0,28	6%	0,23	0,26	0,24	0,24	6%	0,26	59,86	228,76
39	0,25	0,30	0,25	0,27	11%	0,28	0,29	0,30	0,29	3%	0,28	59,76	214,71
40	0,23	0,32	0,30	0,28	17%	0,25	0,37	0,28	0,30	21%	0,29	59,78	204,96
41	0,28	0,29	0,27	0,28	4%	0,28	0,32	0,27	0,29	9%	0,29	59,86	210,04
42	0,27	0,29	0,33	0,30	10%	0,25	0,31	0,27	0,28	11%	0,29	59,56	207,77
43	0,31	0,31	0,29	0,30	4%	0,27	0,33	0,30	0,30	10%	0,30	59,88	198,50
44	0,25	0,26	0,24	0,25	4%	0,24	0,25	0,23	0,24	4%	0,25	59,70	243,67
45	0,23	0,26	0,24	0,24	6%	0,23	0,23	0,24	0,23	2%	0,24	59,85	251,12
46	0,32	0,30	0,31	0,31	3%	0,28	0,31	0,27	0,29	7%	0,30	59,73	200,21
47	0,31	0,24	0,31	0,29	14%	0,30	0,22	0,31	0,28	18%	0,28	59,51	211,28
48	0,23	0,20	0,22	0,22	7%	0,22	0,27	0,23	0,24	11%	0,23	59,54	260,76
49	0,23	0,20	0,22	0,22	7%	0,21	0,18	0,22	0,20	10%	0,21	59,40	282,86
50	0,24	0,22	0,23	0,23	4%	0,24	0,21	0,24	0,23	8%	0,23	59,80	260,00
51	0,24	0,32	0,23	0,26	19%	0,25	0,36	0,23	0,28	25%	0,27	59,56	219,24
52	0,29	0,25	0,32	0,29	12%	0,30	0,28	0,32	0,30	7%	0,29	59,92	204,27
53	0,30	0,23	0,27	0,27	13%	0,31	0,22	0,27	0,27	17%	0,27	59,94	224,78
54	0,31	0,24	0,31	0,29	14%	0,31	0,21	0,33	0,28	23%	0,29	59,86	210,04
55	0,26	0,28	0,30	0,28	7%	0,27	0,21	0,30	0,26	18%	0,27	59,89	221,81
56	0,25	0,22	0,30	0,26	16%	0,27	0,23	0,32	0,27	16%	0,27	59,88	225,96
57	0,30	0,23	0,27	0,27	13%	0,30	0,21	0,33	0,28	22%	0,27	59,86	219,00
58	0,26	0,20	0,28	0,25	17%	0,32	0,21	0,28	0,27	21%	0,26	59,88	231,79
59	0,28	0,21	0,28	0,26	16%	0,30	0,20	0,27	0,26	20%	0,26	60,01	233,81
60	0,25	0,30	0,28	0,28	9%	0,29	0,22	0,29	0,27	15%	0,27	60,02	220,93

ANEXO 2 – Avaliação geométrica pelo método de imagens digitais

Macrofibra A				Macrofibra B			
N	L (mm)	D (mm)	$\lambda=L/D$	N	L (mm)	D (mm)	$\lambda=L/D$
1	55,98	0,33	171,94	1	59,48	0,27	220,89
2	55,27	0,29	189,77	2	59,46	0,29	205,55
3	56,43	0,31	183,10	3	59,79	0,30	198,21
4	55,37	0,32	171,22	4	60,88	0,31	194,71
5	57,19	0,34	166,40	5	59,63	0,31	194,22
6	56,33	0,35	159,58	6	60,20	0,32	187,83
7	55,22	0,37	147,80	7	59,52	0,31	192,89
8	55,38	0,44	126,28	8	59,89	0,31	190,73
9	54,50	0,39	138,86	9	62,81	0,28	227,53
10	56,42	0,39	143,94	10	59,77	0,31	190,44
11	56,40	0,22	250,79	11	59,97	0,31	196,63
12	55,22	0,27	206,26	12	59,67	0,31	192,10
13	56,61	0,27	211,94	13	59,76	0,30	196,47
14	56,10	0,34	163,97	14	59,49	0,31	193,42
15	54,01	0,29	185,19	15	59,63	0,29	207,24
16	57,41	0,28	202,65	16	59,44	0,32	187,99
17	56,36	0,51	109,90	17	59,01	0,29	200,48
18	58,41	0,39	148,36	18	59,81	0,28	210,42
19	56,25	0,43	130,92	19	60,13	0,31	194,96
20	55,69	0,31	177,26	20	59,35	0,28	209,77
21	53,48	0,35	151,72	21	59,49	0,30	199,89
22	56,08	0,41	137,34	22	60,52	0,28	218,67
23	54,02	0,42	129,87	23	59,56	0,28	209,33
24	55,72	0,31	178,18	24	59,47	0,31	188,93
25	54,59	0,34	158,58	25	60,51	0,28	216,58
26	55,48	0,31	176,27	26	59,36	0,30	196,82
27	57,84	0,32	181,64	27	59,21	0,32	182,44
28	55,90	0,37	152,01	28	60,32	0,30	203,97
29	56,00	0,26	214,69	29	60,44	0,30	198,81
30	55,49	0,44	125,06	30	60,04	0,31	195,00
31	55,25	0,46	119,46	31	60,78	0,31	194,62
32	55,67	0,54	102,67	32	61,16	0,30	201,28
33	55,74	0,49	114,25	33	61,38	0,32	191,92
34	55,48	0,44	126,42	34	61,24	0,31	199,20
35	56,54	0,35	161,64	35	61,91	0,31	202,74
36	55,95	0,31	177,93	36	61,05	0,32	190,96
37	57,22	0,38	152,44	37	61,33	0,30	202,98
38	56,13	0,33	170,20	38	60,71	0,31	194,78
39	54,65	0,34	162,37	39	60,56	0,33	181,48
40	56,39	0,40	141,97	40	61,33	0,31	200,62
41	55,13	0,31	175,35	41	60,85	0,29	211,90
42	54,57	0,31	174,86	42	62,18	0,32	192,43
43	54,57	0,37	148,98	43	62,88	0,29	219,27
44	56,89	0,43	132,13	44	61,95	0,41	150,26
45	56,45	0,27	206,23	45	62,56	0,42	150,28
46	56,91	0,43	133,80	46	61,27	0,32	193,85
47	54,37	0,31	173,26	47	61,92	0,30	209,19
48	56,71	0,33	171,34	48	62,07	0,37	167,51
49	55,58	0,37	151,01	49	62,07	0,38	164,50
50	56,79	0,48	118,37	50	61,29	0,32	192,87
51	57,35	0,34	170,10	51	61,88	0,42	147,74
52	57,37	0,38	152,48	52	62,25	0,30	209,87
53	55,26	0,38	144,58	53	61,62	0,31	197,56
54	57,28	0,36	160,67	54	61,83	0,31	198,93
55	54,40	0,40	135,70	55	62,21	0,29	211,46
56	55,84	0,34	161,91	56	61,88	0,32	191,22
57	57,67	0,37	153,99	57	62,33	0,29	217,82
58	55,77	0,30	187,29	58	61,33	0,30	203,86
59	54,37	0,32	170,89	59	62,84	0,28	220,86
60	55,06	0,34	163,06	60	61,85	0,30	204,10

ANEXO 3.A – Avaliação geométrica pelo método da densidade (Macrofibra A)

N	Massa (g)	L_i (mm)	D_e (mm)	$\lambda=L/D$	L_p (mm)	D_e (mm)	$\lambda=L/D_e$
1	0,0051	55,98	0,35	158,51	53,56	0,36	148,34
2	0,0045	55,27	0,33	165,56	53,11	0,34	155,94
3	0,0038	56,43	0,30	185,83	54,97	0,31	178,68
4	0,0041	55,37	0,32	173,89	53,05	0,33	163,09
5	0,0043	57,19	0,32	178,27	55,49	0,33	170,36
6	0,0041	56,33	0,32	178,44	54,47	0,32	169,68
7	0,0052	55,22	0,36	153,77	53,86	0,36	148,14
8	0,0070	55,38	0,42	133,12	54,08	0,42	128,47
9	0,0042	54,50	0,32	167,77	54,44	0,32	167,51
10	0,0043	56,42	0,32	174,68	54,85	0,33	167,42
11	0,0039	56,40	0,31	183,29	54,18	0,31	172,59
12	0,0040	55,22	0,31	175,35	53,63	0,32	167,83
13	0,0022	56,61	0,23	245,44	54,24	0,24	230,17
14	0,0045	56,10	0,33	169,28	54,45	0,34	161,87
15	0,0018	54,01	0,21	252,82	53,98	0,21	252,64
16	0,0041	57,41	0,31	183,60	54,49	0,32	169,77
17	0,0051	56,36	0,35	160,11	53,58	0,36	148,42
18	0,0045	58,41	0,32	179,86	54,64	0,34	162,72
19	0,0060	56,25	0,38	147,21	53,95	0,39	138,26
20	0,0040	55,69	0,31	177,61	53,94	0,32	169,29
21	0,0048	53,48	0,35	152,57	53,34	0,35	151,97
22	0,0050	56,08	0,35	160,50	54,37	0,35	153,23
23	0,0050	54,02	0,36	151,75	53,96	0,36	151,50
24	0,0047	55,72	0,34	163,97	53,76	0,35	155,39
25	0,0046	54,59	0,34	160,70	53,08	0,34	154,10
26	0,0032	55,48	0,28	197,43	53,74	0,29	188,22
27	0,0037	57,84	0,30	195,43	55,32	0,30	182,81
28	0,0031	55,90	0,28	202,85	54,21	0,28	193,74
29	0,0019	56,00	0,22	259,81	53,92	0,22	245,49
30	0,0058	55,49	0,38	146,68	52,71	0,39	135,80
31	0,0043	55,25	0,33	169,27	53,73	0,33	162,32
32	0,0103	55,67	0,50	110,60	53,67	0,51	104,70
33	0,0085	55,74	0,46	121,99	54,61	0,46	118,30
34	0,0060	55,48	0,38	144,18	53,84	0,39	137,84
35	0,0043	56,54	0,32	175,23	54,43	0,33	165,50
36	0,0026	55,95	0,25	221,84	54,38	0,26	212,55
37	0,0043	57,22	0,32	178,38	55,11	0,33	168,62
38	0,0047	56,13	0,34	165,76	53,59	0,35	154,65
39	0,0023	54,65	0,24	227,65	52,77	0,24	216,02
40	0,0063	56,39	0,39	144,19	53,7	0,40	133,99
41	0,0041	55,13	0,32	172,78	52,79	0,33	161,89
42	0,0028	54,57	0,27	205,89	53,07	0,27	197,46
43	0,0028	54,57	0,27	205,87	53,42	0,27	199,42
44	0,0038	56,89	0,30	188,12	54,17	0,31	174,80
45	0,0020	56,45	0,22	256,30	54,11	0,22	240,54
46	0,0053	56,91	0,36	159,36	54,41	0,37	148,99
47	0,0030	54,37	0,27	197,84	53,57	0,28	193,47
48	0,0042	56,71	0,32	178,11	54,81	0,32	169,22
49	0,0042	55,58	0,32	172,78	54,37	0,33	167,19
50	0,0065	56,79	0,40	143,48	54,63	0,40	135,36
51	0,0046	57,35	0,33	173,05	54,37	0,34	159,75
52	0,0036	57,37	0,29	195,75	55,01	0,30	183,78
53	0,0045	55,26	0,33	165,50	53,62	0,34	158,19
54	0,0036	57,28	0,29	195,25	54,44	0,30	180,93
55	0,0051	54,40	0,36	151,83	53,75	0,36	149,13
56	0,0040	55,84	0,31	178,30	54,51	0,32	171,98
57	0,0039	57,67	0,30	189,51	54,84	0,31	175,75
58	0,0019	55,77	0,22	258,22	54,22	0,22	247,54
59	0,0017	54,37	0,21	262,79	54,78	0,21	265,76
60	0,0044	55,06	0,33	166,48	53,84	0,33	160,96

ANEXO 3.B – Avaliação geométrica pelo método da densidade (Macrofibra B)

N	Massa (g)	L_i (mm)	D_e (mm)	$\lambda=L/D_e$	L_p (mm)	D_e (mm)	$\lambda=L/D_e$
1	0,0043	59,48	0,31	189,55	58,55	0,32	185,14
2	0,0039	59,46	0,30	198,93	58,50	0,30	194,16
3	0,0045	59,79	0,32	186,77	58,47	0,32	180,61
4	0,0046	60,88	0,32	189,78	58,49	0,33	178,73
5	0,0045	59,63	0,32	186,01	58,49	0,32	180,70
6	0,0044	60,20	0,32	190,83	58,53	0,32	182,93
7	0,0041	59,52	0,31	194,32	58,34	0,31	188,59
8	0,0043	59,89	0,31	191,55	58,35	0,32	184,19
9	0,0038	62,81	0,29	218,82	58,44	0,30	196,39
10	0,0041	59,77	0,31	195,57	58,34	0,31	188,59
11	0,0043	59,97	0,31	191,93	58,48	0,32	184,81
12	0,0045	59,67	0,32	186,19	58,43	0,32	180,43
13	0,0043	59,76	0,31	190,93	58,55	0,32	185,14
14	0,0040	59,49	0,30	196,63	58,26	0,31	190,54
15	0,0043	59,63	0,30	197,30	58,46	0,31	191,52
16	0,0044	59,44	0,31	189,37	58,33	0,32	184,10
17	0,0043	59,01	0,32	185,17	58,09	0,32	180,87
18	0,0041	59,81	0,31	191,16	58,44	0,32	184,62
19	0,0043	60,13	0,30	197,35	58,44	0,31	189,07
20	0,0042	59,35	0,31	188,97	58,47	0,32	184,76
21	0,0045	59,49	0,31	191,88	58,45	0,31	186,85
22	0,0043	60,52	0,32	190,18	58,41	0,32	180,33
23	0,0045	59,56	0,31	189,94	58,41	0,32	184,48
24	0,0045	59,47	0,32	185,28	58,47	0,32	180,61
25	0,0043	60,51	0,32	190,13	58,36	0,32	180,10
26	0,0043	59,36	0,31	188,99	58,41	0,32	184,48
27	0,0044	59,21	0,31	188,29	58,22	0,32	183,58
28	0,0041	60,32	0,32	191,37	58,53	0,32	182,93
29	0,0047	60,44	0,30	198,87	58,50	0,31	189,36
30	0,0045	60,04	0,33	183,87	58,29	0,33	175,91
31	0,0050	60,78	0,32	191,42	59,85	0,32	187,04
32	0,0042	61,16	0,31	199,98	59,33	0,31	191,09
33	0,0046	61,38	0,32	192,12	59,81	0,32	184,81
34	0,0048	61,24	0,33	187,46	59,95	0,33	181,56
35	0,0042	61,91	0,30	203,67	59,88	0,31	193,75
36	0,0047	61,05	0,32	188,56	59,61	0,33	181,92
37	0,0047	61,33	0,32	189,87	59,75	0,33	182,56
38	0,0043	60,71	0,31	195,47	59,86	0,31	191,39
39	0,0046	60,56	0,32	188,32	59,76	0,32	184,58
40	0,0047	61,33	0,32	189,87	59,78	0,33	182,70
41	0,0046	60,85	0,32	189,66	59,86	0,32	185,04
42	0,0050	62,18	0,33	187,90	59,56	0,34	176,16
43	0,0048	62,88	0,32	195,01	59,88	0,33	181,24
44	0,0055	61,95	0,35	178,15	59,70	0,35	168,55
45	0,0054	62,56	0,34	182,46	59,85	0,35	170,75
46	0,0048	61,27	0,33	187,60	59,73	0,33	180,56
47	0,0045	61,92	0,31	196,85	59,51	0,32	185,45
48	0,0055	62,07	0,35	178,68	59,54	0,35	167,87
49	0,0053	62,07	0,34	182,02	59,40	0,35	170,41
50	0,0057	61,29	0,36	172,24	59,80	0,36	165,98
51	0,0055	61,88	0,35	177,85	59,56	0,35	167,96
52	0,0047	62,25	0,32	194,14	59,92	0,33	183,34
53	0,0043	61,62	0,31	199,91	59,94	0,31	191,77
54	0,0048	61,83	0,33	190,19	59,86	0,33	181,15
55	0,0047	62,21	0,32	193,95	59,89	0,33	183,20
56	0,0048	61,88	0,33	190,39	59,88	0,33	181,24
57	0,0048	62,33	0,32	192,50	59,86	0,33	181,15
58	0,0044	61,33	0,31	196,23	59,88	0,32	189,30
59	0,0045	62,84	0,31	201,23	60,01	0,32	187,79
60	0,0046	61,85	0,32	194,34	60,02	0,32	185,79