JOELMA APARECIDA PEREIRA MANZIONE

**Caracterização de concretos com macrofibras de vidro para
aplicações estruturais**

**São Paulo
2019**

JOELMA APARECIDA PEREIRA MANZIONE

**Caracterização de concretos com macrofibras de vidro para
aplicações estruturais**

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

Orientadora:

Prof^a. Dr^a. Renata Monte

São Paulo

2019

JOELMA APARECIDA PEREIRA MANZIONE

**Caracterização de concretos com macrofibras de vidro para
aplicações estruturais**

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

Área de Concentração:
Inovação na Construção Civil

Orientadora:

Prof^a. Dr^a. Renata Monte

São Paulo

2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

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

Manzione, Joelma Aparecida Pereira

Caracterização de concretos com macrofibras de vidro para aplicações estruturais / J. A. P. Manzione -- versão corr. -- São Paulo, 2019.

112 p.

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

1.Concreto reforçado com fibras 2.macrofibras de vidro
3.Controle tecnológico 4.Ensaio dos materiais - metodologia
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.

MANZIONE, J.A.P. **Caracterização de concretos com macrofibras de vidro para aplicações estruturais** São Paulo. 2019. 112 p. (Mestrado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

Dedico este trabalho ao meu esposo William,
aos meus filhos Matheus e Lucas que está por chegar
e a minha mãe Neide.

AGRADECIMENTOS

Início os agradecimentos, primeiro a Deus que sempre me dá forças para seguir em frente quando tudo parece tão difícil e inalcançável. Assim, descobri que nada é impossível, tudo depende do quanto importante é.

Agradeço ao Professor Antônio Figueiredo e a minha orientadora Professora Renata Monte pela paciência e dedicação na revisão dos artigos desenvolvidos ao longo do trabalho. A Renata agradeço ainda mais, pela dedicação ao longo do desenvolvimento do trabalho e dúvidas que surgiam a cada novo tema. Sempre foi incentivadora, quando parecia não encontrar mais saídas e tempo para concluir o trabalho.

Agradeço aos colegas da Poli, Ligia, Carol, Renan, Luana, André, Fernanda, Ramoel, Alan, Pedro, Tiago, Roney que eu consegui lembrar e aos que eu não lembrei, por toda ajuda no laboratório, compartilhando artigos e referencias durante o desenvolvimento da dissertação e ainda me apoiaram durante a apresentação da qualificação e artigos em congressos. Agradeço também ao pessoal do laboratório, Jessica, Adilson e Genicio, que sempre estiveram disponíveis quando precisamos durante as concretagens e ensaios.

Agradeço a Escola Politécnica por toda estrutura e condições para o desenvolvimento deste trabalho e dissertação.

Agradeço ao Prof. Marco Carnio da PUC – Campinas que disponibilizou equipamento para realização de uma das campanhas experimentais imprescindíveis para a conclusão do trabalho.

Agradeço aos líderes e colegas de trabalho da Comgás que me apoiaram quando precisei estar ausente do trabalho durante os anos de dedicação ao mestrado.

E por fim, mas não menos importante, agradeço a meu esposo William, que sempre foi um incentivador dos meus estudos, discutindo teorias e me motivando nos momentos mais difíceis. Inclusive quando Matheus nos deixava pouco tempo para atividades extrafamiliares.

Agradeço também a minha mãe Neide, que mesmo sem compreender a magnitude de um curso de mestrado, desde muito cedo, sempre me disse que estudar é o caminho para um futuro melhor. E que também sempre esteve a disposição para cuidar do Matheus enquanto eu precisava estudar.

RESUMO

Os materiais cimentícios apresentam um comportamento frágil, com baixa capacidade de deformação antes da ruptura quando submetido a esforços de tração. Por essa razão, alternativas tecnológicas como as fibras são utilizadas para compensar estas limitações. As fibras de aço já são amplamente utilizadas e no Brasil possui norma própria para sua especificação. As fibras de vidro são um material tradicionalmente utilizado no reforço de matrizes cimentícias em componentes conhecidos como GRC ou GFRC. Entretanto, apesar de existir normas técnicas para a fabricação destes componentes, não existem normas para caracterização destas fibras. Com a publicação do código modelo europeu, *fib* Model Code 2010, a utilização das fibras como reforço para elementos estruturais teve significativo avanço tanto nas questões de dimensionamento quanto na busca por alternativas para o controle tecnológico do material. O ensaio de flexão de três pontos com entalhe (3PBT) é o ensaio de referência para se obter os parâmetros para o dimensionamento do CRF, mas a utilização de outros ensaios é permitida desde que a correlação com o ensaio de referência seja comprovada. Neste contexto, esta dissertação tem como objetivo estudar metodologias para a caracterização e controle tecnológico do concreto com macrofibras de vidro para aplicação estrutural. Para isto o estudo foi dividido em três etapas, sendo a primeira voltada para a caracterização da macrofibra, com o desenvolvimento de uma metodologia para realização do ensaio de tração diretamente na fibra. A segunda etapa estuda o comportamento pós fissuração do CRF a partir dos ensaios 3PBT (EN 14651) e duplo puncionamento (DPT), conhecido como ensaio Barcelona (UNE 83515). A terceira etapa se dedica a relacionar os resultados experimentais obtidos com 3PBT e DPT e avaliar equações de correlação propostas na literatura. Os resultados mostraram a viabilidade do ensaio de tração ser realizado diretamente na macrofibra de vidro. A correspondência entre os resultados do ensaio 3PBT e DPT foi demonstrada com correlações experimentais e aplicação de equação proposta na literatura, confirmando o DPT como alternativa viável para o controle tecnológico do CRF.

Palavras-chave: Concreto reforçado com fibras; fibras de vidro; ensaio de flexão; ensaio de duplo puncionamento; controle tecnológico.

ABSTRACT

Cementitious materials present a fragile behavior, with low deformation capacity before rupture when subjected to tensile stresses. For this reason, technological alternatives such as fibers are used to overcome for these limitations. Steel fibers are already widely used and have a Brazilian standard for their specification. Glass fibers are another material traditionally used in reinforcing cementitious matrices, such as façade panels, known as GRC or GFRC. However, there are no Brazilian standards for these fibers' characterization. The publication of the European Model Code, *fib* Model Code 2010, presented a significant step for FRC technology with the introduction of guidance for design structural elements with fibers. The three-point bending test (3PBT) is the reference test for parameters to the FRC design, but the use of other tests is allowed if appropriately correlated with the reference test. In this context, this work aims to study methodologies for the characterization and technological control of concrete with glass macrofibers for structural application. For this, the study was divided into three stages, the first focused on the macrofiber characterization, with the development of a methodology to perform the tensile test directly on the fiber. The second stage studies the post-cracking behavior of FRC using 3PBT (EN 14651) and double punch test (DPT), also known as Barcelona test (UNE 83515). The third step is dedicated to produce experimental correlations between 3PBT e DPT and the evaluation of equations proposed in the literature. The results showed the feasibility of the tensile test to be performed directly on the glass macrofiber. The correlation between the results of the 3PBT and DPT was confirmed with experimental correlations and application of the equation proposed in the literature, confirming the DPT as a possible alternative for the FRC systematic technological control.

Key words: Fiber reinforced concrete, Glass fiber, bending test, duble punch test, technological control

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 – a) Macrofibra A	(b) Macrofibra B	31
Figura 2-2 – Macrofibra A com extremidades embebidas em resina com de 5 mm de diâmetro		34
Figura 2-3 – Macrofibra A com extremidades embebidas com comprimento não uniforme.		35
Figura 2-4 – Macrofibra A após fixação entre as garras da maquina		35
Figura 2-5 – Macrofibra A após ensaio		35
Figura 2-6 – Etapas de preparação das extremidades das macrofibras com resina em moldes de 8 mm de diâmetro		36
Figura 2-7 – Fixação da macrofibra A entre as garras do equipamento.....		37
Figura 2-8 – Macrofibra A após o ensaio com a ruptura na parte central da fibra		37
Figura 2-9 – Fixação da macrofibra B entre as garras do equipamento.....		38
Figura 2-10 – Macrofibra B após o ensaio com a ruptura na parte central da fibra		38
Figura 2-11 – Medida do abatimento de tronco de cone antes da adição das macrofibras.....		39
Figura 2-12 – Medida do abatimento de tronco de cone após a adição das macrofibras.....		39
Figura 2-13 – Curvas de força <i>versus</i> deslocamento da macrofibra A com extremidades preenchidas por resina em molde de 5 mm		43
Figura 2-14 – Curvas de tensão <i>versus</i> deformação específica da macrofibra A com extremidades preenchidas por resina em molde de 5 mm		44
Figura 2-15 – Curvas de Força <i>versus</i> deslocamento da macrofibra A com extremidades preenchidas por resina em molde de 8 mm		45
Figura 2-16 – Curvas de tensão <i>versus</i> deformação específica da macrofibra A com extremidades preenchidas por resina em molde de 8 mm		46
Figura 2-17 – Curvas de força <i>versus</i> deslocamento da macrofibra B.....		48
Figura 2-18 – Curvas de tensão <i>versus</i> deformação específica da macrofibra B.		48
Figura 2-19 – Macrofibra A após ruptura.....		50

Figura 2-20 – Macrofibra B após ruptura.....	50
Figura 2-21 – Curvas médias de força versus deslocamento.....	50
Figura 2-22 – Curvas médias de resistência a tração versus deformação específica	51
Figura 2-23 – Resultados do efeito das macrofibras sobre a consistência	53
Figura 3-1 – Fibras atuando como ponte de transferência de tensões (MEDEIROS, 2012).....	56
Figura 3-2 – Montagem típica do ensaio 3PBT	59
Figura 3-3 – Detalhe do posicionamento do clip gage.	59
Figura 3-4 – Arranjo típico com controle do deslocamento vertical. Fonte: EN 14651 (2007).....	60
Figura 3-5 – Comportamento de softening e hardening. Fonte: <i>fib</i> Model Code 2010 (<i>fib</i> , 2013)	61
Figura 3-6 – Exemplo do Ensaio Barcelona	61
Figura 3-7 – Parâmetros de carga para ensaios com medida do deslocamento vertical (Prática Recomendada IBRACON/ABECE, 2017a).....	62
Figura 3-8 – Moldagem dos corpos de prova	64
Figura 3-9 – Corpo de prova posicionado para o ensaio 3PBT máquina Instron	64
Figura 3-10 – Corpo de prova posicionado para o ensaio 3PBT máquina Intermetric	64
Figura 3-11 – Curva típica de carga versus abertura de fissura no ensaio 3PBT.	65
Figura 3-12 – Ensaio de Duplo Puncionamento (DPT)	66
Figura 3-13 – 3PBT - curvas carga-CMOD do concreto sem fibras	69
Figura 3-14 – 3PBT - curvas carga-CMOD com 3,8 kg/m ³ da macrofibra A	69
Figura 3-15 – 3PBT - curvas carga-CMOD com 7,6 kg/m ³ da macrofibra A	70
Figura 3-16 – 3PBT - curvas carga-CMOD com 11,5 kg/m ³ da macrofibra A ..	70
Figura 3-17 – 3PBT - curvas carga-CMOD com 4,5 kg/m ³ da macrofibra B	72
Figura 3-18 – 3PBT - curvas carga-CMOD com 9,0 kg/m ³ da macrofibra B	72
Figura 3-19 – 3PBT - curvas carga-CMOD com 13,5 kg/m ³ da macrofibra B ..	73
Figura 3-20 – Curvas médias do ensaio 3PBT para a macrofibra A	74
Figura 3-21 – Curvas médias do ensaio 3PBT para a macrofibra B	75

Figura 3-22 – Resistência média residual a tração na flexão <i>versus</i> teor de macrofibra A.....	76
Figura 3-23 – Resistência média residual a tração na flexão <i>versus</i> teor de macrofibra B.....	77
Figura 3-24 – f_{R1m}/f_{Lm} <i>versus</i> teor de fibra	78
Figura 3-25 – f_{R3m}/f_{R1m} <i>versus</i> teor de fibra	78
Figura 3-26 – Resistência característica residual a tração na flexão <i>versus</i> teor de macrofibra A.....	80
Figura 3-27 – Resistência característica residual a tração na flexão <i>versus</i> teor de macrofibra B	80
Figura 3-28 – f_{R1k}/f_{Lk} <i>versus</i> teor de macrofibra A.....	81
Figura 3-29 – f_{R3k}/f_{R1k} <i>versus</i> teor de macrofibra B	82
Figura 3-30 – Curvas de carga residual x deslocamento vertical no DPT para a macrofibra A (a) 3,8 kg/m ³ , (b) 7,6 kg/m ³ e (c) 11,5 kg/m ³	84
Figura 3-31 – Curvas de carga residual x deslocamento vertical no DPT para a macrofibra B (a) 4,5 kg/m ³ , (b) 9,0 kg/m ³ e (c) 13,5 kg/m ³	87
Figura 3-32 – Curvas médias do ensaio DPT para a macrofibra A	89
Figura 3-33 – Curvas médias do ensaio DPT para a macrofibra B	89
Figura 4-1 – Correspondência das cargas residuais experimentais dos ensaios 3PBT e DPT para a macrofibra A.....	98
Figura 4-2 – Correspondência das cargas residuais experimentais dos ensaios 3PBT e DPT para a macrofibra B.....	99
Figura 4-3 – Correspondência das cargas residuais experimentais dos ensaios 3PBT e DPT	100
Figura 4-4 – Correlação entre os resultados experimentais e as estimativas das cargas residuais do ensaio 3PBT para a macrofibra A	102
Figura 4-5 – Correlação os resultados experimentais e as estimativas das cargas residuais do ensaio 3PBT para a macrofibra B	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Tolerâncias admitidas na caracterização geométrica das macrofibras.....	28
Tabela 2-2 – Características das macrofibras informadas pelo fabricante.....	32
Tabela 2-3 – Teores de zircônio determinados nas macrofibras por meio da técnica ICP-OES.	39
Tabela 2-4 – Teores de material combustível determinados nas macrofibras.	39
Tabela 2-5 – Teores de dióxido de zircônio das macrofibras	40
Tabela 2-6 – Resultados da caracterização geométrica das macrofibras de vidro.	40
Tabela 2-7 – Variações medidas na caracterização das macrofibras de vidro.	41
Tabela 2-8 – Caracterização mecânica das macrofibras A na primeira etapa.	42
Tabela 2-9 – Caracterização mecânica das macrofibras A na segunda etapa.	44
Tabela 2-10 – Caracterização mecânica das macrofibras de vidro B.	47
Tabela 2-11 – Resultado do efeito das macrofibras sobre a consistência	52
Tabela 3-1 – Traço da matriz de concreto utilizado.....	63
Tabela 3-2 – Teores de fibra utilizados	63
Tabela 3-3 – Caracterização mecânica do CRF com a macrofibra A.....	68
Tabela 3-4 – Caracterização mecânica do CRF com a macrofibra B.....	68
Tabela 3-5 – Resultados médios de resistência à tração e residuais da macrofibra A.....	71
Tabela 3-6 – Resultados médios de resistência à tração e residuais da macrofibra B.....	73
Tabela 3-7 – Resultados médios dos ensaios DPT da macrofibra A	84
Tabela 3-8 – Resultados médios da energia dos ensaios DPT da macrofibra A	85
Tabela 3-9 – Resultados médios dos ensaios DPT da macrofibra B	87
Tabela 3-10 – Resultados médios da energia dos ensaios DPT da macrofibra B	88
Tabela 4-1 – Constantes utilizadas para a estimativa dos resultados de 3PBT utilizando resultados do DPT.....	97

Tabela 4-2 – Comparação das resistências no limite de proporcionalidade (f_{LOP}) estimadas e determinadas experimentalmente no ensaio 3PBT.....	101
---	-----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3PBT – *Three Point Bending Test*

ABECE – Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANOVA – Análise de variância

AR – Álcali Resistente

ASTM – *American Society for Testing Materials*

CRF – Concreto Reforçado com Fibras

CRFV - Concreto Reforçado com Fibras de Vidro

CMOD – *Crack Mouth Opening Displacement*

DPT – *Duble Punch Test*

GRC – *Glassfiber reinforced cement*

GFRC – *Glass fiber reinforced cement*

ELS – Estado Limite de Serviço

ELU – Estado Limite Último

EN – Norma Europeia

FIB – *Fédération internationale du béton*

IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto

ICP OES – Espectrometria de Emissão Óptica

ISO – *International Organization for Standardization*

JSCE – *Japan Society of Civil Engineers*

LOP – Limite de Proporcionalidade

SINAT – Sistema Nacional de Avaliação Técnica

TCOD – *Total Circumferential Opening Displacement*

UNE – *Norma Española*

LISTA DE SÍMBOLOS

P_f	Carga no ponto do surgimento de fissuração
$P_{0,5}$	Carga residual para valor de deslocamento vertical de 0,5 mm
$P_{1,5}$	Carga residual para valor de deslocamento vertical de 1,5 mm
$P_{2,5}$	Carga residual para valor de deslocamento vertical de 2,5 mm
$P_{3,5}$	Carga residual para valor de deslocamento vertical de 3,5 mm
F_L	Carga no limite de proporcionalidade
F_{R1}	Carga residual para valor de abertura de fissura (CMOD) de 0,5 mm
F_{R2}	Carga residual para valor de abertura de fissura (CMOD) de 1,5 mm
F_{R3}	Carga residual para valor de abertura de fissura (CMOD) de 2,5 mm
F_{R4}	Carga residual para valor de abertura de fissura (CMOD) de 3,5 mm
n	Número de fissuras radiais formadas no ensaio
a	Diâmetro do disco de carga utilizado no ensaio
l	Comprimento da cunha formada sob o disco de carga
H	Altura do corpo de prova no ensaio DPT
δ_p	Deslocamento vertical no ensaio DPT
δ_i	Deslocamento no ponto calculado
f_t	Resistência à fissuração no ensaio DPT
$f_{R,\delta p}$	Resistencia residual para um deslocamento vertical δ_p no ensaio DPT
$f_{R0,5}$	Resistencia residual para um deslocamento vertical 0,5 no ensaio DPT
$f_{R1,5}$	Resistencia residual para um deslocamento vertical 1,5 no ensaio DPT
$f_{R2,5}$	Resistencia residual para um deslocamento vertical 2,5 no ensaio DPT
$f_{R3,5}$	Resistencia residual para um deslocamento vertical 3,5 no ensaio DPT
f_{LOP}	Resistência no limite de proporcionalidade
f_{Lm}	Resistência média no limite de proporcionalidade
f_{R1m}	Resistência residual média para valor de abertura de fissura (CMOD) de 0,5 mm
f_{R3m}	Resistência residual média para valor de abertura de fissura (CMOD) de 3,5 mm
f_{Lk}	Resistência característica no limite de proporcionalidade
f_{R1k}	Resistência residual característica para valor de abertura de fissura (CMOD) de 0,5 mm

f_{R3k}	Resistência residual característica para valor de abertura de fissura (CMOD) de 3,5 mm
f_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
p	Nível de significância de 5%

SUMÁRIO

1	Introdução	20
1.1	Contextualização e justificativa	20
1.2	Objetivos	23
1.3	Organização da dissertação.....	23
2	Caracterização de macrofibras de vidro álcali resistentes	25
2.1	Introdução	25
2.1.1	Objetivos do capítulo	26
2.2	Requisitos para avaliação de macrofibras de vidro	27
2.2.1	Compatibilidade com o meio alcalino	27
2.2.2	Caracterização geométrica	28
2.2.3	Resistência à tração e módulo de elasticidade da macrofibra	28
2.2.4	Efeito sobre a resistência residual	29
2.2.5	Efeito sobre a consistência	30
2.3	Programa experimental	31
2.3.1	Materiais	31
2.3.2	Compatibilidade com o meio alcalino	32
2.3.3	Caracterização física e geométrica.....	33
2.3.4	Resistência à tração e Módulo de Elasticidade	33
2.3.5	Efeito sobre a consistência	38
2.4	Resultados e Análises.....	39
2.4.1	Resultados de resistência ao meio alcalino	39
2.4.2	Resultados de caracterização física e geométrica.....	40
2.4.3	Resultados de resistência à tração e módulo de Elasticidade	42
2.4.3.1	Resultados da primeira etapa com a Macrofibra A	42
2.4.3.2	Resultados da segunda etapa com a Macrofibra A	44
2.4.3.3	Resultados com a macrofibra B	46
2.4.3.4	Comparativo entre as macrofibras avaliadas	49
2.4.4	Efeito sobre a consistência	52
2.5	Conclusões do capítulo	53

3	Comportamento pós-fissuração do CRFV	56
3.1	Introdução	56
3.1.1	Objetivos do capítulo	58
3.2	Comportamento mecânico do CRF	58
3.2.1	Ensaio de flexão	58
3.2.2	Ensaio de duplo puncionamento.....	61
3.3	Programa experimental	63
3.3.1	Preparação do concreto e moldagem dos corpos de prova	63
3.3.2	Métodos de ensaio flexão em três pontos com entalhe – 3PBT ...	64
3.3.3	Método de ensaio de duplo puncionamento – DPT	66
3.4	Resultados e análises	67
3.4.1	Caracterização mecânica dos concretos	67
3.4.2	Ensaio de Flexão de três pontos (3PBT)	69
3.4.2.1	Resultados obtidos para a macrofibra A	69
3.4.2.2	Resultados obtidos para a macrofibra B	72
3.4.2.3	Comparativo do ensaio 3PBT para as macrofibras A e B.	74
3.4.2.4	Análise dos requisitos para utilização do CRF em elementos estruturais	75
3.4.3	Ensaio de duplo puncionamento (DPT)	83
3.4.3.1	Resultados obtidos para a macrofibra A	83
3.4.3.2	Resultados obtidos para a macrofibra B	86
3.4.3.3	Comparativo do ensaio DPT para as macrofibras A e B...	89
3.5	Conclusões do capítulo	90
4	Correspondência entre os ensaios de flexão e de duplo puncionamento..	92
4.1	Introdução	92
4.1.1	Objetivos do capítulo	93
4.2	Alternativas para o estabelecimento de correlações entre os ensaios 3PBT e DPT	94

4.2.1	Correlação baseada em estudo experimental específico	94
4.2.2	Correlação proposta por Galobardes e Figueiredo (2015)	94
4.2.3	Correlação proposta por Galeote et al. (2017)	96
4.3	Metodologia.....	97
4.4	Resultados e análises	98
4.4.1	Correspondência direta entre os resultados experimentais de carga residual nos ensaios 3PBT e DPT	98
4.4.2	Resultados obtidos por meio da correlação proposta por Galobardes e Figueiredo (2015)	101
4.4.3	Resultados obtidos por meio da correlação proposta por Galeote et al (2017).....	102
4.5	Conclusões do capítulo	103
5	Considerações finais.....	105
5.1	Sugestões para pesquisas futuras	107

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e justificativa

Os materiais cimentícios apresentam um comportamento frágil, com baixa capacidade de deformação antes da ruptura quando submetido a esforços de tração. Quando fissurado, esse material perde a capacidade de resistir aos esforços de tração e, por essa razão, alternativas tecnológicas como as fibras descontínuas são utilizadas para compensar estas limitações.

Os concretos reforçados com fibras (CRF) são exemplos de materiais compostos, também conhecidos como compósitos, e são constituídos por uma matriz de concreto e algum tipo de fibra para reforço. Em concretos as fibras de aço são as mais tradicionais e vem sendo utilizadas desde a década de 50 (BENTUR, MINDES, 2007). As fibras sintéticas também são muito utilizadas, mas apenas as fibras de aço são normalizadas no Brasil para uso em concretos.

As fibras de vidro são outro material tradicionalmente utilizado no reforço de matrizes cimentícias em componentes conhecidos como GRC (*Glassfiber reinforced cement*) ou GFRC (*Glass fiber reinforced concrete*). Devido a alcalinidade da matriz cimentícia as fibras de vidro utilizadas devem ser álcali-resistentes (AR), o que é obtido pela adição do óxido de zircônio na sua produção. No Brasil, existem normas técnicas para os produtos cimentícios pré-fabricados com fibras de vidro AR (GRC). Porém, não existem normas nacionais para a caracterização dessas fibras.

Os CRF com macrofibras de vidro AR foram objeto de alguns estudos envolvendo aplicações estruturais como lajes em contato com meio elástico (BARRAGAN et al., 2014; LOBER et al., 2015) e tubos de concreto (PEYVANDI, SOROUSHIAN, JAHANGIRNEJAD, 2013). No âmbito nacional, a utilização das macrofibras de vidro está em fase inicial, com a aplicação em pisos e paredes de concreto moldadas no local. O primeiro passo para a utilização do CRF em paredes de concreto foi com a publicação em 2017 de uma Diretriz SINAT¹, que trouxe a

¹ DIRETRIZ SINAT Nº 001 – “Diretriz para Avaliação Técnica de paredes estruturais de concreto moldadas no local (Concreto Leve ou Concreto Reforçado com Fibra de Vidro)”, Revisão 03, publicada em junho de 2017.

possibilidade de utilização do Concreto Reforçado com Fibras de Vidro (CRFV) no sistema construtivo de paredes de concreto moldadas no local, com sua aplicação, embora incipiente, direcionada às casas e aos edifícios de até cinco pavimentos (CARNIO, 2018).

Ainda que possa ser considerado como uma tecnologia consagrada, a maior utilização das fibras ainda está concentrada em aplicações de baixo consumo de fibras e estruturas contínuas, como pavimentos e concreto projetado para revestimento de tuneis e taludes (FIGUEIREDO, 2011). Tais aplicações não requerem elevadas propriedades mecânicas para o reforço, resultando maior segurança aos projetistas para a especificação do material. Segundo Figueiredo (2014) para ampliar o uso do CRF para aplicações de maior demanda estrutural, como ocorre na Europa em lajes suspensas, são necessárias normas técnicas (EN 15422, 2008; EN 15191, 2009; UNE 83516, 2015) e/ou documentos técnicos como práticas recomendadas que subsidiem sua especificação com segurança. Um dos principais limitantes ainda é o controle tecnológico, que é fundamental para que as obras de engenharia sejam executadas com qualidade e responsabilidade.

Para o controle tecnológico do CRF devem ser realizados ensaios capazes de avaliar o comportamento pós-fissuração, no qual a fibra atua efetivamente. Porém, esses ensaios são mais complexos e exigem equipamentos mais avançados, quando comparado aos ensaios de controle do concreto simples. Por essa razão, poucos são os laboratórios capacitados para a execução de ensaios de caracterização do CRF disponíveis no Brasil (FIGUEIREDO, 2014).

A publicação do *fib* Model Code 2010 (*fib*, 2013) pode ser considerada um marco para o CRF, considerando a utilização das fibras de aço, e também uma tendência para outras fibras que estão em estudo, como a fibra de vidro ou sintética. Isto porque o documento trouxe orientações para o projeto de estruturas de concreto com uso de fibras como substituição parcial ou total da armadura convencional. Esta filosofia orientou a prática recomendada elaborada pelo comitê técnico CT-303 do IBRACON (Instituto Brasileiro do Concreto) e ABECE (Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural) (Prática Recomendada IBRACON/ABECE, 2016).

O ensaio preconizado pela norma europeia EN 14651 (2007), baseado na flexão de prismas com entalhe, foi adotado pelo *fib* Model Code 2010 (*fib*, 2013) como método para parametrização do comportamento mecânico do CRF. Esse método de ensaio necessita de um equipamento tecnologicamente mais avançado, dificultando sua difusão nos laboratórios. O *fib* Model Code 2010 não descarta a possibilidade de ser utilizado outro método de ensaio, desde que fatores de correlação com o ensaio de flexão EN 14651 sejam indicados.

O comitê técnico CT-303 do IBRACON/ABECE ciente das dificuldades de se realizar o ensaio de flexão de vigas com entalhe propôs uma prática recomendada para controle tecnológico (Prática recomendada IBRACON/ABECE, 2017a) que apresenta, além de um procedimento para a execução do ensaio de flexão, o ensaio de duplo puncionamento como ensaio alternativo para o controle tecnológico do CRF.

O ensaio de duplo puncionamento (DPT), também denominado ensaio Barcelona, é normalizado na Espanha (UNE 83515, 2010). Dentre suas vantagens em comparação aos tradicionais ensaios de flexão podem ser incluídas a facilidade de produção, transporte e manuseio dos corpos de prova que são menores e mais leves, e o uso de máquinas de ensaio mais convencionais com controle de deslocamento do pistão ou travessa. Algumas correlações entre o ensaio de flexão com entalhe e o DPT foram propostas utilizando as fibras de aço, (CARMONA, AGUADO, MOLINS, 2012; GALO BARDES, FIGUEIREDO, 2015; GALEOTE et al., 2017), porém ainda são necessários maiores avanços nas pesquisas como outros tipos de compósitos e fibras.

O controle de qualidade não pode ser restrito somente ao controle tecnológico do compósito. Outras características como o controle dimensional, resistência mecânica e a verificação da resistência ao meio alcalino das fibras também são importantes para a qualidade na utilização do material. Como não existe normalização técnica para as fibras de vidro, o comitê técnico CT-303 do IBRACON/ABECE propôs uma prática recomendada para essas macrofibras (Prática recomendada IBRACON/ABECE, 2017b). Essa prática recomendada apresenta os requisitos para macrofibras de vidro álcali-resistentes (AR) para uso estrutural em concreto.

Nesse contexto essa dissertação foi desenvolvida com a finalidade de discutir alternativas tecnológicas para a caracterização de concretos com macrofibras de vidro para aplicação estrutural.

1.2 Objetivos

O objetivo geral é avaliar e propor metodologias para a caracterização e controle tecnológico do concreto com macrofibras de vidro para aplicação estrutural.

Para alcançar esse objetivo geral serão cumpridos os seguintes objetivos específicos:

- Apresentar e discutir metodologias para caracterização física e geométrica de macrofibras de vidro;
- Desenvolver uma metodologia para caracterização mecânica de macrofibras de vidro;
- Caracterizar o comportamento pós-fissuração do concreto com macrofibras de vidro com ensaios de flexão de vigas com entalhe e duplo puncionamento;
- Avaliar o atendimento dos requisitos do *fib* Model Code 2010 e da prática recomendada IBRACON/ABECE para o dimensionamento de estruturas com CRF;
- Verificar a correlação entre os resultados experimentais dos ensaios estudados e avaliar a aplicação de correlações existentes na literatura.

1.3 Organização da dissertação

Esta dissertação de mestrado será organizada em cinco capítulos, conforme apresentado a seguir.

No Capítulo 1 é apresentada a contextualização e as motivações para a realização da dissertação. Além disso, o objetivo geral e os objetivos específicos estão apresentados, bem como a organização do trabalho.

O Capítulo 2 aborda a caracterização das macrofibra de vidro, incluindo a caracterização geométrica e mecânica diretamente na fibra. Uma metodologia foi

proposta, visto que as normas pertinentes abrangem somente ensaios de tração no fio.

No Capítulo 3 o foco é na caracterização do comportamento pós fissuração do CRF. Uma campanha experimental é apresentada com o ensaio de flexão três pontos com entalhe e o ensaio de duplo puncionamento. Esta análise possibilita relacionar os parâmetros de projeto e de controle tecnológico.

O Capítulo 4 apresenta as equações e correlações encontradas na literatura para relacionar os resultados do ensaio de flexão três pontos com entalhe (EN 14651, 2007) e o ensaio de duplo puncionamento (UNE 83515, 2010).

O Capítulo 5, apresenta as conclusões gerais e específicas em resposta aos objetivos propostos. Além disso, algumas perspectivas de trabalhos futuros são apresentadas.

2 CARACTERIZAÇÃO DE MACROFIBRAS DE VIDRO ÁLCALI RESISTENTES

2.1 Introdução

As fibras são elementos discretos que possuem comprimento muito maior que a seção transversal e podem apresentar diferentes propriedades mecânicas, físicas e químicas, que resultam diferentes capacidades de reforço para o concreto. Essas podem ser naturais como as fibras de bambu, sisal, celulose, entre outras, ou produzidas na indústria como as fibras de aço, polipropileno, carbono, vidro, etc.

A seleção do material de reforço para um projeto deve levar em conta características relevantes para a obtenção do comportamento mecânico do compósito e da durabilidade prevista. Além disso, deve ser previsto um controle de qualidade de modo a garantir o atendimento das características definidas no projeto. Com isto, evita-se limitar às informações fornecidas pelos fabricantes. O controle das características das fibras pode minimizar riscos de insucesso da tecnologia e trazer segurança para a aplicação do material, especialmente em aplicações estruturais.

As fibras de aço são caracterizadas segundo a norma brasileira ABNT NBR 15530 (2007), que estabelece parâmetros para a sua classificação e os requisitos mínimos geométricos, as tolerâncias dimensionais e os limites quanto aos defeitos de fabricação. Com isto é possível realizar um controle mínimo do material e reduzir o risco de utilização de produto de qualidade duvidosa. No caso das fibras de outros materiais, como as sintéticas e as de vidro, ainda não há normalização nacional, ficando o projeto sujeito as informações disponibilizadas por fabricantes.

As fibras de vidro, em especial as álcali-resistentes, são utilizadas há muito tempo no reforço de materiais cimentícios mais conhecidos como GRC (*Glass fiber reinforced cement*) (BENTUR, MINDESS, 2007). Neste caso são utilizadas microfibras de vidro. As microfibras são aquelas que apresentam comprimento máximo de 30 mm e diâmetro de até 0,30 mm (Prática Recomendada IBRACON/ABECE, 2017b). As principais aplicações das microfibras de vidro, como já mencionado, são em painéis de GRC, porém as microfibras também são encontradas em pisos de concreto, barras e outras aplicações estruturais (WOLF DE GOIS et al., 2016; D'ANTINO, 2018).

Também existem as macrofibras de vidro que tem dimensões superiores a 30 mm de comprimento e 0,30 mm diâmetro (Prática recomendada IBRACON/ABECE, 2017b). A utilização destas macrofibras são mais recentes e tem sua principal aplicação em concretos, desenvolvidos como material alternativo às fibras de aço ou as macrofibras sintéticas. Além da utilização em pavimentos industriais e elementos pré-moldados, essas macrofibras foram objeto de avaliação do SINAT (Sistema Nacional de Avaliação Técnica) para aplicação em paredes de concreto moldadas no local para a construção de unidades habitacionais de interesse social.

Com o aumento da demanda de utilização das fibras de vidro é necessário conhecer o material, suas características e as propriedades mecânicas. A prática recomendada publicada pelo IBRACON/ABECE (Prática Recomendada IBRACON/ABECE, 2017b), apresentou as definições, especificações e conformidades para a caracterização das macrofibras de vidro, nos requisitos geométricos, físico e mecânicos do compósito o que, no Brasil, representou uma importante evolução na utilização das macrofibras de vidro e sua caracterização. O ensaio de resistência a tração é realizado no fio de vidro, o que para o consumidor final é um processo bastante complicado, pois ficam restritos a disponibilidade do fabricante. Por isso, métodos alternativos de caracterização onde o ensaio de tração é realizado diretamente na macrofibra são relevantes.

2.1.1 Objetivos do capítulo

O objetivo deste capítulo é apresentar e discutir metodologias para caracterizar física, geométrica e mecanicamente as macrofibras de vidro. Uma metodologia para a caracterização mecânica diretamente na amostra da macrofibra de vidro sem a necessidade do fio é proposta.

2.2 Requisitos para avaliação de macrofibras de vidro

A avaliação das macrofibras de vidro quanto as suas características, se faz importante para que quando utilizadas como reforço para concretos proporcionem o resultado esperado em elementos estruturais. No mundo existem algumas normas que direcionam a avaliação das macrofibras de vidro, entretanto, a maior parte delas se restringe a avaliações diretamente no fio e não na macrofibra.

No Brasil, a prática recomendada produzida pelo CT 303 IBRACON/ABECE define algumas características para as macrofibras de vidro álcali-resistentes (AR) para concreto destinado a aplicações estruturais (Prática Recomendada IBRACON/ABECE, 2017b). As seguintes caracterizações são indicadas:

- Compatibilidade com o meio alcalino
- Caracterização geométrica
- Resistência à tração e Módulo de elasticidade
- Efeito sobre a resistência residual do CRF
- Efeito sobre a consistência

2.2.1 Compatibilidade com o meio alcalino

As fibras de vidro devem ser resistentes a alcalinidade do concreto, que é garantida pela introdução de teores elevados de zircônio na produção das fibras. Essa informação é normalmente apresentada pelo fabricante ou fornecedor da fibra, que deve declarar que a fibra é álcali-resistente. A presença do zircônio pode ser avaliada por análise de fluorescência de raios X ou outra técnica que seja capaz de quantificar com precisão a presença desse composto no vidro que compõe a fibra.

A norma europeia EN 15422 (2008) indica que as fibras de vidro AR devem apresentar teor de óxido de zircônio superior a 16%, indicando o uso da técnica de fluorescência de raios X.

2.2.2 Caracterização geométrica

A caracterização geométrica das fibras é importante pois o comportamento pós-fissuração do concreto depende muito da geometria da fibra que está sendo utilizada (FIGUEIREDO, 2011). As características avaliadas são o comprimento, o diâmetro ou diâmetro equivalente caso a seção seja irregular e a razão dessas duas medidas que é denominado fator de forma. As tolerâncias admitidas para os parâmetros da caracterização geométrica são indicadas na Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2017b) e estão apresentadas na Tabela 2-1.

Tabela 2-1 – Tolerâncias admitidas na caracterização geométrica das macrofibras.
Fonte: Prática Recomendada IBRACON/ABECE, 2017b

<i>Característica</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Desvio máximo admissível do valor individual medido em relação ao valor declarado</i>	<i>Desvio máximo admissível do valor médio medido em relação ao valor declarado</i>
Comprimento	L	±10%	±5%
Diâmetro equivalente	d_e	±50%	±5%
Fator de forma	λ	±50%	±5%

A Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2017b) indica que a medida do comprimento das macrofibras deve ser feita em pelo menos 30 amostras, manualmente com uso de paquímetro ou com auxílio de equipamento óptico, com precisão mínima 0,1 mm. Quanto ao diâmetro equivalente o documento indica que para macrofibras com seção circular o diâmetro pode ser medido diretamente com uso de micrômetro de precisão 0,001 mm. Alternativamente, o diâmetro equivalente pode ser determinado de maneira indireta conhecendo a massa, o comprimento e a densidade da macrofibra.

2.2.3 Resistência à tração e módulo de elasticidade da macrofibra

A importância da resistência mecânica e módulo de elasticidade das fibras para o comportamento pós-fissuração do CRF foi apontada por vários autores (NAAMAN, 2003; BENTUR, MINDESS, 2007; FIGUEIREDO, 2011).

A Prática recomendada IBRACON/ABECE (2017b) orienta que a resistência à tração seja determinada no fio original e utilizando o método de ensaio prescrito na

norma ISO 3341 (2000) ou método equivalente quando as fibras apresentarem tratamento superficial ou camada de resina. As tolerâncias para essa determinação devem seguir a norma europeia EN 15422 (2008) que indica que a fibra de vidro deve apresentar resistência à tração entre 1000 e 1700 MPa.

Quanto ao módulo de elasticidade sua determinação, segundo a prática recomendada, se dará durante a realização do ensaio de tração. Considerando o gráfico tensão versus deformação específica, o módulo de elasticidade será calculado a partir da inclinação de uma secante que intercepta valores de 20% e 40% da tensão de ruptura.

Cáceres, Galobardes e Figueiredo (2016) discutiram as limitações em se avaliar as propriedades mecânicas de macrofibras poliméricas no fio original. A principal delas é que apenas o fabricante possui o material para realização dos ensaios. No caso das macrofibras sintéticas os autores indicaram a importância de se avaliar o comportamento mecânico na fibra, pois a variação encontrada nos materiais disponíveis pode ser grande e o consumidor precisa ter ferramentas para avaliá-los.

2.2.4 Efeito sobre a resistência residual

Os parâmetros de projeto de estruturas com CRF segundo o *fib* Model Code 2010 (fib, 2013) e a Prática recomendada IBRACON/ABECE (2016) são baseados em resistências LOP e residuais determinadas para CMOD igual a 0,5 mm e 2,5 mm. Essas determinações são realizadas com o método de ensaio de flexão de vigas com entalhe indicado na norma europeia EN 14651 (2007).

Considerando que esses são os parâmetros de interesse do projetista uma das informações relevantes para a escolha da macrofibra a ser adotada em um projeto é a quantidade de fibras necessária para alcançar determinado comportamento pós-fissuração em um concreto de referência ou padrão. Esse tipo de informação possibilita um conhecimento prévio do potencial da macrofibra antes da realização de um estudo prévio de dosagem.

Na Prática recomendada IBRACON/ABECE (2017b) são indicados dois concretos de referência para a avaliação do comportamento das macrofibras de vidro. Um deles deve ter resistência à tração (limite de proporcionalidade ou LOP) de $(4,3 \pm 0,3)$ MPa. Para esse concreto, o teor de fibra a ser determinado deve atingir uma resistência residual média de pelo menos 1,60 MPa com 0,5 mm de CMOD (f_{R1m}) e uma resistência residual média de pelo menos 0,80 MPa com 2,5 mm de CMOD (f_{R3m}). O segundo concreto de referência deve ter resistência à tração (limite de proporcionalidade ou LOP) $(5,3 \pm 0,3)$ MPa. Para esse concreto, o teor de fibra a ser determinado deve atingir uma resistência residual média de pelo menos 2,00 MPa com 0,5 mm de CMOD (f_{R1m}) e uma resistência residual média de pelo menos 1,00 MPa com 2,5 mm de CMOD (f_{R3m}).

2.2.5 Efeito sobre a consistência

A introdução de fibras altera as condições de consistência e mobilidade da mistura de concreto (FIGUEIREDO, 2011). Essa influência pode ser maior ou menor em função das características da fibra, como seu material e geometria e, claro, pelo volume adicionado.

Para avaliar o efeito da adição das fibras na consistência do concreto a Prática recomendada IBRACON/ABECE (2017b) indica que seja produzido um concreto de referência com consistência inicial de $120 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$. A consistência deve ser determinada de acordo com o ensaio de abatimento do tronco de cone (ABNT NBR NM 67, 1998). As determinações são realizadas antes e após a introdução das fibras, devendo ser determinada a diferença entre os valores obtidos em milímetros. O documento salienta ainda que essa determinação deve, pelo menos, ser realizada utilizando os teores de fibras necessários para atingir a resistência residual dos concretos de referência indicados no item 2.2.4.

2.3 Programa experimental

O programa experimental utilizou macrofibras de vidro disponíveis no mercado brasileiro indicadas, segundo o fabricante, para uso em concretos com finalidade estrutural. Algumas caracterizações foram baseadas no documento da prática recomendada IBRACON/ABECE para macrofibras de vidro (Prática Recomendada IBRACON/ABECE 2017b), mas também foram propostas novas metodologias de ensaio. A seguir são descritas as macrofibras utilizadas e a descrição das metodologias adotadas.

2.3.1 Materiais

Para a pesquisa foram utilizadas duas macrofibras de vidro disponíveis no mercado nacional. Uma delas, denominada por macrofibra A, pode ser caracterizada como um compósito de fibras de vidro e resina termofixa. Outra, denominada macrofibra B, é composta por filamentos de fibra de vidro ligados por uma fina camada de silano e polímero em proporções não declaradas pelo fabricante. A Figura 2-1 ilustra as macrofibras utilizadas no estudo. As principais características indicadas pelo fabricante para as macrofibras estão apresentadas na Tabela 2-2.

Figura 2-1 – a) Macrofibra A

(b) Macrofibra B

Tabela 2-2 – Características das macrofibras informadas pelo fabricante

Características	Macrofibra A	Macrofibra B
Comprimento [mm]	43	36
Diâmetro [mm]	0,70	0,54 *
Fator de forma	61 *	67
Densidade específica [g/cm³]	2,0 ± 0,1	2,68
Módulo de elasticidade [GPa]	42	72
Resistencia à tração [MPa]	> 1000	1000 - 1700
*Valores estimados com base nas informações declaradas pelo fabricante		

2.3.2 Compatibilidade com o meio alcalino

A utilização das macrofibras de vidro depende da confirmação de resistência em meio alcalino pois, caso contrário, perdem seu poder de reforço ao longo do tempo. A norma europeia (EN 15422, 2008) indica que para uma fibra de vidro ser considerada álcali resistente é necessário a presença de no mínimo 16% de dióxido de zircônio (ZrO_2). O cálculo estequiométrico da Eq. 2-1, com a massa atômica do oxigênio de 16 u e do Zircônio de 91,22 u, resulta que 11,8% de Zircônio é necessário para produzir 16% de dióxido de zircônio.

Para análise foram encaminhadas 30 g de cada macrofibra para determinação química quantitativa por espectrometria de emissão óptica (ICP OES) com digestão multiácida. Como essa técnica realiza a solubilização quase completa da amostra o resultado é diretamente a dosagem de Zircônio (Zr) e não do óxido (ZrO_2).

O zircônio é incorporado à massa de vidro utilizada para produzir as macrofibras. O percentual de resinas e silano nas macrofibras não foram informados pelo fabricante e, por isso, as macrofibras foram avaliadas quanto ao teor de material combustível segundo a norma ISO 1887 (2014). Com isso é possível que o percentual desses componentes seja descontado no cálculo do percentual de zircônio presente em cada macrofibra. A norma ISO 1887 (2014) indica que essa determinação seja feita em amostras de no mínimo 5 g de fibra e utilizando um suporte de material resistente a alta temperatura. Antes de colocar a fibra o suporte deve ser colocado em

mufla a uma temperatura de $625\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e mantido em dessecador até atingir a temperatura ambiente para pesagem com precisão de 0,1 mg. Em seguida, a amostra de fibra é colocada no suporte e o conjunto é pesado com precisão de 0,1 mg. O conjunto é então colocado em estufa a uma temperatura de $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 30 minutos, mantido em dessecador até atingir a temperatura ambiente para pesagem com precisão de 0,1 mg. Por fim, o conjunto é colocado em mufla a uma temperatura de $625\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 1 hora, retirado da mufla e mantido em dessecador até atingir a temperatura ambiente para pesagem com precisão de 0,1 mg.

2.3.3 Caracterização física e geométrica

Para a análise das características geométricas foram ensaiadas 30 amostras selecionadas aleatoriamente das caixas recebidas do fabricante. Nas amostras foram determinados o comprimento (L), com paquímetro digital com precisão de 0,1 mm.

A densidade (ρ) das macrofibras foi determinada utilizando o picnômetro de gás hélio (Multipycnometer Quantachrome MVP 5DC) a $26\text{ }^{\circ}\text{C}$. A massa (m) das macrofibras foi pesada em balança de precisão de 0,1 mg. Para o cálculo do diâmetro (d) foi utilizada a Eq. 2-2.

$$d = \sqrt{\frac{4000 \cdot m}{\pi \cdot \rho \cdot L}} \quad 2-2$$

Onde:

d é o diâmetro da macrofibra, em cm;

m é a massa da macrofibra, em g;

ρ é a densidade da macrofibra, em g/cm^3 ;

L é o comprimento da macrofibra, em cm.

Com o comprimento (L) e o diâmetro (d) foi calculado o fator de forma (L/d) de cada macrofibra.

2.3.4 Resistência à tração e Módulo de Elasticidade

A norma ISO 3341 (2000) descreve o procedimento de ensaio para tração de fios de vidro. Segundo a prática recomendada, o fabricante deverá declarar os valores

desta caracterização uma vez que o consumidor final não tem acesso a amostra do fio. Por isso, buscou-se desenvolver uma metodologia de avaliação da resistência mecânica diretamente na macrofibra tendo como referência a pesquisa realizada por Cáceres, Galobardes e Figueiredo (2016). Esses autores propuseram uma metodologia para a determinação da resistência mecânica e módulo de elasticidade das macrofibras poliméricas.

A norma ASTM D2256 (2015) descreve o procedimento para análise da resistência a tração de vários tipos de fios, inclusive de fios de vidro. Como a metodologia descrita é aplicada a fios, o método de fixação e o comprimento da amostra proposto não são compatíveis com o teste diretamente nas macrofibras, pois as mesmas são menores que os fios. Assim, o primeiro ponto de atenção no ensaio de resistência a tração diretamente na fibra foi garantir a fixação, eliminando qualquer possibilidade de escorregamento da amostra.

Os primeiros ensaios mecânicos foram realizados com a macrofibra A. A primeira tentativa foi a realização do ensaio de tração fixando a macrofibra diretamente nas garras da máquina de ensaio, mas a fibra foi esmagada e não foi possível determinar sua resistência à tração. Buscou-se então alternativas para garantir a fixação embebendo as extremidades das macrofibras em resina epóxi, conforme mostra a Figura 2-2. Para este procedimento, foram utilizados moldes plásticos com 5 mm de diâmetro para colocação da resina na extremidade da fibra.

Figura 2-2 – Macrofibra A com extremidades embebidas em resina com de 5 mm de diâmetro

Após a secagem da resina e retirada dos moldes plásticos notou-se que algumas extremidades ficaram com o comprimento embebido menor que a altura do molde (Figura 2-3). Isso ocorreu durante o preenchimento do molde devido a

viscosidade da resina e o surgimento de bolhas de ar no interior do molde. Com isso, o comprimento embebido em resina variou entre 5 e 10 mm.

Figura 2-3 – Macrofibra A com extremidades embebidas com comprimento não uniforme.

As macrofibras com maior comprimento embebido em resina foram selecionadas para os ensaios. A resina epóxi possibilitou a fixação das amostras nas garras do equipamento de ensaio (Figura 2-4), garantindo que a força aplicada fosse transferida para a fibra, sem escorregamentos. Todas as rupturas ocorreram no centro das amostras, conforme ilustra a Figura 2-5.

Figura 2-4 – Macrofibra A após fixação entre as garras da máquina

Figura 2-5 – Macrofibra A após ensaio

Nesta etapa os ensaios foram realizados em uma Máquina Instron, Modelo 5569, com célula de carga de 1 kN e velocidade de deslocamento constante de 0,5 mm/min.

Para facilitar o procedimento de preenchimento com resina e garantir o comprimento embebido, outra campanha de ensaios de tração foi realizada com a utilização de moldes plásticos de diâmetro maior, com 8 mm de diâmetro. Para a macrofibra A o comprimento do molde foi igual a 15 mm em cada extremidade e para a macrofibra B foi de 10 mm, pois a mesma é menor. Para centralizar a fibra no molde foi utilizado massa de modelar no fundo do molde (Figura 2-6a). A resina foi introduzida no molde de um lado da fibra (Figura 2-6b) e no dia seguinte foi preenchido o outro lado (Figura 2-6c). A Figura 2-6d mostra uma macrofibra com as duas extremidades embebidas com a resina.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 2-6 – Etapas de preparação das extremidades das macrofibras com resina em moldes de 8 mm de diâmetro

Nesta etapa os ensaios com a macrofibra A foram realizados em outra máquina de marca EMIC Modelo DL10000. A célula de carga utilizada foi de 1kN e a velocidade de deslocamento constante e igual a 0,5 mm/min (Figura 2-7). Nestes ensaios, a ruptura também ocorreu no centro da fibra (Figura 2-8).

Figura 2-7 – Fixação da macrofibra A entre as garras do equipamento

Figura 2-8 – Macrofibra A após o ensaio com a ruptura na parte central da fibra

Já para a macrofibra B os ensaios foram realizados novamente na máquina Instron 5569 com célula de carga de 1 kN e velocidade de deslocamento constante de 0,5 mm/min, como na primeira etapa da macrofibra A (Figura 2-9). Nesta etapa as amostras também romperam no centro da macrofibra como ilustra a Figura 2-10.

O resultado do ensaio de tração diretamente na fibra foi expresso por curvas de carga versus deslocamento ($F \times \delta$). O resultado também foi convertido em curvas de tensão x deformação ($\sigma \times \epsilon$). A tensão de resistência a tração foi calculada dividindo a carga (F) pela área da seção transversal calculada usando diâmetro médio obtido pela Eq. 2-2.

Figura 2-9 – Fixação da macrofibra B entre as garras do equipamento

Figura 2-10 – Macrofibra B após o ensaio com a ruptura na parte central da fibra

O módulo de elasticidade foi estimado conforme proposto por Cáceres, Galobardes e Figueiredo (2016), que considera a tensão referente a 10 e 30% da resistência a tração da macrofibra e a respectiva deformação que é calculada pela divisão do deslocamento (δ) pelo comprimento não embebido.

2.3.5 Efeito sobre a consistência

Segundo a Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2017b), foi analisado o efeito sobre a consistência de todos os 6 teores de fibra estudados (3 com a macrofibra A e 3 com a macrofibra B). Em todos os casos, foi determinada a consistência por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone (ABNT NBR NM67, 1998) antes e após a adição das macrofibras. A diferença medida em milímetros indica a perda de consistência para cada teor estudado.

As Figura 2-11 e Figura 2-12 ilustram as medidas realizadas antes e após a adição das macrofibras.

Figura 2-11 – Medida do abatimento de tronco de cone antes da adição das macrofibras

Figura 2-12 – Medida do abatimento de tronco de cone após a adição das macrofibras

2.4 Resultados e Análises

2.4.1 Resultados de resistência ao meio alcalino

Os ensaios foram realizados para a identificação do teor de zircônio presente nas macrofibras estudadas. A Tabela 2-3 apresenta os resultados encontrados.

Tabela 2-3 – Teores de zircônio determinados nas macrofibras por meio da técnica ICP-OES.

	Macrofibra A	Macrofibra B
Teor de zircônio (%)	8,14	12,00

As macrofibras não são compostas unicamente de vidro. A macrofibra A é revestida por uma resina termoplástica e a macrofibra B contém uma pequena camada de silano que envolve os filamentos. Por essa razão, os teores de zircônio precisam ser ponderados em função do percentual de material combustível obtido conforme indicado na norma ISO 1887 (2014) e apresentados na Tabela 2-4.

Tabela 2-4 – Teores de material combustível determinados nas macrofibras.

	Macrofibra A	Macrofibra B
Teor de material combustível (%)	17,8	2,3

Conforme apresentado no item 2.3.2 a norma europeia EN 15422 (2008) indica que as fibras de vidro AR devem apresentar teor de óxido de zircônio (ZrO_2) superior a 16%, que correspondem a 11,8 % de zircônio (Zr). Realizando o cálculo estequiométrico e descontados os percentuais em massa de material combustível os teores de dióxido de zircônio determinados para cada macrofibra estão apresentados na Tabela 2-5.

Tabela 2-5 – Teores de dióxido de zircônio das macrofibras

	Macrofibra A	Macrofibra B
Teor de dióxido de zircônio (%)	13,38	16,58

Os resultados apresentados na Tabela 2-5 mostram que a macrofibra B apresentou teor de dióxido de zircônio superior a 16%. Entretanto, a macrofibra A não atingiu o mínimo indicado na norma europeia EN 15422 (2008). Como a técnica adotada foi diferente da indicada na norma, ainda que de elevada precisão, esses resultados precisam ser avaliados com cautela. Além disso, a macrofibra A possui um percentual alto de resina envolvendo os filamentos de fibra de vidro, similar ao encontrado nas barras de fibra de vidro que utiliza vidro tipo E que não é álcali resistente.

2.4.2 Resultados de caracterização física e geométrica

Os resultados da caracterização física e geométrica das macrofibras estão apresentados na Tabela 2-6.

Tabela 2-6 – Resultados da caracterização geométrica das macrofibras de vidro.

		<i>Densidade - ρ [g/cm³]</i>	<i>Comprimento L [mm]</i>	<i>Diâmetro - d [mm]</i>	<i>Fator de forma - L/d</i>
Macrofibra A	Média	1,96	42,7	0,73	59
	DP	0,03	0,9	0,02	2
Macrofibra B	Média	2,36	36,7	0,52	71
	DP	0,03	1,6	0,03	5

O resultado obtido para a densidade da macrofibra A encontra-se na faixa indicada pelo fabricante que é entre 1,9 e 2,1 g/cm³. Já para a macrofibra B o resultado obtido foi menor que o indicado pelo fabricante que é 2,68 g/cm³. Esse valor é a densidade do vidro, mas como a macrofibra é composta por um conjunto de filamentos a medida da densidade por picnometria de gás hélio resultou valor significativamente inferior. Acredita-se que essa diferença se deve ao gás não ter penetrado adequadamente entre os filamentos.

Comparando as características geométricas das macrofibras indicadas pelo fabricante (ver Tabela 2-2) e os resultados obtidos na Tabela 2-6 percebe-se que ambas as macrofibras apresentam resultados próximos aos indicados pelo fabricante.

No que se refere as tolerâncias, o comprimento e o fator de forma apresentados na Tabela 2-6, apresentaram variações dentro dos requisitos indicados pela Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2017b) (Tabela 2-1) com variação dos valores médios, em relação ao valor declarado pelo fabricante, inferior a 5%. Também foram analisados os valores individualmente e todos os resultados de comprimento, diâmetro equivalente e fator de forma ficaram dentro das tolerâncias indicadas na prática recomendada, conforme Tabela 2-7.

Tabela 2-7 – Variações medidas na caracterização das macrofibras de vidro.

	Comprimento L [mm]	Diâmetro – d [mm]	Fator de forma – L/d
Prática recomendada	±10%	±50%	±50%
Macrofibra A	- 5% a 6%	- 3% a 9 %	- 12% a 2%
Macrofibra B	- 4% a 8%	- 3% a 17%	- 18% a 7%

Vale mencionar que o fabricante não declarou o valor do diâmetro da macrofibra B. Provavelmente por ser um conjunto de filamentos que podem resultar em macrofibras de diferentes diâmetros variando conforme a quantidade de filamentos unidos em cada macrofibra. Mesmo assim, com base nos outros parâmetros declarados pelo fabricante, foi possível calcular o diâmetro igual a 0,54 mm, muito similar ao diâmetro médio obtido que foi de 0,52 mm.

2.4.3 Resultados de resistência à tração e módulo de Elasticidade

Os ensaios mecânicos foram iniciados pela macrofibra A em duas etapas, sendo a primeira etapa com 14 amostras ensaiadas na máquina Instron Modelo 5569 e a segunda etapa com 31 amostras ensaiadas na máquina EMIC modelo DL 10000. O uso de duas máquinas distintas se deve a indisponibilidade da máquina Instron quando foi realizada a segunda etapa de ensaios.

2.4.3.1 Resultados da primeira etapa com a Macrofibra A

Conforme apresentado na metodologia experimental os ensaios mecânicos foram realizados utilizando dois moldes para preparação das extremidades das macrofibras. Na primeira etapa as extremidades da macrofibra foram embebidas com resina utilizando um molde de 5 mm de diâmetro. Os resultados da primeira etapa de caracterização mecânica da macrofibra A estão apresentados na Tabela 2-8. Essa tabela também inclui os valores indicados pelo fabricante no catálogo do produto.

Tabela 2-8 – Caracterização mecânica das macrofibras A na primeira etapa.

<i>Características</i>	<i>Informação do catálogo</i>	<i>Número de amostras</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Coeficiente de Variação [%]</i>
<i>Força de ruptura [N]</i>	385		403	30	7
<i>Resistência de tração [MPa]</i>	> 1000	14	973	72	7
<i>Módulo de elasticidade [GPa]</i>	42		17	4	27

Considerando a dispersão dos resultados, observa-se na Tabela 2-8 que a média dos valores obtidos para a força de ruptura está em acordo com o valor apresentado pelo catálogo do fabricante. Porém, a resistência a tração calculada foi abaixo do mínimo valor indicado pelo fabricante. Essa diferença pode ser explicada pelo valor adotado para o diâmetro das amostras de macrofibra. Enquanto o fabricante adota no cálculo o valor nominal ($d = 0,70$ mm), neste estudo a resistência à tração foi calculada adotando o valor médio determinado experimentalmente (0,73 mm) e indicado na Tabela 2-6. Quanto ao módulo de elasticidade, este foi menor que o valor informado pelo fabricante e também o que apresentou maior variabilidade em

comparação a resistência à tração, cerca de 4 vezes maior. É importante ressaltar que para o cálculo do módulo de elasticidade foi utilizada a medida da deformação específica obtida considerando o deslocamento total entre as garras da máquina. Essa aproximação tende a superestimar a deformação e, portanto, subestimar o resultado do módulo de elasticidade. Tal aproximação foi adotada por Cáceres, Galobardes e Figueiredo (2016) para a determinação do módulo de elasticidade da macrofibra polimérica. No entanto, trata-se de um material muito mais deformável e, por isso, menos afetada por essa aproximação.

As curvas de força versus deslocamento e tensão versus deslocamento são apresentadas na Figura 2-13 e na Figura 2-14. As curvas claras representam os resultados obtidos por cada amostra e a curva escura representa a média dos resultados.

Figura 2-13 – Curvas de força *versus* deslocamento da macrofibra A com extremidades preenchidas por resina em molde de 5 mm

Figura 2-14 – Curvas de tensão *versus* deformação específica da macrofibra A com extremidades preenchidas por resina em molde de 5 mm

Analizando as curvas apresentadas na Figura 2-13 e na Figura 2-14 percebe-se que não foram evidenciados escorregamentos da macrofibra nas garras da máquina de ensaio. Observa-se também que as curvas apresentaram comportamento homogêneo.

2.4.3.2 Resultados da segunda etapa com a Macrofibra A

A segunda etapa de ensaios mecânicos foi realizada com as extremidades da macrofibra embebidas com resina utilizando um molde de 8 mm de diâmetro e comprimento de 15 mm. A síntese desses resultados está apresentada na Tabela 2-9, que também inclui os valores apresentados pelo fabricante no catálogo do produto.

Tabela 2-9 – Caracterização mecânica das macrofibras A na segunda etapa.

Características	Informação do catálogo	Número de amostras	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação [%]
Força de ruptura [N]	385		363	40	11
Resistência de Tração [MPa]	> 1000	31	875	96	11
Módulo de Elasticidade [GPa]	42		2,2	0,4	20

Nos resultados da segunda etapa do ensaio de tração também foi possível observar que a dispersão dos resultados foi baixa, com coeficiente de variação em torno de 11%. Entretanto, a média da força de ruptura foi menor do que a verificada nos ensaios da primeira etapa, apresentando uma redução de 10% na média. Os resultados obtidos para o módulo de elasticidade também apresentaram grande variação entre as duas etapas da campanha experimental. Os ensaios da primeira etapa, realizados com uma máquina Instron Modelo 5569, apresentaram resultado médio de módulo de elasticidade de 17 GPa, enquanto os ensaios da segunda etapa realizado em uma máquina EMIC modelo DL 10000 apresentou resultado médio de 2,2 GPa. A preparação das extremidades da fibra com resina foi diferente em ambos os ensaios, mas o aumento da quantidade de resina teve como objetivo aumentar a ancoragem da fibra e não deveria resultar uma redução do módulo de elasticidade determinado. Um dos aspectos que pode ter influenciado foi a diferença entre as garras de fixação das máquinas de ensaio, que poderiam influenciar diretamente a deformação medida em caso de escorregamentos. Esse escorregamento é claramente evidenciado nas curvas de ensaio obtidas com a máquina EMIC modelo DL 10000, o que resultou um maior deslocamento até que o carregamento fosse transferido para a fibra. As curvas de força *versus* deslocamento e tensão *versus* deslocamento da segunda etapa estão apresentadas na Figura 2-15 e Figura 2-16.

Figura 2-15 – Curvas de Força versus deslocamento da macrofibra A com extremidades preenchidas por resina em molde de 8 mm

Figura 2-16 – Curvas de tensão versus deformação específica da macrofibra A com extremidades preenchidas por resina em molde de 8 mm

Observa-se na Figura 2-15 que todas as amostras apresentaram um deslocamento de aproximadamente 4 mm antes da carga ser transferida para a fibra. Isso pode ser caracterizado como um escorregamento da fibra, ou seja, uma deficiência de fixação da fibra nas garras. Ainda que a força máxima tenha sido um pouco inferior àquela determinada na outra máquina de ensaio, o parâmetro mais afetado foi o módulo de elasticidade. Comparando a Figura 2-14 e a Figura 2-16, percebe-se que a deformação específica foi 10 vezes maior nos ensaios realizados na máquina de ensaio EMIC modelo DL 10000. Além de buscar alternativas para melhorar a ancoragem da fibra em garras deste tipo, a determinação da deformação diretamente na fibra eliminaria essa condição de contorno do método de ensaio.

2.4.3.3 Resultados com a macrofibra B

Esta campanha foi realizada em etapa única utilizando a máquina Instron modelo 5569 para a realização dos ensaios. Nestes ensaios a extremidade da macrofibra foi embebida com resina utilizando um molde de 8 mm de diâmetro e 10 mm de comprimento, devido ao fato da macrofibra B ser menor (36 mm) que a Macrofibra A (43 mm). A síntese desses resultados será apresentada na Tabela 2-10, que também inclui os valores apresentados pelo fabricante no catálogo do produto.

Tabela 2-10 – Caracterização mecânica das macrofibras de vidro B.

<i>Características</i>	<i>Informação do catálogo</i>	<i>Número de amostras</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Coeficiente de Variação [%]</i>
<i>Força de ruptura [N]</i>	229 – 289 *	21	138	18	13%
<i>Resistência de tração [MPa]</i>	1000 - 1700		766	102	13%
<i>Módulo de elasticidade [GPa]</i>	72		8,8	4,9	56%
*Valores estimados com base nas informações declaradas pelo fabricante					

Na análise dos dados da Tabela 2-10 é possível observar que a força de ruptura obtida com os ensaios de tração foi em torno de 59% da força calculada a partir da resistência a tração informada pelo fabricante. Consequentemente, a resistência a tração segue a mesma tendência ficando 23% abaixo da informada no catálogo do produto. Por outro lado, o coeficiente de variação não foi elevado, em torno de 13%, o que evidencia a acurácia do ensaio. A diferença entre a tensão de ruptura indicada pelo fabricante e a medida experimentalmente pode ser explicada por alguns fatores. Um deles é o fato de o fabricante ensaiar o filamento que produz a macrofibra e não diretamente a macrofibra. Outro aspecto que exerce forte influência no cálculo da tensão é o valor adotado para o diâmetro. Enquanto o fabricante adota no cálculo o diâmetro do filamento, neste estudo a resistência à tração foi calculada adotando a área média determinada experimentalmente. A macrofibra B é formada por filamentos, que no caso do ensaio de tração é possível que tenha ocorrido o escorregamento entre os filamentos fazendo com que a força aplicada fosse transferida para uma menor quantidade de filamentos levando a ruptura com valores inferiores ao esperado. Como já dito anteriormente, pelos valores informados pelo fabricante é possível que o mesmo realize os ensaios de tração diretamente no fio, antes da conformação da macrofibra e, portanto, pode apresentar valores distintos.

Na Tabela 2-10 também ficou evidente a variação do valor do módulo de elasticidade calculado em relação informado pelo fabricante, que se apresentou aproximadamente 8 vezes menor. Neste caso, assim como para a macrofibra A, a utilização do deslocamento vertical da máquina superestimou a deformação e, por consequência, subestimou o módulo de elasticidade da macrofibra. Além disso, por

se tratar de um conjunto de filamentos podem ocorrer deslocamentos entre os mesmos, resultando maior deformação durante o ensaio.

As curvas de força versus deslocamento e tensão versus deslocamento serão apresentadas na Figura 2-17 e na Figura 2-18. As curvas claras representam os resultados obtidos por cada amostra e a curva escura representa a média dos resultados.

Figura 2-17 – Curvas de força *versus* deslocamento da macrofibra B.

Figura 2-18 – Curvas de tensão *versus* deformação específica da macrofibra B.

Analizando as curvas apresentadas na Figura 2-17 e na Figura 2-18, verifica-se que não foi evidenciado escorregamento da fibra durante o ensaio, mesmo que a deformação obtida até a carga de ruptura tenha sido maior do que na primeira campanha da macrofibra A que foi ensaiada na mesma máquina.

2.4.3.4 Comparativo entre as macrofibras avaliadas

Nesta avaliação comparativa foram utilizados somente os resultados obtidos com os testes realizados na máquina Instron 5569, para não ter o equipamento como variável. Entretanto, vale ressaltar que as extremidades da macrofibra A foram embebidas por resina com 5 mm de diâmetro enquanto as extremidades da macrofibra B com resina com 8 mm de diâmetro.

A prática recomendada de caracterização das macrofibras de vidro (Prática Recomendada IBRACON/ABECE, 2017b) recomenda a utilização de no mínimo 10 amostras para o ensaio de tração. Nos estudos aqui apresentados foram utilizadas 14 amostras na primeira etapa da macrofibra A, 31 amostras na segunda etapa e 21 amostras na etapa única de ensaios com a macrofibra B. Essa variação na quantidade, se deve ao fato de que a produção das amostras com as extremidades embebidas em resina é bastante incerta quanto a quantidade de amostras aproveitáveis (com comprimento de resina necessário), pois ao longo da fabricação muitas amostras ficam com pouca resina e foram descartadas ao final do processo de produção. O descarte é necessário porque quando o comprimento embebido é pequeno a aderência da fibra na resina é superada e ocorre escorregamento durante o ensaio. Quando o comprimento embebido é aumentado a aderência supera a resistência mecânica da fibra, ocorrendo a ruptura desejada. Devido a esses fatores, em todas as etapas foram produzidas grande quantidade de amostras para que, no mínimo, 10 pudessem ser ensaiadas, o que gerou desigualdade no número de amostras em cada etapa.

As Figura 2-19 e Figura 2-20 ilustram as macrofibras após a ruptura.

Figura 2-19 – Macrofibra A após ruptura

Figura 2-20 – Macrofibra B após ruptura

Para melhor análise dos resultados de resistência a tração as Figura 2-21 e Figura 2-22 apresentam as curvas médias obtidas para cada macrofibra.

Figura 2-21 – Curvas médias de força versus deslocamento

Figura 2-22 – Curvas médias de resistência a tração versus deformação específica

É possível notar na Figura 2-21 que para ambas as macrofibras não houve escorregamento e a carga aplicada foi transferida diretamente para a fibra, resultando pequenos deslocamentos antes de atingir a carga de ruptura. Entretanto, a macrofibra A apresentou maior deslocamento até a ruptura do que a macrofibra B. Também é possível observar na Figura 2-22 que ambas as macrofibras apresentaram deformação específica na ruptura de aproximadamente 0,05 mm/mm. Analisando as cargas de ruptura nota-se que macrofibra A resiste a 3 vezes mais carga que a macrofibra B. No entanto, como a macrofibra B tem diâmetro menor quando as tensões são calculadas a diferença de resistência à tração entre as macrofibras é de cerca de 20%.

A comparação do módulo de elasticidade das macrofibras foi difícil porque a metodologia utilizada resultou valores muito abaixo dos valores informados pelo fabricante. Para a macrofibra B, o fabricante declara o valor de 72 GPa que é o módulo de elasticidade do vidro. Esse valor pode ser obtido se medido diretamente no fio antes da produção da macrofibra, mas como esta é composta por um conjunto de filamentos o valor obtido diretamente na macrofibra é diferente. Isto porque quando o ensaio é realizado na macrofibra podem ocorrer deslocamentos entre os filamentos que resultam em menores resultados de módulo de elasticidade. Outro aspecto importante de ser avaliado é a forma de medida da deformação para o cálculo do

módulo de elasticidade. A metodologia adotada mede o deslocamento vertical entre as garras da máquina, o que tende a superestimar o valor da deformação se comparada a deformação que acontece na fibra, reduzindo ainda mais o módulo de elasticidade calculado. Além disso, a resina que envolve as extremidades da macrofibra se acomodam nas garras da máquina de ensaio antes da transferência da carga aplicada, o que também resulta deslocamentos que não são deformações do material.

Em resumo, a metodologia apresentada pode ser utilizada para medidas de resistência à tração em macrofibras de vidro, desde que estas não sejam compostas por filamentos, que tendem a escorregar entre si. Já para o cálculo do módulo de elasticidade da macrofibra, ainda é necessário aprimoramento da metodologia quanto a fixação da macrofibra nas garras do equipamento e medida da deformação. Itens que podem ser melhores explorados em pesquisas futuras, para continuidade do trabalho.

2.4.4 Efeito sobre a consistência

O efeito sobre a consistência com a adição de macrofibras de vidro foi avaliado conforme proposto pela Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2017b) por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone (ABNT NBR NM67, 1998) e os resultados são apresentados na Figura 2-23 e Tabela 2-11. As letras A e B indicam a macrofibra avaliada e o número na indica o teor de macrofibra utilizado em kg/m³.

Tabela 2-11 – Resultado do efeito das macrofibras sobre a consistência

Fibra/ Teor	Antes da adição da macrofibra [mm]	Após a adição da macrofibra [mm]	% redução
A3,8	25	15	40%
A7,6	25	15	40%
A11,5	60	30	50%
B4,5	35	25	29%
B9,0	27	15	44%
B13,5	40	10	75%

Figura 2-23 – Resultados do efeito das macrofibras sobre a consistência

É possível verificar na Figura 2-23 que a adição de ambas as macrofibras reduziu o abatimento de tronco de cone, gerando impacto na consistência do concreto fresco. Apesar disso, essa redução não dificultou a moldagem dos corpos de prova e não foi necessário incremento no tempo de vibração.

Também é possível observar na Tabela 2-11 que a redução foi em torno de 43% para a macrofibra A enquanto que para a macrofibra B foi em média de 49%, com destaque para o teor B13,5 que apresentou redução de 75% na consistência medida com abatimento do tronco de cone.

2.5 Conclusões do capítulo

Neste capítulo foi apresentado um programa experimental para discutir as metodologias para a caracterização de macrofibras de vidro. Neste sentido, foram discutidas as caracterizações físicas e geométricas, a resistência aos álcalis do cimento e uma metodologia para a caracterização mecânica a partir de amostras das macrofibras de vidro. A partir dos resultados obtidos e das análises realizadas as seguintes conclusões podem ser destacadas.

- As análises de presença de dióxido de zircônio confirmaram a característica de álcali resistência informada pelo fabricante para a macrofibra B, que possibilita a utilização como reforço em materiais cimentícios. No caso da macrofibra A, o resultado obtido foi inferior ao indicado por normas internacionais. É importante destacar que a

técnica adotada, espectrometria de emissão óptica (ICP OES) com digestão multiácida, é diferente da indicada na norma que estabelece o requisito mínimo de dióxido de zircônio. Ainda que esta técnica seja de elevada precisão e todos os cuidados para que o material fosse corretamente preparado, os resultados precisam ser discutidos com o fabricante. Como na macrofibra A os filamentos de fibra de vidro são revestidos por uma camada de resina, pode-se concluir que a sua resistência a presença de álcalis é auxiliada pela camada de resina existente e, portanto, pode ser considerada elevada, apesar de não atingir os parâmetros indicados pela norma. Essa característica é encontrada em barras de fibra de vidro que utilizam vidro tipo E, que não é álcali resistente, mas recebe revestimento que protege da ação de álcalis.

- Os ensaios de caracterização geométrica são de fácil execução e devem ser utilizados como ferramenta para o controle das macrofibras. As macrofibras avaliadas apresentaram baixos coeficiente de variação nos parâmetros geométricos médios, o que indica alta qualidade de controle na produção. A mesma tendência foi verificada quando analisados os valores individuais de cada amostra e em ambas as análises os valores apresentaram variações dentro das tolerâncias admitidas pela prática recomendada. A diferença entre os métodos de medida do diâmetro adotado na pesquisa e utilizado pelo fabricante não ultrapassou a tolerância indicada pela prática recomendada. O procedimento utilizado neste estudo e indicado na Prática recomendada IBRACON/ABECE é mais robusto a influências externas, como da pressão das garras do paquímetro e variações do diâmetro ao longo do comprimento da macrofibra. Porém, é importante destacar que esses valores são utilizados no cálculo das tensões de tração e procedimentos distintos podem resultar valores diferentes ao indicado no catálogo do fabricante.

- A metodologia de ensaio adotada para avaliar a resistência à tração diretamente na macrofibra de vidro se mostrou viável. Esse resultado traz uma significativa contribuição para os consumidores que não tem acesso a amostras do fio utilizado na produção das fibras. Por outro lado, o método não foi adequado para a determinação do módulo de elasticidade, pois apresentou forte tendência de subestimar essa característica.

- A mudança na máquina de ensaio utilizada para os ensaios de tração também resultou maior variabilidade no cálculo do módulo de elasticidade, principalmente pela característica das garras de cada máquina de resultarem maior ou menor

escorregamento das amostras. Porém, os resultados de força de ruptura não foram significativamente influenciados e, portanto, ambas as máquinas podem ser consideradas eficientes para medida da resistência à tração direta na macrofibra, evidenciando que a metodologia é consistente suficiente às variações de equipamentos.

- A avaliação da adição de macrofibras sobre a consistência do concreto foi avaliada em ambas as macrofibras estudadas e apesar da redução nos resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone, a trabalhabilidade do compósito no estado fresco não foi prejudicada com a mistura e teores utilizados neste trabalho.

3 COMPORTAMENTO PÓS-FISSURAÇÃO DO CRFV

3.1 Introdução

O concreto reforçado com fibras (CRF) é um material compósito caracterizado pela manutenção de uma certa resistência residual pós-fissuração. Conforme ilustrado na Figura 3-1, a adição de fibras melhora o comportamento do concreto à tração, reduzindo a abertura de fissuras, por atuarem como ponte de transferência de tensões.

Figura 3-1 – Fibras atuando como ponte de transferência de tensões (MEDEIROS, 2012)

Apesar de ser um material consagrado, o concreto com fibras ainda tem como seu maior campo de aplicação os pavimentos industriais e o concreto projetado (FIGUEIREDO, 2011). O número crescente de estudos na área e o desenvolvimento de códigos modelos internacionais, podem ser apontados como responsáveis por um aumento significativo do interesse no uso do CRF para fins estruturais. Tais evoluções resultam maior confiança na especificação do material pelos projetistas. No entanto, a qualidade dessa aplicação deve ser apoiada por um método de controle tecnológico, acessíveis aos laboratórios nacionais, que seja confiável, econômico, compatível com os parâmetros do material utilizado nos modelos de dimensionamento.

Os ensaios de flexão especificados pelas normas JSCE-SF4 (1984), ASTM C1609 (2010), EN 14651 (2007) são os mais difundidos e utilizados para caracterização do CRF. Esses métodos de ensaio, com exceção do previsto na JSCE-SF4 (1984), prescrevem a utilização de máquinas de ensaio com sistema fechado

(*closed-loop*), ou seja, é necessário haver uma retroalimentação da máquina que regula o nível de carregamento de tal maneira que mantenha constante a taxa de deformação do corpo de prova (SIMÃO et al., 2017). Esse tipo de controle possibilita um ensaio mais estável, sem a ocorrência de instabilidades pós-fissuração da matriz (GOPALARATNAM, GETTU, 1995). Porém, para a realização de ensaios com este tipo de sistema é necessária a utilização de máquinas de ensaio de sistema fechado.

Em 2013, o *fib* Model Code 2010, propôs a utilização do ensaio de flexão três pontos com entalhe, normalizado pela norma EN 14651 (2017) para caracterização do CRF. Apesar de apresentar resultados mais consistentes, sem a presença de instabilidades, esse método de ensaio tem um custo elevado e necessita da utilização de máquinas que não são facilmente encontradas em laboratórios privados no mercado brasileiro.

Como alternativa para o controle tecnológico foi proposto o ensaio de duplo puncionamento, normalizado pela AENOR UNE 83515 (2010) e conhecido como ensaio Barcelona. Esse ensaio tem sido considerado uma promissora alternativa tecnológica, pois permite a utilização de corpos de prova cilíndricos ou cúbicos e de dimensões bem menores que as dos prismas, permitindo a extração de amostras de estruturas, inclusive. Isto fez com que fosse adotado na prática recomendada IBRACON/ABECE de controle de qualidade do CRF (Prática recomendada IBRACON/ABECE, 2017a).

O ensaio prescrito pela EN 14651 é definido pelo *fib* Model Code 2010 (2013) para a obtenção de parâmetros de projeto de estruturas em CRF e a Prática recomendada IBRACON/ABECE de projeto de estruturas em CRF (Prática Recomendada IBRACON/ABECE, 2016) seguiu a mesma filosofia. O código modelo europeu permite a utilização de um método de ensaio alternativo, mas indica que uma correlação com o método de referência deve ser estabelecida. Galeote et al. (2017) propôs uma extensa campanha experimental abrangendo os ensaios de flexão três pontos com entalhe e o ensaio de duplo puncionamento, apresentando uma correlação entre eles. Neste estudo foram utilizadas fibras de aço e fibras poliméricas em diferentes teores, mas a validade dessa correlação para as macrofibras de vidro não foi determinada.

As fibras de aço e sintéticas são muito estudadas, principalmente no que diz respeito ao comportamento pós-fissuração dos compósitos. Isto não acontece com as fibras de vidro, especialmente as macrofibras que são mais recentes no mercado. Assim, é importante avançar nos estudos de caracterização do concreto reforçado com fibras de vidro (CRFV), especialmente devido as características da fibra de vidro que tendem a contribuir no comportamento mecânico do compósito.

3.1.1 Objetivos do capítulo

O objetivo deste capítulo é caracterizar o comportamento pós-fissuração do concreto com macrofibras de vidro com ensaios de flexão de vigas com entalhe e duplo puncionamento. Além disso, o comportamento dos concretos na flexão possibilitará avaliar o atendimento dos requisitos do *fib* Model Code 2010 e da prática recomendada IBRACON/ABECE para o dimensionamento de estruturas com CRF.

3.2 Comportamento mecânico do CRF

3.2.1 Ensaios de flexão

O controle do comportamento mecânico do CRF não envolve ensaios triviais, como o de compressão axial, geralmente são ensaios mais complexos e que exigem equipamentos de maior custo de aquisição e manutenção. Por essa razão, Figueiredo (2014) aponta que são poucos os laboratórios dotados de infraestrutura adequada para a execução de ensaios de caracterização do CRF no Brasil. O autor salienta ainda que em várias situações o único controle de comportamento mecânico efetivamente realizado é a determinação da resistência à compressão, o que não é capaz de avaliar a contribuição das fibras.

O ensaio de flexão mais utilizado no Brasil é o método da norma Japonesa JSCE-SF4 (JSCE, 1984). Esse método, por não exigir máquina de ensaio com sistema de controle fechado, pode resultar em intensa instabilidade no comportamento pós-fissuração da matriz de concreto, como já foi apontado por diversos estudos nacionais e internacionais. A tendência internacional é a adoção do ensaio de flexão de prismas com entalhe, conforme preconiza a norma europeia EN14651 (2007). Isto porque o ensaio foi adotado como referência para a parametrização do comportamento mecânico do CRF no novo código modelo europeu, o *fib* Model Code 2010 (*fib*, 2013). No Brasil, os documentos produzidos pelo comitê CT303 do IBRACON e da ABECE,

as práticas recomendadas para estruturas com CRF (Prática Recomendada IBRACON/ABECE, 2016) também adotaram esse método de ensaio.

O ensaio de flexão de três pontos com entalhe (EN 14651, 2007) consiste em colocar o corpo de prova prismático sobre dois cutelos apoiados na prensa com distância de 500 mm entre eles e aplicar uma força no cutelo superior central, conforme ilustrado na Figura 3-2.

Figura 3-2 – Montagem típica do ensaio 3PBT
Fonte: EN 14651 (2007).

Para induzir a localização da fissura e permitir a medida de sua abertura (CMOD), um entalhe é produzido na base do corpo de prova. A abertura de fissura é medida com a utilização de um *Clip Gage*, posicionado na parte inferior do corpo de prova, no local do entalhe (Figura 3-3).

Figura 3-3 – Detalhe do posicionamento do clip gage.

Alternativamente pode ser medido o deslocamento vertical da viga. Nesse caso, um transdutor de deslocamento (LVDT) deve ser fixado ao corpo de prova a meia altura sobre os cutelos (Figura 3-4). Como o LVDT deve medir o deslocamento vertical sob o entalhe a colocação de um suporte fino entre a boca entalhe e o ponto de medição é necessário.

Figura 3-4 – Arranjo típico com controle do deslocamento vertical. Fonte: EN 14651 (2007).

A utilização do entalhe para este ensaio visa proporcionar menor variabilidade nos resultados, pois a fissura é orientada no plano do entalhe gerando menores dissipações de energia no corpo de prova prismático (SALVADOR, 2013).

Os resultados são apresentados em um gráfico de Carga *versus* CMOD para teor estudado, considerando as cargas com 0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm e 3,5 mm de abertura de fissura como parâmetros para avaliação do CRF.

Na concepção do *fib* Model Code 2010 (*fib*, 2013) são considerados dois comportamentos básicos esperados para o CRF em função da capacidade de reforço pós-fissuração, *softening* e *hardening*, conforme ilustrado na Figura 3-5. Com isso o projeto pode ser balizado pelo comportamento residual pós-fissuração para níveis pré-estabelecidos de deformação e abertura de fissura.

Figura 3-5 – Comportamento de softening e hardening. Fonte: *fib* Model Code 2010 (*fib*, 2013)

3.2.2 Ensaio de duplo puncionamento

O ensaio de duplo puncionamento (DPT) descrito na prática recomendada IBRACON/ABECE: Controle da qualidade do concreto reforçado com fibras (Prática Recomendada IBRACON/ABECE, 2017a) é baseado no ensaio de mesmo nome apresentado pela norma espanhola UNE 83515 (2010). Esse ensaio, também denominado ensaio Barcelona, é utilizado para avaliar a resistência residual à tração do concreto com fibras. O ensaio consiste na colocação dos corpos de prova em uma prensa com um disco de carga posicionado no centro da face inferior e outro na face superior, por onde será aplicada a carga durante o ensaio.

O ensaio foi normalizado especificando o uso de um extensômetro circunferencial para medida do aumento do perímetro do corpo de prova ou TCOD (*Total Circumferential Opening Displacement*). O extensômetro de circunferência deve ser posicionado na metade da altura, conforme mostra a Figura 3-6.

Figura 3-6 – Exemplo do Ensaio Barcelona
Fonte: Pujadas (2013)

O uso do extensômetro de circunferência resulta uma grande restrição para a difusão do método (PUJADAS et al, 2014), pois este equipamento é de elevado custo e, portanto, não disponível em grande parte dos laboratórios. Carmona, Aguado e Molins (2012) realizaram um estudo para correlacionar a tenacidade obtida através do TCOD e do deslocamento vertical (δ_p), para uma faixa de deslocamento vertical entre 1 e 4 mm. Tratam-se de correlações empíricas, que são válidas para uma faixa de δ_p , correlacionam medidas de tenacidade e não diretamente os valores de TCOD e δ_p , e não representam o mecanismo físico ocorrido durante o ensaio (MONTE, 2015). Pujadas et al. (2013) realizaram um estudo posterior, propondo um modelo analítico para conversão direta do δ_p em TCOD.

Com esta simplificação o ensaio se tornou mais atrativo e viável para o controle tecnológico do CRF, surgindo o interesse por estudar o ensaio de duplo puncionamento (MONTE, TOALDO, FIGUEIREDO, 2014; SILVA et al., 2015; MONTE et al., 2016; SIMÃO et al., 2017; NOGUEIRA et al., 2017; GALEOTE et al., 2017; CARMONA, AGUADO, MOLINS, 2018).

A Prática recomendada IBRACON/ABECE de Controle da qualidade do concreto reforçado com fibras (Prática Recomendada IBRACON/ABECE, 2017a) indica o ensaio de duplo puncionamento como um dos ensaios de controle do comportamento pós-fissuração do CRF. Nela os parâmetros determinados são a carga de fissuração (P_f) e as cargas residuais (P_{δ_p}), com δ_p os valores de deslocamento vertical 0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm e 3,5 mm. A Figura 3-7 ilustra a curva típica de carga versus deslocamento vertical e os parâmetros de ensaio.

Figura 3-7 – Parâmetros de carga para ensaios com medida do deslocamento vertical (Prática Recomendada IBRACON/ABECE, 2017a)

3.3 Programa experimental

Materiais e proporções

O concreto utilizado neste estudo é apresentado na Tabela 3-1. A quantidade de aditivo superplastificante foi 0,05% em massa de cimento. Foram utilizados três teores de cada fibra, macrofibra A e macrofibra B, com as características indicadas na Tabela 2-2, que representam, respectivamente, 0,19%, 0,39% e 0,58% em volume. Também foi utilizado concreto sem adição de fibras como referência para comparação dos resultados. A Tabela 3-2 apresenta os teores utilizados para cada fibra estudada.

Tabela 3-1 – Traço da matriz de concreto utilizado

Cimento [kg]	Areia Fina [kg]	Areia Grossa [kg]	Brita Ø máx 12,5 mm [kg]	Brita Ø máx 19 mm [kg]	Água [kg]	Aditivo [kg]
394	134	536	532	532	193	0,394

Tabela 3-2 – Teores de fibra utilizados

Fibra	Relação em volume	Teor utilizado kg/m³
Macrofibra A	0,19%	3,8
	0,39%	7,6
	0,58%	11,5
Macrofibra B	0,19%	4,5
	0,39%	9,0
	0,58%	13,5

3.3.1 Preparação do concreto e moldagem dos corpos de prova

Após a pesagem dos materiais, a mistura foi feita em betoneira de eixo vertical e a moldagem foi realizada com auxílio de uma mesa vibratória (Figura 3-8). Os corpos de prova foram mantidos cobertos por filme plástico por 24 horas em ambiente de laboratório, desformados e levados para cura por 28 dias em câmara úmida. Os corpos de prova foram retirados da câmara úmida na véspera da idade de ensaio.

Para os ensaios de flexão foram moldados quatro corpos de prova prismáticos de 150x150x550 mm para cada teor de fibra e três corpos de prova sem fibra para referência. Para os ensaios de duplo puncionamento foram moldados três corpos de

prova de $\varnothing$ 150 x 300 mm de altura, para cada teor de fibra. Também foram moldados quatro corpos de prova de $\varnothing$ 100 x 200 mm de altura de cada concreto (com e sem fibras) para o controle da resistência à compressão e módulo de elasticidade.

Figura 3-8 – Moldagem dos corpos de prova

3.3.2 Métodos de ensaio flexão em três pontos com entalhe – 3PBT

O ensaio de flexão de três pontos com entalhe é descrito pela norma europeia EN 14651 (2007). Na véspera da data de ruptura os corpos de prova foram retirados da câmara úmida e levados para realização do entalhe conforme prescrito na norma europeia EN 14651 (2007). Na data do ensaio, os corpos de prova foram moldados com a macrofibra A, foram ensaiados em máquina Instron, Modelo 5569, conforme ilustra a Figura 3-9 e os corpos de prova moldados com a macrofibra B foram ensaiados em máquina Intermetric IM750SRV, conforme ilustra a Figura 3-10.

Figura 3-9 – Corpo de prova posicionado para o ensaio 3PBT máquina Instron

Figura 3-10 – Corpo de prova posicionado para o ensaio 3PBT máquina Intermetric

Como resultado, foram traçadas curvas de carga versus abertura de fissura (Figura 3-11), onde pode-se obter a carga no limite de proporcionalidade - LOP (F_L) e as cargas residuais (F_{Rj}) determinadas para valores de abertura de fissura de 0,50, 1,50, 2,50 e 3,50 mm.

Figura 3-11 – Curva típica de carga versus abertura de fissura no ensaio 3PBT.

A resistência no limite de proporcionalidade e as resistências residuais podem ser calculadas, respectivamente, pelas Eq. 3-2 e Eq. 3-2.

$$f_L = \frac{3 \cdot F_L \cdot L}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad 3-1$$

$$f_{Ri} = \frac{3 \cdot F_{Ri} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad 3-2$$

Onde:

f_L é a resistência no limite de proporcionalidade, em MPa;

F_L é a carga no limite de proporcionalidade, em N;

L é o comprimento do corpo de prova, em mm;

b é a largura do corpo de prova, em mm;

h_{sp} é a altura do corpo de prova descontando o entalhe, em mm;

f_{Ri} é a resistência residual, em MPa;

F_{Ri} é a carga residual para valores de CMOD iguais a 0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm e 3,5 mm, em N.

3.3.3 Método de ensaio de duplo puncionamento – DPT

Na véspera da idade de ensaio os três corpos de prova de $\varnothing 150 \times 300$ mm de altura foram cortados perpendicular ao eixo de simetria na metade da altura, obtendo-se assim seis corpos de prova de com a relação diâmetro/altura aproximadamente igual a 1 para cada teor de fibra estudado.

Para este trabalho, foi utilizado o procedimento para o ensaio de duplo puncionamento apresentado na prática recomendada IBRACON/ABECE (Prática Recomendada IBRACON/ABECE, 2017a) com a aplicação de velocidade de deslocamento de 0,5 mm/mim (Figura 3-12), em máquina SHIMADZU modelo UH-2000kNXR.

Figura 3-12 – Ensaio de Duplo Puncionamento (DPT)
Fonte: Manzioni et al. (2018)

Os resultados são apresentados com curvas de carga x deslocamento vertical, conforme Figura 3-7.

A resistência à tração no ensaio de duplo puncionamento (f_t) pode ser calculada utilizando a Eq. 3-3.

$$f_t = \frac{4 \times P_f}{9 \times \pi \times a \times H} \quad 3-3$$

Onde:

f_t é a resistência à fissuração, em MPa;

P_f é a carga que produz a fissuração, em N;

a é o diâmetro do disco de aplicação da carga, em mm;

H é a altura do corpo de prova, em mm.

Além das cargas residuais para valores de deslocamento vertical contados a partir da carga de fissuração (P_f), podem ser calculadas as resistências residuais ($f_{R,\delta p}$) para diferentes níveis de deslocamento vertical (δ_p) utilizando a Eq. 3-4.

$$f_{R,\delta p} = \frac{4 \times P_{\delta p}}{9 \times \pi \times a \times H} \quad 3-4$$

Onde:

$f_{R,\delta p}$ é a resistência residual correspondente a um deslocamento vertical δ_p , em MPa;

$P_{\delta p}$ é a carga residual correspondente a um deslocamento vertical δ_p , em N;

a é o diâmetro do disco de aplicação da carga, em mm;

H é a altura do corpo de prova, em mm.

Os valores de resistência residual podem ser determinados para os níveis de deslocamento vertical (δ_p) indicados na Figura 3-7.

3.4 Resultados e análises

3.4.1 Caracterização mecânica dos concretos

Os concretos produzidos foram caracterizados quanto a resistência à compressão e módulo de elasticidade. Os resultados médios dessas determinações estão apresentados na Tabela 3-3 para a macrofibra A e na Tabela 3-4 para a macrofibra B. Para o teor de 3,8 kg/m³ de macrofibra A o módulo de elasticidade foi determinado em um único corpo de prova por problemas no dia da moldagem. A matriz

de concreto, sem adição de fibras, foi igual para as duas macrofibras e, portanto, os resultados estão apresentados apenas na Tabela 3-3.

Tabela 3-3 – Caracterização mecânica do CRF com a macrofibra A

<i>Macrofibra A</i>	<i>Resistência à compressão [MPa]</i>				<i>Módulo de Elasticidade [GPa]</i>			
<i>Teor de Fibra (kg/m³)</i>	0	3,8	7,6	11,5	0	3,8	7,6	11,5
<i>Média</i>	42,1	47,4	47,8	47,2	30,3	27,7	29,2	28,1
<i>Desvio Padrão</i>	0,9	3,2	1,4	0,0	0,1	-	0,1	0,8
<i>Coeficiente de Variação (%)</i>	2,1	6,7	2,9	0,0	0,3	-	0,4	2,7

Tabela 3-4 – Caracterização mecânica do CRF com a macrofibra B

<i>Macrofibra B</i>	<i>Resistência à compressão [MPa]</i>			<i>Módulo de Elasticidade [GPa]</i>		
<i>Teor de Fibra (kg/m³)</i>	4,5	9,0	13,5	4,5	9,0	13,5
<i>Média</i>	44,2	47,6	44,6	32,2	31,2	30,2
<i>Desvio Padrão</i>	1,5	0,7	1,1	2,8	0,4	1,1
<i>Coeficiente de Variação (%)</i>	3,5	1,5	1,1	5,6	1,3	3,7

Os resultados mostram que para a macrofibra A, a resistência a compressão e o módulo de elasticidade foram muito similares mesmo quando utilizados diferentes teores de fibra. Isto era esperado para os consumos de fibra utilizados, inferiores a 1% em volume. Nesses casos, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade são governados pelas características da matriz e a variação do consumo de fibras em pequenos volumes não deveria alterar significativamente esse comportamento. Também vale ressaltar que a variação dos resultados, representada pelo coeficiente de variação, foi baixa, variando de 0% a 6,7% para a macrofibra A e de 1,1% a 5,6% para a macrofibra B. Comparando com a resistência da matriz os concretos com macrofibra de vidro apresentaram resistência à compressão ligeiramente superior, especialmente para a macrofibra A. Porém, não é possível afirmar que se trata de uma característica desta macrofibra o aumento da resistência à compressão do concreto, mas que sua introdução em volumes de até 0,58% não causa prejuízo a esta propriedade.

3.4.2 Ensaio de Flexão de três pontos (3PBT)

3.4.2.1 Resultados obtidos para a macrofibra A

Os resultados apresentados na Figura 3-13 mostram as curvas carga versus CMOD obtidas para o concreto sem adição de fibras. Já as Figura 3-14 a Figura 3-16 apresentam as curvas carga versus CMOD obtidas para todos os teores da macrofibra A estudados. As curvas em cores claras são os resultados individuais e as curvas em negrito representam as médias dos resultados.

Figura 3-13 – 3PBT - curvas carga-CMOD do concreto sem fibras

Figura 3-14 – 3PBT - curvas carga-CMOD com 3,8 kg/m³ da macrofibra A

Figura 3-15 – 3PBT - curvas carga-CMOD com 7,6 kg/m³ da macrofibra A

Figura 3-16 – 3PBT - curvas carga-CMOD com 11,5 kg/m³ da macrofibra A

As curvas apresentadas nas Figura 3-13 a Figura 3-16 mostram a baixa variabilidade obtida nos ensaios de flexão realizados nesta pesquisa. Percebe-se também que para os três teores de fibra estudados obteve-se a mesma tendência de comportamento, reduzindo a capacidade resistente conforme o aumento da abertura de fissura. Em outras palavras, o ensaio apresentou claramente comportamento de *softening* após o limite de proporcionalidade. No concreto sem fibras (Figura 3-13), o ensaio foi interrompido com 1 mm de abertura de fissura para garantir a segurança do equipamento, evitando o colapso do corpo de prova sobre o *clip-gage*.

É importante notar que a resistência no limite de proporcionalidade (f_L), considerando todos os concretos produzidos foi na média igual a 4,39 MPa. Esse valor está em acordo com o indicado na Prática recomendada IBRACON/ABECE (2017b), que determina que o concreto de referência apresente resistência à flexão LOP de $4,3 \pm 0,3$ MPa. Assim, vale destacar que todos os teores estudados apresentaram resistência média a flexão LOP acima do concreto de referência, apenas o menor teor, com $3,8 \text{ kg/m}^3$ apresentou valor inferior, 4,16 MPa, porém ainda dentro do desvio indicado pela prática recomendada. Quando considerado apenas a matriz sem fibras o resultado ultrapassou o limite superior indicado, atingindo 4,8 MPa.

Os valores médios de resistência à tração e resistências residuais e os respectivos coeficientes de variação são apresentados na Tabela 3-5.

Tabela 3-5 – Resultados médios de resistência à tração e residuais da macrofibra A

Teor de fibra [kg/m^3]		Resistências médias [MPa]				
		f_L	f_{R1}	f_{R2}	f_{R3}	f_{R4}
0	Média	4,80	0,472	0,151	-	-
	Desvio Padrão	0,06	0,002	0,002	-	-
	CV	1%	0,4%	2%	-	-
3,8	Média	4,16	0,78	0,36	0,25	0,19
	Desvio Padrão	0,47	0,09	0,02	0,05	0,05
	CV	11%	12%	5%	19%	25%
7,6	Média	4,59	1,46	1,05	0,83	0,64
	Desvio Padrão	0,32	0,17	0,14	0,14	0,13
	CV	7%	11%	13%	17%	21%
11,5	Média	4,43	1,79	1,53	1,37	1,15
	Desvio Padrão	0,58	0,22	0,21	0,20	0,20
	CV	13%	12%	14%	14%	17%

É possível observar na Tabela 3-5 que os valores f_L não sofreram grande variação para os diferentes teores de fibra analisados. Os resultados de f_L para os diferentes teores da macrofibra A podem ser considerados estatisticamente iguais pela análise de variância (ANOVA) realizada com 5% de significância (valor p igual a $0,08 > 0,05$). Como esperado, a maior influência das fibras ocorre no comportamento pós-fissuração. Verifica-se também que os maiores coeficientes de variação foram obtidos para f_{R3} e f_{R4} (CMOD iguais a 2,5 mm e 3,5 mm). Isto ocorre porque as resistências residuais são menores nestes níveis de abertura de fissura e o desvio padrão se mantém praticamente constante. Em geral, a variabilidade média obtida

entre 10% e 21%, é compatível com a observada por outros autores (MAIDA *et al.*, 2015; CARMONA, MOLINS, AGUADO, 2018; CONFORTI, ZERBINO, PLIZZARI, 2018).

3.4.2.2 Resultados obtidos para a macrofibra B

Os resultados apresentados na Figura 3-17 a Figura 3-19 mostram as curvas carga versus CMOD obtidas para todos os teores de macrofibra B estudados. As curvas em cores claras são os resultados individuais e as curvas em negrito representam as médias dos resultados.

Figura 3-17 – 3PBT - curvas carga-CMOD com 4,5 kg/m³ da macrofibra B

Figura 3-18 – 3PBT - curvas carga-CMOD com 9,0 kg/m³ da macrofibra B

Figura 3-19 – 3PBT - curvas carga-CMOD com 13,5 kg/m³ da macrofibra B

As curvas apresentadas na Figura 3-17 a Figura 3-19 mostram a baixa variabilidade obtida nos ensaios de flexão da macrofibra B. Percebe-se também que para os três teores estudados obteve-se comportamento de *softening* após o limite de proporcionalidade. Em média, o limite de proporcionalidade (f_L) dos concretos foi de 4,14 MPa, bem inferior ao obtido para o concreto sem fibras (4,80 MPa). Os valores médios de resistência à tração e resistências residuais e os respectivos coeficientes de variação são apresentados na Tabela 3-6.

Tabela 3-6 – Resultados médios de resistência à tração e residuais da macrofibra B

Teor de fibra [kg/m³]		Resistências médias [MPa]				
		f_L	f_{R1}	f_{R2}	f_{R3}	f_{R4}
4,5	Média	3,78	1,13	0,53	0,37	0,26
	Desvio Padrão	0,25	0,13	0,07	0,07	0,04
	CV	7%	12%	14%	18%	17%
9,0	Média	4,09	1,46	0,86	0,65	0,48
	Desvio Padrão	0,15	0,23	0,14	0,10	0,07
	CV	4%	16%	16%	15%	14%
13,5	Média	4,55	2,25	1,67	1,28	0,96
	Desvio Padrão	0,24	0,32	0,36	0,31	0,25
	CV	5%	14%	21%	24%	26%

É possível observar na Tabela 3-6 que os valores f_L não sofreram grande variação para os diferentes teores de fibra analisados. Como esperado, a maior influência das fibras ocorre no comportamento pós-fissuração. Verifica-se também que os maiores coeficientes de variação foram obtidos para f_{R3} e f_{R4} (CMOD iguais a 2,5 mm e 3,5 mm). Isto ocorre porque as resistências residuais são menores nestes níveis de abertura de fissura e o desvio padrão se mantém praticamente constante. Em geral, a variabilidade obtida foi entre 5% e 19%, similar ao obtido para a macrofibra A e com a observada por outros autores (MAIDA *et al.*, 2015; CARMONA, MOLINS, AGUADO, 2018; CONFORTI, ZERBINO, PLIZZARI, 2018).

3.4.2.3 Comparativo do ensaio 3PBT para as macrofibras A e B

A Figura 3-20 e a Figura 3-21 apresentam as curvas médias dos resultados do 3PBT para as macrofibras estudadas. Nas figuras as letras A e B indicam o tipo de macrofibra e os números indicam o teor de macrofibra utilizado em kg/m^3 .

Figura 3-20 – Curvas médias do ensaio 3PBT para a macrofibra A

Figura 3-21 – Curvas médias do ensaio 3PBT para a macrofibra B

Percebe-se na Figura 3-20 e na Figura 3-21 o aumento de resistência residual com o aumento do teor de fibra aplicado. As curvas médias sobrepostas também salientam as resistências à tração LOP menores para os concretos com macrofibra de vidro, especialmente para a macrofibra B. Nesse caso, nota-se também um formato diferente das curvas na região imediatamente após o limite de proporcionalidade que mostra um aumento significativo na capacidade resistente para aberturas de fissura inferiores a 0,5 mm. Esse comportamento não é observado para a macrofibra A.

3.4.2.4 Análise dos requisitos para utilização do CRF em elementos estruturais

A prática recomendada de projeto de estruturas em CRF (Prática Recomendada IBRACON/ABECE, 2016) adota para efeito de avaliação da capacidade resistente uma divisão dos elementos estruturais em dois grupos:

- **GRUPO A:** elementos estruturais de CRF, que apresentem capacidade de redistribuição de esforços considerando a interface com o meio elástico (pisos industriais e pavimentos).
- **GRUPO B:** outros elementos estruturais de CRF (elementos lineares, elementos de superfície e elementos de volume).

Para os elementos estruturais classificados como Grupo A o documento da prática recomendada indica que a substituição total ou parcial da armadura convencional por CRF pode ser feita quando as seguintes relações forem satisfeitas:

$$f_{R1m}/f_{Lm} \geq 0,40$$

$$f_{R3m}/f_{Lm} \geq 0,20 \text{ (equivalente a } f_{R3m}/f_{R1m} \geq 0,50)$$

Análise para aplicações classificadas no Grupo A (valores médios)

As correlações entre as resistências médias calculadas para valores de 0,5 mm e 2,5 mm de abertura de fissura são apresentadas na Figura 3-22 para a macrofibra A e na Figura 3-23 a macrofibra B.

Figura 3-22 – Resistência média residual a tração na flexão *versus* teor de macrofibra A

Figura 3-23 – Resistência média residual a tração na flexão *versus* teor de macrofibra B

Analisando a Figura 3-22 observa-se relações lineares entre as resistências médias medidas em 0,5 e 2,5 mm de abertura de fissura da macrofibra A. Em ambos os casos, os coeficientes de determinação (R^2) foram superiores a 0,94. Como é possível verificar na Figura 3-13 o concreto simples apresentou uma pequena resistência residual para 0,5 mm de abertura de fissura ($f_{R1m} = 0,472$), mas não obteve resultado para 2,5 mm. Consequentemente, a curva referente ao f_{R3m} encontra a origem, enquanto que a curva para f_{R1m} o valor para o concreto simples foi utilizado para obter a correlação. Considerando os resultados da macrofibra B (Figura 3-23) observa-se que as relações também são lineares entre as resistências médias medidas em 0,5 e 2,5 mm de abertura de fissura e os coeficientes de determinação (R^2) foram superiores a 0,93.

As relações dos parâmetros de f_{R1} e f_{R3} que foram obtidas permitem estimar as resistências residuais para 0,5 e 2,5 mm de abertura de fissura para teores das fibras diferentes dos avaliados nesse estudo.

A análise dos critérios da prática recomendada para uso de CRF em elementos estruturais do Grupo A estão apresentadas na Figura 3-24 e na Figura 3-25 para ambas as fibras estudadas.

Figura 3-24 – f_{R1m}/f_{Lm} versus teor de fibra

Figura 3-25 – f_{R3m}/f_{R1m} versus teor de fibra

Considerando as relações indicadas ($f_{R1m}/f_{Lm} \geq 0,40$ e $f_{R3m}/f_{R1m} \geq 0,50$) e a matriz cimentícia utilizada, a macrofibra de vidro A atenderia simultaneamente aos parâmetros para aplicação em elementos estruturais do Grupo A utilizando um teor

de 10,5 kg/m³ e a macrofibra de vidro B poderia ser utilizada com um teor de 11 Kg/m³. Essa pequena diferença mostra que o comportamento de ambas as macrofibras são muito próximos apesar de terem características físicas, geométricas e mecânicas distintas. Nota-se também que o comportamento é mais distinto para o ELU, onde a macrofibra A ainda apresenta uma capacidade residual significativa e que se distancia da macrofibra B quando o teor é aumentado.

Análise para aplicações classificadas no Grupo B (valores característicos)

Para os elementos estruturais classificados como Grupo B, a mesma relação indicada pelo *fib* Model Code 2010 (*fib*, 2013) foi adotada pela prática recomendada. Nesses casos, as resistências residuais devem ser empregadas com valores característicos e as seguintes relações devem ser satisfeitas:

$$f_{R1k}/f_{Lk} \geq 0,40$$

$$f_{R3k}/f_{R1k} \geq 0,50$$

Os valores característicos foram calculados utilizando a Eq. 3-5.

$$f_{Rk} = f_{Rm} - 1,65 \cdot \sigma \quad 3-5$$

Onde:

f_{Rk} são as resistências residuais características do ensaio 3PBT, em MPa;

f_{Rm} são as resistências residuais médias do ensaio 3PBT, em MPa;

σ é o desvio padrão, em MPa.

Embora a prática recomendada de controle do CRF (Prática Recomendada IBRACON/ABECE, 2017a) indique que para o cálculo das resistências características deve ser utilizado $0,70 \times f_{Rm}$, este seria um critério mais rigoroso para avaliação do material, visto que os desvios padrão dos ensaios foram baixos e portanto a a Eq. 3-5, foi adotada neste trabalho.

As correlações entre as resistências características calculadas para valores de 0,5 mm e 2,5 mm de abertura de fissura são apresentadas na Figura 3-26 para a macrofibra A e na Figura 3-27 para a macrofibra B.

Figura 3-26 – Resistência característica residual a tração na flexão versus teor de macrofibra A

Figura 3-27 – Resistência característica residual a tração na flexão versus teor de macrofibra B

Conforme mostrado na Figura 3-26 e na Figura 3-27 relações lineares foram obtidas entre as resistências características calculadas para 0,5 e 2,5 mm de abertura de fissura, com coeficiente de determinação (R^2) maiores que 0,92. De forma análoga ao indicado para as resistências médias, o valor de F_{R1k} do concreto simples foi incorporado à correlação ($f_{R1k} = 0,468$).

As análises dos critérios da prática recomendada para uso de CRF em elementos estruturais do Grupo B são apresentadas na Figura 3-28 e na Figura 3-29.

Figura 3-28 – f_{R1k}/f_{Lk} versus teor de macrofibra A

Figura 3-29 – f_{R3k} / f_{R1k} versus teor de macrofibra B

Considerando os requisitos mínimos para considerar o CRF como material estrutural ($f_{R1k}/f_{Lk} \geq 0,4$ e $f_{R3k}/f_{R1k} \geq 0,5$) a macrofibra de vidro A com a matriz cimentícia utilizada neste estudo, atenderia os parâmetros para aplicação em elementos estruturais do Grupo B utilizando um teor de 11 kg/m³. Já a macrofibra B atenderia aos parâmetros do Grupo B com aproximadamente 14 Kg/m³.

Para a macrofibra A os teores obtidos para atender aos requisitos dos grupos A e B foram próximos, 10,5 kg/m³ e 11 kg/m³, respectivamente. Isto ocorreu devido o desvio padrão dos ensaios de flexão terem sido baixos, aproximando os valores médios e característicos. Já a macrofibra B, por apresentar resultados um pouco mais dispersos, atingiu os parâmetros médios com 11 kg/m³ (Grupo A) e foram necessários mais 3 kg/m³ de fibra para atingir aos parâmetros característicos do Grupo B.

Os compósitos utilizados neste estudo, considerando os teores de macrofibras de vidro já citados anteriormente, atenderam as indicações das práticas recomendadas IBRACON/ABECE (Prática Recomendada IBRACON/ABECE, 2016, 2017a, 2017b, 2017c) e se habilitaram a utilização como reforço único em elementos estruturais, como tubos de concreto, paredes entre outros. Vale lembrar que a utilização de reforços híbridos, com outros tipos de fibras também é uma importante alternativa tecnológica para o avanço das estruturas de concreto.

3.4.3 Ensaio de duplo puncionamento (DPT)

3.4.3.1 Resultados obtidos para a macrofibra A

Os resultados apresentados na Figura 3-30 mostram as curvas da carga *versus* deslocamento vertical obtidas para todos os teores de macrofibra A estudados. As curvas foram produzidas com os resultados obtidos após carga de fissuração da matriz (P_f), as cores claras são os resultados individuais e as curvas em negrito representam as médias dos resultados.

Observa-se na Figura 3-30 que o ensaio de duplo puncionamento foi capaz de diferenciar o comportamento pós-fissuração dos concretos com o aumento no teor da macrofibra A. Nota-se também com uma análise visual que a dispersão foi mais acentuada para os menores teores e menor para o teor mais elevado empregado. Para melhor análise, os resultados médios das cargas e resistências residuais relevantes são apresentados na Tabela 3-7 e a energia dissipada é apresentada na Tabela 3-8 com os respectivos coeficientes de variação. A tenacidade ou energia (em joules ou N.m) é calculada através da área sob a curva carga por deslocamento vertical (δ_p), após a carga de fissuração (P_f) até o nível de deslocamento necessário.

Figura 3-30 – Curvas de carga residual x deslocamento vertical no DPT para a macrofibra A (a) 3,8 kg/m³, (b) 7,6 kg/m³ e (c) 11,5 kg/m³

Tabela 3-7 – Resultados médios dos ensaios DPT da macrofibra A

Teor de Fibra [kg/m³]		Cargas relevantes [kN]					Resistência Residual (MPa)				
		P_f	$P_{0,5}$	$P_{1,5}$	$P_{2,5}$	$P_{3,5}$	f_t	$f_{R0,5}$	$f_{R1,5}$	$f_{R2,5}$	$f_{R3,5}$
3,8	Média	126,7	19,9	4,7	2,3	1,5	3,19	0,50	0,12	0,06	0,04
	CV	10%	36%	22%	21%	31%	10%	36%	22%	21%	31%
7,6	Média	125,5	35,7	13,2	7,3	4,3	3,16	0,90	0,33	0,18	0,11
	CV	12%	23%	41%	49%	61%	10%	22%	42%	51%	60%
11,5	Média	129,9	57,0	22,3	12,7	8,1	3,27	1,43	0,56	0,32	0,20
	CV	7%	14%	13%	20%	18%	7%	15%	15%	22%	20%

Tabela 3-8 – Resultados médios da energia dos ensaios DPT da macrofibra A

Teor de Fibra [kg/m³]		Energia [N.m]			
		<i>E_{0,5}</i>	<i>E_{1,5}</i>	<i>E_{2,5}</i>	<i>E_{3,5}</i>
3,8	Média	22,19	29,44	32,27	33,94
	CV	13%	27%	27%	27%
7,6	Média	29,04	51,17	60,99	66,65
	CV	13,3%	19%	22%	24%
11,5	Média	57,03	74,16	91,14	101,32
	CV	14%	11%	11%	12%

A Tabela 3-7 mostra que foram obtidos baixos coeficientes de variação para os resultados da carga de fissuração (P_f), entre 7% e 12%. Para as cargas residuais os coeficientes de variação são maiores, variando entre 13% e 61%. Percebe-se também que os maiores coeficientes de variação estão associados aos maiores deslocamentos verticais ($P_{2,5}$ e $P_{3,5}$). Isto ocorre porque o desvio padrão sofreu pequena variação, enquanto a resistência residual média reduziu com o aumento do deslocamento. É importante observar que a dispersão observada no ensaio DPT foi mais elevada em comparação os ensaios de flexão realizados neste estudo.

A carga de fissuração do DPT (P_f) não foi influenciada pelo incremento no teor de fibras, fato confirmado pelo teste de análise de variância (ANOVA) com nível de significância de 5% (valor p igual a $0,827 > 0,05$). Em contrapartida, os resultados de resistência pós fissuração aumentaram proporcionalmente com o acréscimo no teor de fibra. Um teste ANOVA resultou um valor p igual a $0,001 < 0,05$, indicando efeito significativo do teor de fibras sobre as cargas residuais, mesmo considerando a elevada dispersão do teste para maiores deslocamentos verticais. Isto é um importante resultado para considerar o DPT como um ensaio alternativo para o controle tecnológico do CRF, porque mostra a capacidade do método para diferenciar o comportamento pós-fissuração com a variação no teor de fibras.

A Tabela 3-8 também apresenta os resultados da energia dissipada no DPT para 0,5, 1,5, 2,5 e 3,5 mm de deslocamento vertical. Estes resultados mostram a tendência esperada de aumento da energia absorvida com o

acrécimo de fibra adicionada. As variações dos resultados da energia absorvida são menores quando comparados com a variação obtida nos resultados de cargas residuais. Isto porque o cálculo da área representa um comportamento médio do compósito e compensa dispersões pontuais

3.4.3.2 Resultados obtidos para a macrofibra B

Os resultados apresentados na Figura 3-31 mostram as curvas da carga após fissuração *versus* deslocamento vertical obtidas para todos os teores de macrofibra B estudados. As curvas foram produzidas com os resultados obtidos após carga de fissuração da matriz (P_f), as cores claras são os resultados individuais e as curvas em negrito representam as médias dos resultados.

Similar ao observado para a macrofibra A, a Figura 3-31 mostra que o ensaio de duplo puncionamento foi capaz de diferenciar o comportamento pós-fissuração dos concretos com o aumento no teor da macrofibra B. Quando a dispersão, a análise visual dos gráficos não indica diferenças de variabilidade em função do aumento no teor de fibras. Para melhor análise dos resultados, os resultados médios das cargas relevantes das resistências residuais são apresentados na Tabela 3-9 com o respectivo coeficiente de variação e da energia dissipada são apresentados na Tabela 3-10.

Figura 3-31 – Curvas de carga residual x deslocamento vertical no DPT para a macrofibra B (a) 4,5 kg/m³, (b) 9,0 kg/m³ e (c) 13,5 kg/m³

Tabela 3-9 – Resultados médios dos ensaios DPT da macrofibra B

Teor de Fibra [kg/m³]		Cargas relevantes [kN]					Resistência Residual (MPa)				
		P_f	$P_{0,5}$	$P_{1,5}$	$P_{2,5}$	$P_{3,5}$	f_t	$f_{R0,5}$	$f_{R1,5}$	$f_{R2,5}$	$f_{R3,5}$
4,5	Média	137,4	17,7	7,4	3,9	2,4	3,48	0,45	0,19	0,10	0,06
	CV	7%	25%	30%	34%	44%	8%	24%	29%	33%	43%
9,0	Média	135,2	38,8	14,7	8,4	5,4	3,42	0,98	0,37	0,21	0,14
	CV	10%	29%	20%	24%	27%	11%	28%	20%	22%	25%
13,5	Média	141,6	51,7	21,2	11,4	7,5	3,58	1,31	0,54	0,29	0,19
	CV	4%	28%	20%	28%	38%	4%	29%	20%	28%	37%

Tabela 3-10 – Resultados médios da energia dos ensaios DPT da macrofibra B

Teor de Fibra [kg/m³]		Energia [N.m]			
		$E_{0,5}$	$E_{1,5}$	$E_{2,5}$	$E_{3,5}$
4,5	Média	15,4	26,6	31,9	35,0
	CV	42%	33%	31%	30%
9,0	Média	30,0	53,8	65,2	72,2
	CV	13%	16%	16%	17%
13,5	Média	37,6	70,5	86,5	95,9
	CV	14%	20%	19%	20%

A Tabela 3-9 mostra que os menores coeficientes de variação, entre 4% e 10%, foram obtidos para a carga de fissuração (f_t). As cargas residuais apresentaram coeficiente de variação entre 20% e 44%, e os maiores coeficientes de variação são normalmente associados aos maiores deslocamentos verticais ($P_{2,5}$ e $P_{3,5}$). Isto ocorre pelo desvio padrão do ensaio não variar significativamente quando o deslocamento vertical aumenta, mas a carga residual reduziu. A dispersão observada no DPT foi mais elevada em comparação com os resultados de flexão, porém nota-se que a macrofibra B apresentou menores dispersões de resultados quando comparados a macrofibra A.

A carga de fissuração do DPT (P_f) não foi influenciada pela adição de fibras, fato confirmado pelo teste de análise de variância (ANOVA) com nível de significância de 5% (valor p igual a 0,563 > 0,05). Em contrapartida, os resultados de resistência pós fissuração aumentam proporcionalmente ao teor de fibra adicionado. Como mencionado anteriormente isto é fundamental para que o ensaio de duplo puncionamento – DPT seja considerado como ensaio de controle de tecnológico para o CRF.

A Tabela 3-10 também apresenta os resultados da energia dissipada no DPT para 0,5, 1,5, 2,5 e 3,5 mm de deslocamento vertical. Estes resultados mostram o aumento da energia absorvida no ensaio DPT com o aumento no teor da macrofibra B. As variações dos resultados da energia absorvida são menores quando comparados com a variação obtida nos resultados de cargas residuais.

Isto porque o cálculo da área resulta um comportamento médio do compósito e compensa dispersões pontuais.

3.4.3.3 Comparativo do ensaio DPT para as macrofibras A e B

A Figura 3-32 e Figura 3-33 apresentam as curvas médias dos resultados do DPT para as fibras estudadas. Na legenda a letra representa o tipo de macrofibra e o número representa o teor utilizado em kg/m^3 .

Figura 3-32 – Curvas médias do ensaio DPT para a macrofibra A

Figura 3-33 – Curvas médias do ensaio DPT para a macrofibra B

Foi possível verificar na Figura 3-32 e Figura 3-33 o aumento do teor de fibra aplicado, tanto para a macrofibra A quanto para a macrofibra B. Comparando o comportamento de ambas as macrofibras nota-se que o ensaio DPT não foi capaz de identificar diferenças. No entanto, como observado na Figura 3-21 no ensaio de flexão (3PBT), foi possível notar diferença na resistência residual na flexão para aberturas de fissura pequenas (inferiores a 0,5 mm).

3.5 Conclusões do capítulo

Neste capítulo foi proposta a realização da caracterização do comportamento pós-fissuração do concreto com macrofibras de vidro com ensaios de flexão vigas com entalhe e duplo puncionamento. Com base nos ensaios de flexão foram realizadas comparações com os requisitos do *fib* Model Code, 2010 e da prática recomendada IBRACON/ABECE para o dimensionamento de estruturas com CRF. A partir dos resultados obtidos e das análises realizadas depreende-se que:

- Os ensaios de flexão de três pontos - 3PBT realizados apresentaram baixa variabilidade e todos os teores de fibra avaliados resultaram comportamento pós-fissuração de *softening*. As correlações lineares estabelecidas entre as resistências residuais médias e o teor de fibra para os parâmetros de 0,5 mm (ELS) e 2,5 mm (ELU), apresentaram coeficientes de determinação R^2 elevados (superiores a 0,93). Esse tipo de correlação é uma ferramenta muito importante para o projetista para a especificação do CRF que atenderá determinada demanda estrutural.
- O atendimento aos requisitos mínimos estabelecidos para definição do CRF como material estrutural pelo *fib* Model Code 2010 e pela Prática recomendada IBRACON/ABECE para elementos estruturais do Grupo B também podem ser obtidos por meio de correlações estabelecidas em etapa de qualificação do CRF. Para a matriz de concreto adotada nessa pesquisa é necessário a adição de 11 kg/m³ da macrofibra A e 14 kg/m³ da macrofibra B, por exemplo.
- O ensaio de duplo puncionamento - DPT foi capaz de diferenciar os comportamentos dos concretos quanto ao teor de fibras utilizado. Isto é um

importante resultado para considerar o DPT como um ensaio alternativo para o controle tecnológico do CRF, porque mostra a robustez do método para diferenciar o comportamento pós-fissuração com a variação no teor de fibras. Entretanto, a dispersão dos resultados foi maior quando comparado com 3PBT e, por isso, o número de corpos de prova deve ser maior para garantir a qualidade do processo de controle tecnológico.

4 CORRESPONDÊNCIA ENTRE OS ENSAIOS DE FLEXÃO E DE DUPLO PUNCIONAMENTO

4.1 Introdução

A publicação do *fib* Model Code 2010 (*fib*, 2013), pode ser considerado um marco para a utilização do concreto com fibras no mundo. Isto porque se trata de um código modelo amplamente difundido e apresentou nesta edição orientações para o dimensionamento de estruturas utilizando CRF. Entretanto, o documento restringe ao uso de fibras de aço, que tem histórico de pesquisas e aplicações como material estrutural mais consistente que outros tipos de fibra. A partir dessas diretrizes já consolidadas para as fibras de aço, os esforços de pesquisa foram intensificados no sentido de se avaliar as particularidades de outros tipos de fibra com função estrutural, como as macrofibras poliméricas (PUJADAS, 2013; CONFORTI, ZERBINO, PLIZZARI, 2018; VRIJDAGHS, di PRISCO, VANDEWALLE, 2018) e macrofibras de vidro (CONFORTI, ZERBINO, PLIZZARI, 2018; CARNIO, 2018).

No Brasil, a normalização do CRF ainda é muito escassa, contando apenas com uma norma para a especificação de fibras de aço. O IBRACON/ABECE reuniu em um comitê técnico pesquisadores e especialistas em CRF para discutir e propor documentos de prática recomendada para uso de fibras em estruturas de concreto. Seguindo a tendência das normas internacionais e do *fib* Model Code 2010 foram publicadas quatro práticas recomendadas para caracterização de macrofibras poliméricas e de vidro, dimensionamento e controle tecnológico para o concreto com fibras (Prática Recomendada IBRACON/ABECE, 2016, 2017a, 2017b, 2017c). Em todos esses documentos a parametrização do comportamento pós-fissuração do CRF para dimensionamento e controle é caracterizado por meio do ensaio de flexão de vigas em três pontos com entalhe (3PBT). Esse é normalizado segundo a EN 14651 (2007) e a prática recomendada de controle tecnológico (Prática recomendada IBRACON/ABECE, 2017a) também apresenta um método para a realização do ensaio.

O ensaio 3PBT exige corpos de prova de grandes dimensões e equipamentos complexos para sua realização, que sejam capacitados com

sistema para controle da velocidade de ensaio por meio da abertura de fissura ou deflexão do corpo de prova (denominado sistema *closed loop*). A utilização de métodos de ensaio alternativos não é descartada pelo *fib* Model Code 2010 (fib, 2013), mas esses métodos apenas podem ser aplicados se comprovada correlação com o método de referência. Por isso, outros ensaios vêm sendo estudados, principalmente com foco no controle de qualidade do CRF. Nesta linha, o ensaio de duplo puncionamento (DPT), também conhecido como ensaio Barcelona (UNE 83515, 2010), que utiliza corpos de prova cilíndricos e máquinas de ensaio mais simples, vem sendo estudado como alternativa ao ensaio 3PBT.

A correspondência entre os resultados obtidos com os ensaios 3PBT e DPT tem sido objeto de alguns estudos (GALOBARDES, FIGUEIREDO, 2015; GALEOTE et al., 2017; CARMONA, MOLINS, AGUADO, 2018). Esses estudos buscaram avaliar diferentes matrizes de concreto, fibras de aço e poliméricas, apresentando boas correlações entre os resultados experimentais e as previsões pelos modelos propostos. Entretanto, os autores salientam que a correlação é específica para um determinado tipo de fibra (GALOBARDES, FIGUEIREDO, 2015) ou ainda a dificuldade de obter boa correlação para a resistência residual f_{R1} (GALEOTE et al., 2017).

Contudo, para que o ensaio de duplo puncionamento seja considerado como alternativo ao ensaio de flexão também para o controle tecnológico de estruturas produzidas com concreto com macrofibras de vidro é imperativo a validação da correspondência entre os métodos também para esse tipo de fibra.

4.1.1 Objetivos do capítulo

O objetivo deste capítulo é avaliar diferentes alternativas para correlacionar os resultados dos ensaios de flexão três pontos (3PBT) e duplo puncionamento (DPT) utilizando concretos com macrofibras de vidro.

4.2 Alternativas para o estabelecimento de correlações entre os ensaios 3PBT e DPT

Como mencionado anteriormente o ensaio de flexão é o ensaio de referência para estabelecer os parâmetros de dimensionamento estrutural do CRF. Por isso, para a utilização de ensaios alternativos, com o duplo puncionamento, é indispensável o estabelecimento de correspondências entre os ensaios. Tais correspondências podem ser baseadas em resultados de um programa experimental específico para o estabelecimento de uma equação de regressão. Alternativamente, equações apresentadas na literatura para correlacionar os métodos de ensaio podem adotadas. A seguir algumas alternativas para correlacionar os ensaios 3PBT e DPT são apresentadas.

4.2.1 Correlação baseada em estudo experimental específico

A alternativa mais direta para o estabelecimento da correlação entre os ensaios DPT e 3PBT para um determinado CRF é a realização de um estudo de dosagem. Nesse caso, as características de consistência e classe de resistência adequados ao projeto são adotados como premissas e o teor de fibra é variado. Esse estudo pode ser realizado com um único tipo de fibra previamente selecionada ou utilizar mais de um tipo de fibra. Os concretos são produzidos e moldados corpos de prova para realização de ensaios 3PBT e DPT. Com os resultados das resistências residuais obtidas em cada ensaio é realizada uma regressão linear simples, que pode utilizar todas as aberturas de fissura em uma única regressão ou uma regressão para cada nível de abertura de fissura. Com esse tipo de equação de regressão se adota o parâmetro de abertura de fissura para o 3PBT e de deslocamento vertical para o DPT.

4.2.2 Correlação proposta por Galobardes e Figueiredo (2015)

A equação proposta por Galobardes e Figueiredo (2015) permite relacionar a carga de fissuração do DPT com a carga no limite de proporcionalidade do 3PBT e as resistências residuais em ambos os ensaios.

Para a relação entre a carga de fissuração (P_f) do ensaio DPT e carga no limite de proporcionalidade (F_L) no 3PBT, Galobardes e Figueiredo (2015)

utilizaram a equação 4-1, combinada com as equações 3-2 e 3-3 já apresentadas.

$$f_{ct,fl} = f_L = f_{ct} \cdot (1,6 - h) \quad 4-1$$

Onde:

$f_{ct,fl}$ é a resistência à tração na flexão, em MPa;

f_L é resistência de fissuração no ensaio 3PBT ou limite de proporcionalidade, em MPa;

f_{ct} é a resistência à tração do concreto, em MPa;

h é a altura total da aresta da seção da viga no ensaio 3PBT, em metros

O resultado desta combinação está apresentado na equação 4-2 e permite estimar a resistência no limite de proporcionalidade pelo 3PBT utilizando a carga de fissuração do DPT.

$$f_L = \frac{4 \cdot P_f}{9 \cdot \pi \cdot a \cdot H} \cdot (1,6 - h) \quad 4-2$$

Onde:

f_L é a resistência de fissuração no ensaio 3PBT ou limite de proporcionalidade, em MPa;

P_f é a carga de fissuração no ensaio DPT, em N;

a é o diâmetro do cilindro de punção no ensaio DPT, em mm;

H é a altura do corpo de prova no ensaio DPT, em mm;

h é a altura total da aresta da seção da viga no ensaio 3PBT, em metros

Para se obter as resistências residuais f_{Ri} , onde i corresponde aos valores de abertura de fissura de 0,5, 1,5, 2,5 e 3,5 mm, os autores apresentam a Equação 4-3. Essa equação é composta por três principais parâmetros: $E_{0,5}$ e $P_{0,5}$, respectivamente a energia, em joules, e a carga residual, em newtons, correspondentes a 0,5 mm de deslocamento vertical no ensaio DPT e P_f a carga de fissuração no ensaio DPT.

$$f_{Ri} = \frac{E_{0,5}}{A + B \cdot \left(\frac{P_{0,5}}{P_f}\right)} + C \quad 4-3$$

Os parâmetros A (Equação 4-4), B (Equação 4-5) e C (Equação 4-6) foram determinados baseados em extensa campanha experimental, e devem ser calculados para cada valor de abertura de fissura 0,5, 1,5, 2,5 e 3,5 mm que correspondem, respectivamente, às resistências residuais f_{R1} , f_{R2} , f_{R3} e f_{R4} .

$$A = -1148,93 \times \text{CMOD}^2 + 473,72 \times \text{CMOD} - 2165,34 \quad 4-4$$

$$B = 1889,31 \times \text{CMOD}^2 - 791,03 \times \text{CMOD} + 3617,56 \quad 4-5$$

$$C = -0,14 \times \text{CMOD}^2 + 0,48 \times \text{CMOD} + 3,80 \quad 4-6$$

É importante destacar a respeito dessas equações que Galobardes e Figueiredo (2015) alertaram que a mesma foi validada para um número pequeno de corpos de prova e deveria ser utilizado apenas para o concreto utilizado no próprio estudo. O CRF utilizado no estudo apresentava f_{ck} igual 45 MPa, foram utilizados 40 kg/m³ de fibra de aço Dramix 80/60BN, 1,5 kg/m³ de microfibra de polipropileno e atingiu uma resistência à flexão de 5,6 MPa.

4.2.3 Correlação proposta por Galeote et al. (2017)

A equação de correlação proposta por Galeote et al. (2017) permite calcular as cargas residuais do ensaio de flexão três pontos com entalhe (3PBT) a partir dos resultados de carga residual e energia do ensaio de duplo puncionamento (DPT).

As cargas residuais do ensaio DPT ($P_{DPT,i}$), referente aos deslocamentos verticais i iguais a 1,5, 2,5 e 3,5 mm, e a energia dissipada para cada um desses deslocamentos verticais ($E_{DPT,i}$), são determinadas e utilizadas para prever as cargas residuais do ensaio 3PBT ($F_{3PBT,i}$) para diferentes níveis i de abertura de fissura através da Equação 4-7.

$$F_{3PBT,i} = \alpha \cdot P_{DPT,i} + \beta \cdot E_{DPT,i}^2 \quad 4-7$$

Os termos α e β da Equação 4-7 são constantes que foram obtidas por meio de regressão de dados experimentais para determinados valores de CMOD e o deslocamento vertical e estão apresentadas na Tabela 4-1.

Tabela 4-1 – Constantes utilizadas para a estimativa dos resultados de 3PBT utilizando resultados do DPT

i [mm]	α	β	R^2
1,5	1,76E-01	-3,29E-04	0,74
2,5	1,45E-01	4,70E-06	0,79
3,5	1,52E-01	1,46E-05	0,76

Fonte: Galeote et al. (2017)

A Equação 4-7 é indicada como sendo uma correlação geral entre os ensaios 3PBT e DPT, pois foi parametrizada utilizando concretos de consistência distintas (plásticos e autoadensáveis) e utilizando fibras de aço e macrofibras de polipropileno. Porém, o valor de CMOD igual a 0,5 mm não deve ser estimado por essa equação. Galeote et al. (2017) mostram que para esse parâmetro o coeficiente de correlação (R^2) não foi aceitável. Os autores atribuem a diferença no mecanismo distinto de formação de fissuras entre os métodos de ensaio, que afeta mais os menores valores de deslocamento.

4.3 Metodologia

Os resultados do programa experimental apresentado no capítulo 3 foram utilizados para demonstrar as possibilidades de correspondência entre os ensaios de flexão (3PBT) e duplo puncionamento (DPT).

A metodologia foi dividida em três etapas. Na primeira foram realizadas regressões lineares de correspondência direta entre as cargas residuais obtidas em ambos os ensaios para cada macrofibra utilizada. A segunda baseou-se na equação proposta por Galobardes e Figueiredo (2015) para obter as resistências residuais e o limite de proporcionalidade do ensaio 3PBT a partir de resultados do ensaio DPT. Por fim, uma terceira alternativa utilizada foi a aplicação da equação proposta por Galeote et al. (2017) que indica uma correlação para

estimação de algumas cargas residuais do ensaio 3PBT a partir de resultados do ensaio DPT.

4.4 Resultados e análises

4.4.1 Correspondência direta entre os resultados experimentais de carga residual nos ensaios 3PBT e DPT

Os resultados do programa experimental do capítulo 3 foram utilizados para elaborar a relação entre os métodos de ensaio. Primeiramente, os resultados experimentais de carga residual obtidos para os dois ensaios foram relacionados, considerando os valores de deslocamento vertical para o ensaio DPT e de abertura de fissura para o ensaio 3PBT. Para ambos os ensaios os valores considerados foram de 0,5, 1,5, 2,5 e 3,5 mm.

A Figura 4-1 apresenta as correlações obtidas para a macrofibra A e a Figura 4-2 para a macrofibra B.

Figura 4-1 – Correspondência das cargas residuais experimentais dos ensaios 3PBT e DPT para a macrofibra A

Figura 4-2 – Correspondência das cargas residuais experimentais dos ensaios 3PBT e DPT para a macrofibra B

Observa-se na Figura 4-1 que, para a macrofibra A, os coeficientes de determinação (R^2) foram altos, chegando a valores de 1,00 para os maiores valores de deslocamento vertical e abertura de fissura. Para a macrofibra B os coeficientes de determinação (R^2) foram um pouco menores, partindo de 0,85 e chegando a 0,94 para abertura de fissura/deslocamento vertical igual a 1,5 mm. Buscando uma correlação única independentemente do nível de abertura de fissura/deslocamento vertical foram produzidas as correlações apresentadas na Figura 4-3.

Figura 4-3 – Correspondência das cargas residuais experimentais dos ensaios 3PBT e DPT

A Figura 4-3 expressa duas correlações, uma para cada macrofibra de vidro avaliada, com coeficientes de determinação (R^2) muito próximos daqueles obtidos para as correlações para nível de abertura de fissura/deslocamento vertical. O estabelecimento de uma correlação única para todas as aberturas de fissura da macrofibra A, resultava um coeficiente de determinação R^2 igual a 0,88. No entanto, notava-se um valor espúrio (*outlier*) que apresentava um grande afastamento dos demais pontos da série. Esse ponto corresponde a abertura de fissura de 0,5 mm para o teor de fibras 3,8 kg/m³ (na Figura 4-3 ilustrada como A'). Eliminando esse ponto, o coeficiente de determinação (R^2) aumentou para 0,95. A ocorrência desse resultado fora da tendência pode ser justificada pela presença de instabilidade pós-fissuração no ensaio de duplo punção, que é mais acentuada em compósitos com menor quantidade de reforço e para menores níveis de abertura de fissura (SIMÃO et al., 2019). Para a macrofibra B, o coeficiente de determinação R^2 foi de 0,84 e percebe-se que nenhum ponto apresenta grande afastamento da linha de tendência. A obtenção de elevados coeficientes de determinação (R^2) demonstram a possibilidade de correlação direta entre os resultados dos ensaios 3PBT e DPT para um determinado compósito. Tais correlações obtidas são experimentais e

podem ser geradas na fase de estudo de dosagem da fibra para obter as correlações que serão consideradas durante o processo de controle tecnológico. Dessa forma, o projetista pode verificar os valores correspondentes do ensaio de flexão de posse dos resultados de controle com o ensaio de duplo punção.

4.4.2 Resultados obtidos por meio da correlação proposta por Galobardes e Figueiredo (2015)

Aplicando-se a Equação 4-2 para a estimativa dos valores de resistência no limite de proporcionalidade foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 4-2. Nessa tabela os valores estimados são comparados com os resultados experimentais do ensaio 3PBT para cada teor de fibra utilizado que foram apresentados no capítulo 3.

Tabela 4-2 – Comparação das resistências no limite de proporcionalidade (f_{LOP}) estimadas e determinadas experimentalmente no ensaio 3PBT

Tipo da Macrofibra	Teor de Fibra [Kg/m ³]	f_{LOP} Estimado [MPa]	f_{LOP} Experimental [MPa]	Erro [%]
A	3,8	4,62	4,16	11%
	7,6	4,58	4,59	0,3%
	11,5	4,74	4,43	7%
B	4,5	5,01	3,78	33%
	9,0	4,93	4,09	21%
	13,5	5,16	4,55	14%

Na Tabela 4-2 verifica-se que para a macrofibra de vidro A o erro encontrado ao estimar os valores de resistência f_{LOP} estimados variou entre 0,3% e 11% e, em média, o erro foi de 6%. Já para a macrofibra B, o erro variou entre 14% e 33% e, em média, o erro foi de 22%.

Para baixos consumos de fibra a resistência no limite de proporcionalidade geralmente coincide com a resistência à fissuração do compósito. Essa resistência à fissuração tem relação direta com a resistência à tração do compósito e, por isso, uma equação desenvolvida a partir de resultados com fibra de aço pode ser aplicada, com erros relativamente pequenos, a concretos com fibras de vidro.

Já a tentativa de aplicar a Equação 4-3, também proposta por Galobardes e Figueiredo (2015) para a predição das resistências residuais, não foi bem sucedida. Nesse caso, o tipo de fibra exerceu forte influência na correlação entre os ensaios e, como os próprios autores salientaram, não se trata de uma equação de correlação geral para qualquer tipo de fibra e compósito.

4.4.3 Resultados obtidos por meio da correlação proposta por Galeote et al (2017)

A Equação 4-7 apresentada por Galeote et al. (2017) propõe-se a ser mais geral, tendo sido determinada a partir de um grupo maior de resultados e com uma certa variedade de compósitos. Ainda assim, cabe salientar que as macrofibras de vidro não foram utilizadas pelos autores.

A Figura 4-4 e a Figura 4-5 apresentam as cargas residuais medidas e estimadas para o 3PBT para macrofibras A e B, respectivamente. Os valores de carga residual para valores de abertura de fissura iguais a 1,5, 2,5 e 3,5 mm foram estimados utilizando os resultados do ensaio DPT para os deslocamentos verticais iguais a 1,5, 2,5 e 3,5 mm.

Figura 4-4 – Correlação entre os resultados experimentais e as estimativas das cargas residuais do ensaio 3PBT para a macrofibra A

Figura 4-5 – Correlação os resultados experimentais e as estimativas das cargas residuais do ensaio 3PBT para a macrofibra B

Nota-se na Figura 4-4 uma excelente correlação ($R^2 = 0,97$) entre os resultados de carga residual determinados experimentalmente com a macrofibra A e os estimados por meio da Equação 4-7. Os valores obtidos com a utilização da correlação proposta por Galeote et al. (2017), foi em torno de 45% menores em relação aos resultados experimentalmente. Isto mostra que existe uma forte correspondência entre os resultados obtidos com os ensaios 3PBT e DPT, mas o estabelecimento de uma equação única para qualquer tipo de compósito é uma tarefa complexa. Para a macrofibra B, a Figura 4-5 mostra que a correlação foi boa, mas com coeficiente de determinação mais baixo ($R^2 = 0,78$) e a correlação estimou valores menores em relação ao resultado experimental em cerca de 46%.

Esses resultados demonstram o potencial da equação proposta por Galeote et al. (2017), desde que as constantes da equação, apresentadas na Tabela 4-1, sejam ajustadas para macrofibras de vidro. Além disso, confirmam o potencial de utilização do DPT como método alternativo de ensaio para controle de qualidade do CRF.

4.5 Conclusões do capítulo

Neste capítulo foi proposta a avaliação diferentes alternativas para correlacionar os resultados dos ensaios de flexão três pontos (3PBT) e de duplo

puncionamento (DPT) utilizando concretos com macrofibras de vidro. A partir dos resultados obtidos e das análises realizadas pode-se concluir que:

- Os resultados experimentais dos ensaios 3PBT e DPT podem ser considerados correspondentes e podem ser obtidas equações de regressão linear com elevados coeficientes de determinação R^2 . Essas equações podem ser utilizadas como ferramenta para que o controle da qualidade seja realizado com o ensaio DPT e o projetista possa verificar o valor correspondente no ensaio 3PBT, que é o ensaio de referência para o dimensionamento estrutural do CRF até o momento.
- A equação proposta por Galobardes e Figueiredo (2015) apresenta bons resultados para estimar a resistência no limite de proporcionalidade, mas não é adequada para estimar as resistências residuais de concretos produzidos com macrofibras de vidro.
- O modelo apresentado por Galeote et al. (2017) confirmou a hipótese de que existe uma forte correspondência entre os resultados obtidos com os ensaios 3PBT e DPT. Isto porque resultou correlação linear com R^2 de 0,97 para a macrofibra A e com R^2 de 0,78 para a macrofibra B, apesar de subestimar os resultados das cargas residuais. Esses resultados podem ser melhorados com ajustes nas constantes da equação para o uso de macrofibras de vidro.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo geral proposto para a dissertação foi analisar metodologias para a caracterização e controle tecnológico do concreto com macrofibras de vidro para aplicação estrutural. Nesse sentido, os estudos realizados nesta pesquisa permitiram desenvolver uma metodologia para a caracterização das macrofibras de vidro e propor o ensaio de duplo puncionamento como um método de ensaio confiável para o controle tecnológico do concreto produzido com essas macrofibras para aplicações estruturais. Além disso, algumas conclusões pontuais obtidas para atender objetivos específicos ao longo do desenvolvimento do trabalho são apresentadas a seguir.

A avaliação da presença de dióxido de zircônio nas macrofibras é importante, pois confirma a característica de álcali resistência informada pelo fabricante e permite a utilização de fibras de vidro como reforço em materiais cimentícios. Uma das macrofibras avaliadas apresentou teor desse composto inferior ao indicado por normas internacionais. É importante destacar que a técnica adotada, espectrometria de emissão óptica (ICP OES) com digestão multiácida, é diferente da indicada na norma que estabelece este requisito, que seria a espectrometria de fluorescência de raios-X. A ICP OES é uma técnica de elevada precisão e encontrava-se disponível para realizar a avaliação. A compatibilidade entre as técnicas para esse tipo de análise deve ser discutida com o fabricante desse tipo de fibras para garantir a correta avaliação do material utilizando as técnicas disponíveis para tal.

Os ensaios de caracterização geométrica são uma importante ferramenta para o controle de recebimento das macrofibras, mas podem apresentar diferenças quando diferentes metodologias são utilizadas, apesar de considerados de relativa facilidade de execução. Especialmente para dimensões pequenas, como o diâmetro da macrofibra, a utilização de técnicas mais robustas a influências externas, como da pressão das garras do paquímetro e variações do diâmetro ao longo do comprimento, deve ser preferida. É importante destacar que o diâmetro da macrofibra é utilizado no cálculo da tensão de tração e procedimentos distintos podem resultar valor de resistência à tração diferente do esperado para o material.

A metodologia de ensaio adotada para avaliar a resistência à tração da diretamente na macrofibra de vidro se mostrou viável e traz uma significativa contribuição para os consumidores que não tem acesso a amostras do fio utilizado na produção das fibras. Por outro lado, o método não é adequado para a determinação do módulo de elasticidade, pois subestima essa característica. As diferenças entre máquinas de ensaio também resultam maior variabilidade no cálculo do módulo de elasticidade, principalmente quando as garras favorecerem o escorregamento das amostras. As garras mais adequadas são as autotravantes por efeito cunha, pois o travamento é intensificado com a tração da amostra.

A avaliação da adição de macrofibras sobre a consistência do concreto foi realizada em ambas as macrofibras estudadas e apesar da redução nos resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone, a alteração da trabalhabilidade do compósito não prejudicou a moldagem dos corpos de prova com teores utilizados neste trabalho.

Os ensaios de flexão de três pontos – 3PBT são ensaios que demandam equipamentos especiais, como uma máquina de ensaio que possibilite controle da velocidade de abertura de fissura ou deflexão do corpo de prova. Porém, quando realizado em equipamento adequado podem apresentar baixa variabilidade e possibilitar estabelecer correlações lineares estabelecidas entre as resistências residuais e o teor de fibra para os parâmetros de 0,5 mm (ELS) e 2,5 mm (ELU). Esse tipo de correlação é a ferramenta utilizada pelo projetista para especificar o CRF que atenderá a capacidade estrutural desejada.

O ensaio de duplo puncionamento - DPT é capaz de diferenciar os comportamentos dos concretos quanto ao teor de macrofibras de vidro utilizado. Isto é um importante resultado para considerar o DPT como um ensaio alternativo para o controle de qualidade do CRF, porque mostra a robustez do método para diferenciar o comportamento pós-fissuração com a variação no teor de fibras. Entretanto, a dispersão dos resultados pode ser maior quando comparado com 3PBT e, por isso, o número de corpos de prova deve ser maior para garantir a qualidade do processo de controle tecnológico.

A correspondência entre os resultados experimentais dos ensaios 3PBT e DPT pode ser utilizada como ferramenta para que o controle da qualidade seja realizado com o ensaio DPT e o projetista possa verificar o valor correspondente no ensaio 3PBT, que é o ensaio de referência para o dimensionamento estrutural do CRF até o momento.

O uso de equações propostas na literatura para estimar os resultados do ensaio 3PBT a partir de resultados do ensaio DPT devem ser avaliadas com cautela, pois o comportamento de cada ensaio varia com o tipo de compósito. O modelo proposto por Galeote et al. (2017) reforçou a hipótese de que existe uma forte correspondência entre os resultados obtidos com os ensaios 3PBT e DPT. Esse modelo pode ser melhorado com ajustes nas constantes da equação incorporando resultados de concretos com macrofibras de vidro.

Assim, o concreto reforçado com macrofibras de vidro pode ser indicado para substituição total ou parcial de reforço em concreto para utilização em elementos estruturais, como por exemplo, tubos de concreto, pisos industriais e paredes de concreto.

5.1 Sugestões para pesquisas futuras

Ainda que esta dissertação tenha contribuído para a evolução na caracterização e controle tecnológico do concreto com macrofibras de vidro para aplicação estrutural alguns aspectos ainda carecem de estudo. Por isso, algumas sugestões de pesquisa e programas experimentais são propostas.

A metodologia utilizada para caracterização mecânica foi adequada para determinação da resistência a tração, porém não obteve resultados satisfatórios para o módulo de elasticidade, portanto, sugere-se que trabalhos futuros avaliem melhorias na metodologia, como por exemplo, um aprimoramento da medida da deformação da fibra para o cálculo do módulo de elasticidade.

O ensaio de duplo puncionamento - DPT é capaz de diferenciar os comportamentos dos concretos quanto ao teor de macrofibras de vidro e pode ser considerado um ensaio alternativo para o controle de qualidade do CRF. Porém, a dispersão dos resultados pode ser maior quando comparado com outros ensaios e alternativas para minimizar esta variabilidade podem ser estudadas.

Outros métodos de ensaio alternativos para o controle tecnológico podem ser estudados, como os ensaios de tração indiretos Montevideu (MVD) e duplo corte em cunha (DEWS) e Método da cunha (WST).

Referências bibliográficas

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. **UNE 83515**: hormigones con fibras - determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción - método Barcelona. España, 2010. 10p.

_____. **UNE 83516**: Fibras para hormigón. Fibras de vidrio resistentes a los álcalis (AR). Definiciones, clasificación y especificaciones. España, 2015. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: concreto – ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007. 9p.

_____. **NBR 15530**: Fibras de aço para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2007. 7p.

_____. **NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998. 7p.

ASTM (American Society for Testing Materials). **ASTM D2256/D2256M**: standard test method for tensile properties of yarns by the single-strand method. Philadelphia, 2015. 13p.

_____. **ASTM C1609**: standard test method for flexural performance of fiber-reinforce concrete (using beam with third-point loading). Philadelphia, 2010. 8p

BARRAGAN, B. et al. Design of Glass Fiber Reinforced Concrete floors according to the fib Model Code 2010. In: FRC 2014- Joint ACI-fib International Workshop, 2014, Montreal. **Proceedings...** Fibre-reinforced concrete: From design to structural applications. Montreal, 2014.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. New York: Taylor & Francis, 2007.

CÁCERES, A. R. E. et al. Geometric characterization of polymeric macrofibers. **Rev IBRACON Estruturas e Materiais**, v. 8, p. 644–655, 2015.

CACERES, A.R.E., GALO BARDES, I., FIGUEIREDO, A.D. Mechanical Characterization of Synthetic Macrofibres. **Materials Research**, v.19, p. 711-720, 2016.

CARMONA, S.; AGUADO, A.; MOLINS, C. Generalization of the Barcelona test for the toughness control of FRC. **Materials and Structures**, v. 45, n. 7, p. 1053–69, 2012.

CARMONA, S.; MOLINS, C.; AGUADO, A. Correlation between bending test and barcelona tests to determine FRC properties. **Construction and building materials**, v.181, p. 673-686, 2018.

CARNIO, M. A. Paredes moldadas no local em concreto reforçado com fibras. **CONCRETO & CONTRUÇÃO**, v. 90, p. 47-52, 2018.

CEN (European Committee for Standardization). **EN 14651**. Test Method FOR Metallic Fiber Concrete – Measuring the Flexural Tensile Strength (Limit of Proportionality, Residual), 2007. 20p.

_____. **EN 15422**. Precast concrete products. Specification of glassfibres for reinforcement of mortars and concretes, 2008. 10p.

_____. **EN 15191**. Precast concrete products. Classification of glassfibre reinforced concrete performance, 2009. 18p.

CONFORTI, A., ZERBINO, R.; PLIZZARI, G. Influence of steel, glass and polymer fibers on the cracking behavior of reinforced concrete beams under flexure. **Structural concrete**, v. 20, n. 1, p. 1-11, 2018.

T. D'ANTINO, T., PISANI, M.A., POGGI, C. Effect of the environment on the performance of GFRP reinforcing bars. **Composites Part B**, v. 141, p. 123–136, 2018.

FEDERATION INTERNATIONALE DU BETON - Fib. **Model Code for Concrete Structures 2010**. Switzerland, 2013. 402p.

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

FIGUEIREDO, A. D. Os desafios para o uso do concreto reforçado com fibras como material estrutural. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 56., 2014, Natal. **Anais...** As construções em concreto como fator de integração entre as nações. São Paulo: Instituto Brasileiro do concreto (IBRACON), 2014.

GALEOTE, E. et al. Correlation between the Barcelona test and the bending test in fibre reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v.152, p. 529-538, 2017.

GALOBARDES, I.; FIGUEIREDO, A. D. Correlation between beam and Barcelona tests for FRC quality control for structural application'. In: International Conference on Fibre Concrete, 8., 2015, Prague. **Proceedings...** Fibre Concrete 2015. Prague: Czech Technical University in Prague, 2015.

GOPALARATNAM, V. S., GETTU, R. On the characterization of flexural toughness in fiber reinforced concretes. **Cement and Concrete Composites**, v. 17, n.3, p. 239-254, 1995.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3341**: Textile glass – Yarns – Determination of breaking force and breaking elongation. Geneva, 2000.7p.

_____. **ISO 1887**: Textile glass - Determination of combustible-matter content. Geneva, 2000. 5p.

LÖEBER, P. et al. Glass fiber reinforced concrete for slabs on ground - Material characterization and application. In: International Conference on Fibre Concrete, 8., 2015, Prague. **Proceedings...** Fibre Concrete 2015. Prague: Czech Technical University in Prague, 2015.

MAIDA, P. et al. Pullout behavior of polypropylene macro-synthetic fibers treated with nano-silica. **Construction and Building Materials** v.82, p.39–44, 2015.

MANZONI, J. P. et al. Mechanical characterization of concrete reinforced with composite glass macrofibre. In: Brazilian Conference on Composite Materials, 4., 2018, Rio de Janeiro. **Proceedings...** 4th Brazilian Conference on Composite Materials, 2018.

MEDEIROS, A. **Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras**. 2012. 201p. Tese (Doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2012.

MOLINS, C., AGUADO, A., SALUDES, S. Double Punch Test to control the tensile properties of FRC (Barcelona test). **Materials and Structures**, v. 42, n.4, p. 415-425, 2009.

MONTE, R. **Caracterização e controle do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras para tubos**. 2015. 159p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2015.

MONTE, R. et al. Barcelona test as an alternative method to control and design fiber-reinforced concrete pipes. **ACI Structural Journal**, v. 113, n. 6, p. 1175-1184. Nov-Dec 2016.

MONTE, R.; TOALDO, G. S.; FIGUEIREDO, A. D. Avaliação da tenacidade de concretos reforçados com fibras através de ensaios com sistema aberto. **Matéria (UFRJ)**, v. 19, p. 132-149, 2014.

NAAMAN, A. E. Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 1, n. 3, p. 241-252, 2003.

NOGUEIRA, A. B. et al. Avaliação da reprodutibilidade do ensaio Barcelona para controle do concreto reforçado com fibras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 59., 2017, Bento Gonçalves. **Anais...** O concreto para a retomada do desenvolvimento da infraestrutura nacional. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2017.

PEYVANDI, A., SOROUSHIAN, P., JAHANGIRNEJAD, S. Enhancement of the structural efficiency and performance of concrete pipes through fiber reinforcement. **Construction and Building Materials**, v. 45, p. 36-44, 2013.

Prática recomendada IBRACON/ABECE. **Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras**. São Paulo. Ed. IBRACON/ABECE, 1ª Edição, 2016. 39p.

_____. **Controle da qualidade do concreto reforçado com fibras**. Ed. IBRACON/ABECE, 1ª Edição, 2017a. 31p.

_____. Macrofibras de vidro álcali resistentes (ar) para concreto destinado a aplicações estruturais: Definições, especificações e conformidade. Ed. IBRACON/ABECE, 1ª Edição, 2017b. 26p.

_____. Macrofibras poliméricas para concreto destinado a aplicações estruturais: Definições, especificações e conformidade. Ed. IBRACON/ABECE, 1ª Edição, 2017c. 26p.

PUJADAS, P. et al. New analytical model to generalize the Barcelona test using axial displacement. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 19, n. 2, p. 259-71, 2013.

PUJADAS, P. **Caracterización y diseño del hormigón reforzado com fibras plásticas**. 2013. 263p. Tesis Doctoral. UPC, Barcelona, España, 2013.

PUJADAS, P. et al. Multidirectional double punch test to assess the post-cracking behaviour and fibre orientation on FRC. **Construction and Building Materials**, v. 58, p. 214–224, 2014.

SALVADOR, R. P. **Avaliação de desempenho mecânico de concreto reforçado com macrofibras sintéticas utilizando sistema de controle fechado de deformação**. 2013. 178p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica. São Paulo, 2013.

SILVA, C. L. et al Avaliação da dispersão de cargas de fissuração e residuais do concreto projetado reforçado com fibras de aço obtida pelo ensaio Barcelona. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 57., 2015, Bonito. **Anais...O Futuro do Concreto para a Sustentabilidade nas Construções**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2015.

SIMAO, L. et al. Avaliação do ensaio Barcelona em sistema fechado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 59., 2017, Bento Gonçalves. **Anais...O concreto para a retomada do desenvolvimento da infraestrutura nacional**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2017.

SIMÃO, L. et al. Influence of the instability of the double punch test on the post-crack response of fiber-reinforced concrete. **Construction and building materials**, v. 217, p. 185-192, 2019.

THE JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **JSCE-SF4**: Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete. Part III-2 Method of tests for steel fiber reinforced concrete. n. 3, p. 58-61. Concrete library of JSCE, 1984

VRIJDAGHS, R., di PRISCO, M., VANDEWALLE, L. Uniaxial tensile creep of a cracked polypropylene fiber reinforced concrete. **Materials and Structures**, v. 51, n. 5, p. 1-12. Feb 2018.

WOLF DE GOES, C.; et al. Análise da aplicação de concreto com adição de macrofibras estruturais sintéticas e microfibras de vidro anti-crak AR em pisos. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 12, n. 1, jun. 2016.