

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS**

ALEX MACÊDO LEITE

**AVALIAÇÃO DO USO DA MACROFIBRA POLIMÉRICA NA
COMPOSIÇÃO DE CONCRETO PARA FINS ESTRUTURAIS**

**SÃO CARLOS
2018**

ALEX MACÊDO LEITE

AVALIAÇÃO DO USO DA MACROFIBRA POLIMÉRICA NA COMPOSIÇÃO DE
CONCRETO PARA FINS ESTRUTURAIS

VERSÃO CORRIGIDA

A versão original encontra-se na Escola de Engenharia de São Carlos

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, como parte dos quesitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil (Estruturas).

Orientadora: Prof. Dra. Alessandra Lorenzetti de Castro

SÃO CARLOS

2018

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

Macêdo Leite, Alex

M374a

AVALIAÇÃO DO USO DA MACROFIBRA POLIMÉRICA NA COMPOSIÇÃO DE CONCRETO PARA FINS ESTRUTURAIS / Alex Macêdo Leite; orientadora Alessandra Lorenzetti de Castro. São Carlos, 2018.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) e Área de Concentração em Estruturas -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2018.

1. Macrofibra polimérica. 2. Concreto reforçado com fibras. 3. Tenacidade. 4. Propriedades mecânicas. 5. Piso industrial. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **ALEX MACEDO LEITE**.

Título da dissertação: "Avaliação do uso da macrofibra polimérica na composição de concreto para fins estruturais".

Data da defesa: 22/03/2018.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Profa. Dra. **Alessandra Lorenzetti de Castro**

(Orientadora)

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Associado **Antonio Domingues de Figueiredo**

(Escola Politécnica/EP-USP)

Aprovado

Prof. Dr. **Romel Dias Vanderlei**

(Universidade Estadual de Maringá/UEM)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

(Engenharia de Estruturas):

Prof. Titular **Humberto Breves Coda**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

A Deus.

Aos meus pais, Aurinete e Carlos, e à minha
irmã, Alana.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me proporcionar equilíbrio e perseverança ao longo da caminhada, renovando minhas forças quando o cansaço era vultoso e permitindo a conclusão de mais esta etapa da minha vida.

Aos meus pais, Aurinete e Carlos, e à minha irmã, Alana, pessoas essenciais na minha vida, que, apesar da distância, sempre estiveram presentes ao longo desta jornada. Pelo apoio que me foi concedido e pelos conselhos sábios em momentos de dúvidas.

Aos meus tios e primos, pelo auxílio fornecido.

À minha orientadora Alessandra Castro, pela sua disposição de esclarecer dúvidas, sempre calma e paciente, e por não medir esforços para que o projeto fosse efetivado. Pelas conversas descontraídas, palavras tranquilizantes e conselhos profissionais, além da amizade firmada.

Aos professores membros da banca, Antônio Figueiredo e Romel Dias, pelas valiosas contribuições ao trabalho.

À Daniane, pela contribuição na análise estatística, explicando e esclarecendo dúvidas a respeito dos testes estatísticos da pesquisa.

Ao pessoal do Laboratório de Estruturas da EESC, nas pessoas de Luiz Vareda, Jorge, Amauri, Mauri, Romeu, Fabiano e Douglas, pelo empenho na realização das concretagens e dos ensaios, além da amizade firmada.

Aos amigos do SET, os quais pretendo levar para toda a vida, por me proporcionarem momentos agradáveis e de descontração.

Ao Edmar, Lennon e Thiago, pela convivência harmoniosa na república ao longo destes dois anos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento da bolsa de pesquisa.

Aos funcionários do SET, nas pessoas de Rosi, Nadir, Clayton, Silvia, Marcela e Dani, pela assistência fornecida durante o mestrado.

À Universidade Federal do Ceará (UFC), instituição na qual me tornei engenheiro civil.

À professora Magnólia Campêlo, que despertou em mim o interesse pela área da engenharia estrutural por meio de seus ensinamentos em sala de aula.

Às empresas Grace Construction Products, Tecnosil, Belgo Bekaert Arames e

Votorantim Cimentos, pelo fornecimento de materiais utilizados no desenvolvimento da presente pesquisa.

“Quanto mais aumenta nosso conhecimento,
mais evidente fica nossa ignorância.” (John F.
Kennedy)

RESUMO

LEITE, A. M. **Avaliação do uso da macrofibra polimérica na composição de concreto para fins estruturais**. 2018. 257 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil (Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

O concreto reforçado com fibras (CRF) corresponde a um material compósito formado principalmente por cimento hidráulico, agregados miúdo e graúdo, água e fibras descontínuas. A principal finalidade do reforço no concreto com fibras é o aumento da capacidade resistente pós-fissuração do compósito, que reflete no ganho de tenacidade. Tradicionalmente, as fibras de aço, por possuírem elevadas rigidez e resistência à tração, são as mais utilizadas para o reforço do concreto, enquanto que as fibras sintéticas são adotadas para controle de fissuração por retração plástica do compósito. A macrofibra polimérica se trata de uma fibra sintética estrutural que se difundiu no mercado brasileiro nos últimos anos, possuindo pouca pesquisa a respeito de seu desempenho como elemento de reforço no concreto. Diante disto, nesta pesquisa foi avaliado o uso da macrofibra polimérica na composição de concreto para fins estruturais, sendo analisado o comportamento mecânico de duas matrizes de concreto reforçado com fibras, uma convencional e a outra de alta resistência, com diferentes teores de fibra de aço e de macrofibra polimérica. Para isto, foram determinados o abatimento e a massa específica de cada concreto no estado fresco. No estado endurecido, foram realizados ensaios de absorção de água, índice de vazios, massa específica, resistência à compressão, Barcelona, tenacidade à flexão em prismas e tenacidade à punção em placas. Nas misturas com maiores teores de fibra não foi possível se obter a trabalhabilidade desejada, mesmo com a adição de superplastificante. Em alguns concretos, a macrofibra polimérica e a fibra de aço tiveram desempenhos equivalentes com relação à absorção, índice de vazios, resistência residual no Estado Limite Último (ELU) dos prismas e tenacidade das placas. O acréscimo do teor de macrofibra polimérica provocou alterações não significativas no valor do índice de vazios, da resistência residual em prismas e da tenacidade em prismas e placas. Foi encontrado uma equivalência entre os valores de tenacidade do concreto com menor teor de fibra de aço e do concreto com maior teor de macrofibra polimérica para a maioria das misturas. A macrofibra polimérica apresentou uma eficiência menor do que a fibra de aço quando utilizada no concreto destinado a pisos industriais. Além disso, o acréscimo do teor de macrofibra polimérica provocou pequenas alterações na espessura do piso industrial.

Palavras-chave: Macrofibra polimérica. Concreto reforçado com fibras. Tenacidade. Propriedades mecânicas. Piso industrial.

ABSTRACT

LEITE, A. M. **Evaluation of the use of polymeric macrofiber in the concrete composition for structural purposes.** 2018. 257 p. Dissertation (M. Sc. in Civil Engineering (Structures)) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2018.

The fiber reinforced concrete (FRC) is a composite material mainly composed of hydraulic cement, fine and coarse aggregates, water and discontinuous fibers. The main purpose of the reinforcement in the concrete with fibers is the increase of the post-cracking resistant capacity of the composite, which reflects in the toughness gain. Traditionally, steel fibers, due to their high stiffness and tensile strength, are the most used for concrete reinforcement, while synthetic fibers are used to control the plastic shrinkage cracking of the composite. The polymeric macrofiber is a structural synthetic fiber that has spread in the Brazilian market in recent years, with few researches regarding its performance as a reinforcement element in concrete. Therefore, the use of the polymeric macrofiber in the concrete composition for structural purposes was evaluated in this study and the mechanical behavior of two fiber reinforced concrete matrices, one conventional and the other with high strength, with different contents of steel fiber and polymeric macrofiber, was analyzed. For this, the slump and the specific gravity of each concrete in the fresh state were determined. In the hardened state, water absorption, voids, specific gravity, compressive strength, Barcelona, flexural toughness in prisms and punching toughness in plates tests were performed. In the mixtures with higher fiber contents it was not possible to obtain the desired workability, even with the addition of superplasticizer. In some concretes, the polymeric macrofiber and the steel fiber had equivalent performances with respect to the absorption, voids, residual strength at Ultimate Limit State (ELU) of the beams and toughness of the plates. The increase of the polymeric macrofiber content did not cause significant changes in the value of the voids, residual strength in prisms and toughness in beams and plates. An equivalence of the toughness values of the concrete with lower content of steel fiber and the concrete with higher content of polymeric macrofiber was found for the majority of the mixtures. The polymeric macrofiber was less efficient than the steel fiber when used in concrete for industrial floors. In addition, the increase of the polymeric macrofiber content caused small changes in the thickness of the industrial floor.

Keywords: Polymeric macrofiber. Fiber reinforced concrete. Toughness. Mechanical properties. Industrial floor.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Concreto flexível reforçado com fibras sintéticas.....	26
Figura 2 – Aplicação do concreto reforçado com fibras em revestimento de túneis (a), radier (b) e pisos industriais (c)	27
Figura 3 – Distribuição das aplicações da macrofibra polimérica no mercado brasileiro em 2009	29
Figura 4 – Microfissuras na zona de transição entre agregado graúdo e matriz cimentícia.....	35
Figura 5 – Curva carga versus deslocamento de uma viga de concreto submetida à flexão....	36
Figura 6 – Fissuração do concreto submetido à compressão (a) e à tração (b).....	37
Figura 7 – (a) Chapa com defeito elíptico submetida a uma tensão uniforme; (b) Variação das tensões ao longo do eixo x em região próxima da falha para caso específico $\frac{c}{d} = 3$	37
Figura 8 – Edifícios que utilizaram o concreto de alta resistência em sua construção: <i>Burj Khalifa</i> (a) e <i>e-Tower</i> (b)	44
Figura 9 – Diagramas de tensão <i>versus</i> deformação de uma matriz de concreto e de fibras com diferentes propriedades mecânicas	46
Figura 10 – Amostras de fibras de aço (a) com extremidades ancoradas e (b) corrugadas.....	47
Figura 11 – Microfibras poliméricas (a) fibriladas e (b) monofilamentos	50
Figura 12 – Fibras de polipropileno formadas por mistura de macrofibras e microfibras	50
Figura 13 – Concentração de tensões na fissura de concreto sem fibras (a) e com fibras (b)..	53
Figura 14 – Desempenho de CRF contendo teor de fibras de aço inferior (a), superior (b) e igual (c) ao volume crítico	54
Figura 15 – Comportamento (a) <i>softening</i> e (b) <i>hardening</i> pós-fissuração do concreto reforçado com fibras	54
Figura 16 – Fibras contínuas e alinhadas ao eixo de aplicação da força P.....	55
Figura 17 – Distribuição de tensão ao longo da fibra.....	57
Figura 18 – Distribuição de tensão na fibra de acordo com seu comprimento	58
Figura 19 – Ensaio de resistência à compressão: (a) concreto de referência, (b) concreto reforçado com fibras de polipropileno e (c) concreto reforçado com fibras de aço	61
Figura 20 – Curvas carga <i>versus</i> deslocamento para um concreto convencional e para um concreto reforçado com fibras	62

Figura 21 – Instabilidade pós-fissuração em concreto reforçado com diferentes fibras.....	64
Figura 22 – Configuração do ensaio Barcelona	66
Figura 23 – Deslocamentos vertical e horizontal durante a fissuração da amostra no ensaio Barcelona.....	67
Figura 24 – Estágios do mecanismo de fratura da amostra no ensaio Barcelona	68
Figura 25 – Diagrama multilinear σ - ϵ para representação do comportamento do concreto no ensaio Barcelona	70
Figura 26 – Esquema de ensaio de tenacidade à flexão proposto pela JSCE-SF4 (JSCE, 1984)	72
Figura 27 – Tenacidade à flexão a partir da curva carga versus deslocamento	73
Figura 28 – Compósitos com fator de tenacidade semelhantes de acordo com o critério da norma JSCE-SF4 (1984)	74
Figura 29 – Distribuição de tensão e deformação na flexão para materiais elásticos e elastoplásticos	75
Figura 30 – Curva carga por deslocamento com principais parâmetros destacados.....	76
Figura 31 – Esquema do deslocamento vertical e da abertura de fissura em um ensaio de flexão em quatro pontos	78
Figura 32 – Esquema do ensaio de punção em placas proposto pela EFNARC (1996).....	83
Figura 33 – Exemplo de curva de carga por deslocamento	84
Figura 34 – Exemplo de curva de energia por deslocamento	84
Figura 35 – Componentes de um piso industrial.....	89
Figura 36 – Representação do momento resistente da placa	90
Figura 37 – Curvas carga <i>versus</i> abertura de fissura de amostras de (a) concreto reforçado com fibras de aço e (b) concreto reforçado com macrofibra polimérica	93
Figura 38 – Espessura mínima de piso de acordo com diferentes tipos de fibras e dosagens .	94
Figura 39 – Correlações entre dosagens de macrofibras poliméricas e de fibras de aço de acordo com critérios de desempenho predeterminados	95
Figura 40 – Principais atividades e ensaios do programa experimental	97
Figura 41 – Fibra de aço utilizada na pesquisa	100
Figura 42 – Macrofibra polimérica utilizada na pesquisa.....	101
Figura 43 – Misturas de concreto analisadas na pesquisa.....	103
Figura 44 – Ensaios realizados para cada mistura de concreto.....	105
Figura 45 – Testes estatísticos realizados com as diversas misturas analisadas.....	106
Figura 46 – Ensaio do abatimento do tronco de cone para o concreto CAR20PP (a) e início de	

exsudação e de segregação do concreto CAR20PP (b)	109
Figura 47 – Adensamento das placas de CAR20PP	109
Figura 48 – Formação de aglomerados de fibras de polipropileno na concretagem do concreto CAR20PP.....	110
Figura 49 – Abatimento do concreto CC10FA.....	110
Figura 50 – <i>Boxplot</i> para a resistência à compressão	116
Figura 51 – Curvas carga <i>versus</i> TCOB referentes às amostras de concreto de resistência convencional com teor de fibra de aço de (a) 0,5% e (b) 1,0%, em volume	117
Figura 52 – Curvas carga <i>versus</i> TCOB referentes às amostras de concreto de resistência convencional com teor de macrofibra polimérica de (a) 0,5% e (b) 1,0%, em volume	117
Figura 53 – Curvas carga <i>versus</i> TCOB referentes às amostras de concreto de alta resistência com teor de fibra de aço de (a) 1,0% e (b) 2,0%, em volume	118
Figura 54 – Curvas carga <i>versus</i> TCOB referentes às amostras de concreto de alta resistência com teor de macrofibra polimérica de (a) 1,0% e (b) 2,0%, em volume.....	118
Figura 55 – <i>Boxplot</i> para a resistência à tração (ensaio Barcelona)	120
Figura 56 – <i>Boxplot</i> para a tenacidade (ensaio Barcelona)	122
Figura 57 – <i>Boxplot</i> para a resistência residual no ELS (ensaio Barcelona).....	123
Figura 58 – <i>Boxplot</i> para a resistência residual no ELU (ensaio Barcelona)	125
Figura 59 – Curvas carga <i>versus</i> deslocamento vertical referentes às amostras de concreto de resistência convencional com teor de fibra de aço de (a) 0,5% e (b) 1,0%, em volume	125
Figura 60 – Curvas carga <i>versus</i> deslocamento vertical referentes às amostras de concreto de resistência convencional com teor de macrofibra polimérica de (a) 0,5% e (b) 1,0%, em volume	126
Figura 61 – Curvas carga <i>versus</i> deslocamento vertical referentes às amostras de concreto de alta resistência com teor de fibra de aço de (a) 1,0% e (b) 2,0%, em volume....	127
Figura 62 – Curvas carga <i>versus</i> deslocamento vertical referentes às amostras de concreto de alta resistência com teor de macrofibra polimérica de (a) 1,0% e (b) 2,0%, em volume	127
Figura 63 – <i>Boxplot</i> para a resistência à tração (tenacidade em prismas)	130
Figura 64 – <i>Boxplot</i> para a resistência à tração (tenacidade em prismas)	132
Figura 65 – <i>Boxplot</i> para a resistência residual no ELS (tenacidade em prismas).....	133
Figura 66 – <i>Boxplot</i> para a resistência residual no ELU (tenacidade em prismas)	135

Figura 67 – Curvas carga <i>versus</i> deslocamento central referentes às amostras de concreto de resistência convencional com teor de fibra de aço de (a) 0,5% e (b) 1,0%, em volume.....	135
Figura 68 – Curvas carga <i>versus</i> deslocamento central referentes às amostras de concreto de resistência convencional com teor de macrofibra polimérica de (a) 0,5% e (b) 1,0%, em volume.....	136
Figura 69 – Curvas carga <i>versus</i> deslocamento central referentes às amostras de concreto de alta resistência com teor de fibra de aço de (a) 1,0% e (b) 2,0%, em volume ...	137
Figura 70 – Curvas carga <i>versus</i> deslocamento central referentes às amostras de concreto de alta resistência com teor de macrofibra polimérica de (a) 1,0% e (b) 2,0%, em volume.....	137
Figura 71 – <i>Boxplot</i> para a carga máxima (tenacidade em placas).....	140
Figura 72 – <i>Boxplot</i> para a tenacidade (tenacidade em placas)	142
Figura 73 – Padrão de fissuração no corpo de prova (a) cilíndrico, (b) prismático e na (c) placa	146
Figura 74 – Corpo de prova (a) cilíndrico, (b) prismático e (c) placa após a ruptura do concreto sem fibra.....	146
Figura 75 – Padrão de fissuração dos prismas com comportamento hardening (a) e formação de múltiplas fissuras em prisma de concreto CAR20FA	148
Figura 76 – Resultados do dimensionamento do piso industrial	150

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação do concreto de acordo com a sua consistência	34
Tabela 2 – Propriedades de variados tipos de fibras	45
Tabela 3 – Limites mínimos para utilização de fibras de aço no concreto.....	48
Tabela 4 – Geometria dos diversos tipos de fibras de aço segundo a classificação da NBR 15530:2007 (ABNT, 2007a).....	48
Tabela 5 – Número de fibras na fissura, tensão última no compósito e teor crítico de fibras de acordo com a orientação das fibras.....	56
Tabela 6 – Formulário utilizado na determinação das propriedades obtidas no ensaio Barcelona	66
Tabela 7 – Correlações entre TCO _D e deslocamento axial.....	69
Tabela 8 – Equações para representação do comportamento do concreto no ensaio Barcelona	70
Tabela 9 – Velocidade de carregamento a ser aplicada de acordo com dimensões do corpo de prova	76
Tabela 10 – Modelos constitutivos europeus para representação do comportamento do CRF	80
Tabela 11 – Classificação da tenacidade do compósito	84
Tabela 12 – Valores dos parâmetros σ_2 , ϵ_2 e σ_3 para as lajes pequena, média e grande	88
Tabela 13 – Propriedades físicas e mecânicas da fibra de aço	100
Tabela 14 – Propriedades físicas e mecânicas da macrofibra polimérica	101
Tabela 15 – Consumo de materiais para o traço de concreto convencional de referência (sem fibra)	102
Tabela 16 – Consumo de materiais para o traço de concreto de alta resistência de referência (sem fibra).....	102
Tabela 17 – Detalhes dos corpos de prova de cada ensaio executado.....	104
Tabela 18 – Resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone	108
Tabela 19 – Valores de massa específica do concreto no estado fresco.....	111
Tabela 20 – Valores de absorção e índice de vazios de cada concreto	112
Tabela 21 – Valores de massa específica das amostras secas, das amostras saturadas e das amostras reais de concreto	113
Tabela 22 – Resultados do ensaio de resistência à compressão	114
Tabela 23 – Resultados do ensaio Barcelona	119
Tabela 24 – Resultados do ensaio de tenacidade em prismas	128

Tabela 25 – Resultados do ensaio de tenacidade em placas	138
Tabela 26 – Síntese dos resultados dos testes estatísticos para avaliar a influência do tipo de fibra nas diferentes propriedades dos concretos.....	143
Tabela 27 – Síntese dos resultados dos testes estatísticos para avaliar a influência do teor de fibra nas diferentes propriedades dos concretos.....	144
Tabela 28 – Síntese dos resultados dos testes estatísticos para avaliar a influência do tipo de matriz nas diferentes propriedades dos concretos	145
Tabela 29 – Comportamento dos concretos em cada tipo de ensaio	147
Tabela 30 – Resultados do dimensionamento do piso industrial	150

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
1.1 Justificativa	28
1.2 Objetivos	29
<i>1.2.1 Objetivo geral</i>	<i>29</i>
<i>1.2.2 Objetivos específicos</i>	<i>29</i>
1.3 Organização do trabalho	30
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1 Concreto	33
<i>2.1.1 Concreto convencional</i>	<i>33</i>
<i>2.1.1.1 Materiais constituintes</i>	<i>33</i>
<i>2.1.1.2 Propriedades do concreto no estado fresco</i>	<i>34</i>
<i>2.1.1.3 Propriedades do concreto no estado endurecido</i>	<i>35</i>
<i>2.1.2 Concreto de alta resistência</i>	<i>39</i>
<i>2.1.2.1 Materiais constituintes</i>	<i>40</i>
<i>2.1.2.2 Propriedades do concreto no estado fresco</i>	<i>41</i>
<i>2.1.2.3 Propriedades do concreto no estado endurecido</i>	<i>42</i>
<i>2.1.2.4 Aplicações</i>	<i>43</i>
2.2 Fibras	44
<i>2.2.1 Fibras de aço</i>	<i>46</i>
<i>2.2.2 Fibras de polipropileno</i>	<i>49</i>
2.3 Concreto reforçado com fibras: o compósito e a relação matriz-fibra	52
<i>2.3.1 Volume crítico de fibras</i>	<i>53</i>
<i>2.3.2 Comprimento crítico das fibras</i>	<i>57</i>
2.4 Propriedades do concreto reforçado com fibras	59
<i>2.4.1 Resistência à compressão</i>	<i>60</i>
<i>2.4.2 Resistência à tração</i>	<i>61</i>
<i>2.4.3 Tenacidade (resistência residual)</i>	<i>62</i>
2.5 Controle do concreto reforçado com fibras	64
<i>2.5.1 Ensaio Barcelona</i>	<i>65</i>
<i>2.5.1.1 Configurações e considerações do ensaio</i>	<i>65</i>
<i>2.5.1.2 Modelo constitutivo</i>	<i>69</i>
<i>2.5.2 Tenacidade em prismas</i>	<i>71</i>

2.5.2.1	<i>Configurações e considerações do ensaio</i>	71
2.5.2.2	<i>Modelo constitutivo</i>	79
2.5.3	Tenacidade em placas	82
2.5.3.1	<i>Configurações e considerações do ensaio</i>	82
2.5.3.1	<i>Modelo constitutivo</i>	85
2.6	Aplicação do concreto reforçado com fibras em pisos industriais	88
2.7	Estudos pertinentes	92
2.7.1	<i>Buratti, Mazzotti e Savoia (2011)</i>	92
2.7.2	<i>Soutsos, Le e Lampropoulo (2012)</i>	93
2.7.3	<i>Salvador e Figueiredo (2013)</i>	94
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	97
3.1	Materiais	97
3.1.1	<i>Cimento</i>	98
3.1.2	<i>Agregados</i>	98
3.1.2.1	<i>Agregado miúdo</i>	98
3.1.2.2	<i>Agregado graúdo</i>	98
3.1.3	<i>Sílica ativa</i>	99
3.1.4	<i>Aditivo superplastificante</i>	99
3.1.5	<i>Água de amassamento</i>	99
3.1.6	<i>Fibras</i>	99
3.1.6.1	<i>Fibra de aço</i>	99
3.1.6.2	<i>Macrofibra polimérica</i>	100
3.2	Dosagem dos concretos	101
3.3	Produção, moldagem e cura úmida das amostras	103
3.4	Métodos de ensaio	104
3.5	Critérios de análise dos resultados	106
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	107
4.1	Propriedades do concreto no estado fresco	107
4.1.1	<i>Trabalhabilidade</i>	107
4.1.2	<i>Massa específica</i>	111
4.2	Propriedades do concreto no estado endurecido	111
4.2.1	<i>Absorção de água, índice de vazios e massa específica</i>	111
4.2.2	<i>Resistência à compressão</i>	114
4.2.3	<i>Ensaio Barcelona</i>	116

4.2.4 Ensaio de tenacidade em prismas	125
4.3 Síntese dos resultados dos testes estatísticos	142
4.4 Análise comparativa entre os ensaios de tenacidade.....	146
4.5 Dimensionamento do piso industrial	149
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	153
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	157
APÊNDICE A - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	165
APÊNDICE B - AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE ENTRE O CIMENTO E O ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE.....	169
APÊNDICE C – COMPOSIÇÃO IDEAL DAS AREIAS.....	171
APÊNDICE D – PONTO DE SATURAÇÃO DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE	173
APÊNDICE E – TESTES ESTATÍSTICOS PARA ABSORÇÃO DE ÁGUA DO CONCRETO.....	175
APÊNDICE F – TESTES ESTATÍSTICOS PARA O ÍNDICE DE VAZIOS DO CONCRETO.....	181
APÊNDICE G – TESTES ESTATÍSTICOS PARA A MASSA ESPECÍFICA DA AMOSTRA SECA DE CONCRETO	185
APÊNDICE H – TESTES ESTATÍSTICOS PARA A MASSA ESPECÍFICA DA AMOSTRA SATURADA DE CONCRETO	191
APÊNDICE I – TESTES ESTATÍSTICOS PARA A MASSA ESPECÍFICA DA AMOSTRA REAL DE CONCRETO	197
APÊNDICE J – TESTES ESTATÍSTICOS PARA A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO.....	203
APÊNDICE K – CURVAS CARGA <i>VERSUS</i> T _{COD} PARA PEQUENOS VALORES DE T _{COD} (ENSAIO BARCELONA).....	209
APÊNDICE L - TESTES ESTATÍSTICOS PARA A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DO CONCRETO (ENSAIO BARCELONA).....	211
APÊNDICE M – TESTES ESTATÍSTICOS PARA A TENACIDADE DO CONCRETO (ENSAIO BARCELONA)	217
APÊNDICE N – TESTES ESTATÍSTICOS PARA A RESISTÊNCIA RESIDUAL DO CONCRETO NO ELS (ENSAIO BARCELONA)	221
APÊNDICE O – TESTES ESTATÍSTICOS PARA A RESISTÊNCIA RESIDUAL DO CONCRETO NO ELU (ENSAIO BARCELONA).....	225

APÊNDICE P – TESTES ESTATÍSTICOS PARA A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DO CONCRETO (TENACIDADE EM PRISMAS)	229
APÊNDICE Q – TESTES ESTATÍSTICOS PARA O FATOR DE TENACIDADE DO CONCRETO (TENACIDADE EM PRISMAS)	235
APÊNDICE R – TESTES ESTATÍSTICOS PARA A RESISTÊNCIA RESIDUAL NO ELS DO CONCRETO (TENACIDADE EM PRISMAS)	239
APÊNDICE S – TESTES ESTATÍSTICOS PARA A RESISTÊNCIA RESIDUAL NO ELU DO CONCRETO (TENACIDADE EM PRISMAS).....	243
APÊNDICE T – TESTES ESTATÍSTICOS PARA A CARGA MÁXIMA DO CONCRETO (TENACIDADE EM PLACAS)	247
APÊNDICE U – TESTES ESTATÍSTICOS PARA A TENACIDADE DO CONCRETO (TENACIDADE EM PLACAS)	251
APÊNDICE V – TESTES T PARA EQUIVALÊNCIA DE DESEMPENHO DAS FIBRAS QUANTO À TENACIDADE	255
APÊNDICE X – TESTES T PARA EQUIVALÊNCIA DE DESEMPENHO DAS FIBRAS QUANTO À RESISTÊNCIA RESIDUAL NO ELS.....	257

1 INTRODUÇÃO

O concreto é considerado o material de construção mais utilizado no mundo (DINIZ, 2009), sendo normalmente formado pela mistura de cimento Portland, agregados miúdo e graúdo, e água. É visível a importância deste material na vida do homem, sendo possível observar sua aplicação nas mais diversas obras de engenharia, como edifícios, pavimentos, barragens, túneis, pontes, dentre outras.

A história do concreto se inicia na Antiguidade, período em que o sistema construtivo predominante era o de alvenaria de rocha e as civilizações buscavam desenvolver um material que ligasse de modo coeso as rochas. Desta forma, surgiu primeiramente a argamassa de barro que, posteriormente, foi substituída pela argamassa de cal, considerada mais resistente e durável. Mais tarde, os romanos descobriram um novo material denominado *Opus Caementicium*, formado principalmente por uma espécie de pozolana, a qual, adicionada à argamassa de cal, resultava em um produto com propriedades semelhantes ao do cimento atual. Este material era usado para unir rochas e, desta forma, formar um composto resistente denominado *concretum* (compacto, solidificado), considerado o concreto romano, amplamente utilizado na construção de aquedutos, estradas e diversas obras públicas (CARVALHO, 2008).

O início do desenvolvimento do concreto moderno se deu com a descoberta do cimento Portland. Inicialmente, em 1758, o engenheiro inglês John Smeaton obteve, por meio da calcinação de calcário e argila, um composto mais resistente do que o calcário puro. Após avanços em pesquisas e tentativas de se obter um material com qualidade cada vez melhor, em 1824, Joseph Aspdin submeteu uma mistura de pedras calcárias e argila a altas temperaturas, formando um pó fino que, após secar, apresentava resistência, tanto mecânica quanto à ação da água, mais elevada do que os compostos cimentícios até então utilizados. A mistura foi denominada cimento Portland, devido à sua cor e às suas propriedades se assemelharem às das rochas localizadas em Portland, Inglaterra. A fabricação deste tipo de cimento no Brasil começou em 1888 com a instalação de uma usina em Sorocaba-SP, que acabou se extinguindo em 1918. Apenas em 1924 houve a instalação de uma fábrica em Perus, São Paulo, pela Companhia Brasileira de Cimento Portland, a qual pode ser considerada a indústria brasileira pioneira na produção de cimento (CARVALHO, 2008).

Desde 1758, com o ressurgimento do cimento por Smeaton, o cimento era utilizado por engenheiros na produção de argamassas e estruturas de concreto simples. Com o passar dos anos, foi observado que o material era um produto que tinha uma boa resistência à compressão e ao esmagamento, mas baixa resistência à tração e ao cisalhamento. Desta forma, as primeiras

experiências com concreto armado iniciaram em 1849, quando um agricultor francês chamado Louis Lambot desenvolveu um barco com um sistema constituído por cimento e barras de aço (CARVALHO, 2008). A partir dos resultados obtidos por Lambot, vários pesquisadores buscaram compreender melhor o comportamento dos dois materiais trabalhando em conjunto: o concreto, resistindo às tensões de compressão, e o aço, suportando as tensões de tração.

Com o avanço das pesquisas, o concreto armado se tornou uma técnica convencional amplamente utilizada na prática das construções. A adição de armadura de aço promove nos elementos estruturais de concreto um aumento da resistência à tração e da ductilidade, propriedades que também podem ser melhoradas com a adição de fibras ao concreto, alternativa que surgiu posteriormente para substituir total ou parcialmente a armadura usual do concreto armado em algumas aplicações específicas.

Segundo Grossi (2006), uma patente sobre concreto com fibras propondo a adição de rejeitos de ferro para gerar uma pedra artificial foi registrada por Berard, na Califórnia, em 1874. Em 1898, Hatscheck incorporou fibras de amianto em pastas de cimento, resultando em um dos primeiros materiais com fibras desenvolvido para a construção civil e largamente empregado na fabricação de telhas, tubos e caixas d'água.

A utilização de fibras no concreto começou em 1911, quando Graham propôs a adição de fibras ao concreto armado com a finalidade de aumentar sua resistência mecânica. No entanto, apenas na década de 1960 ocorreram maiores avanços nas pesquisas sobre o concreto reforçado com fibras e variados tipos de fibras surgiram no mercado, expandindo as aplicações práticas do material (MEDEIROS, 2012). A Figura 1 mostra um concreto flexível desenvolvido na Universidade de Michigan, Estados Unidos, no qual foi adotado reforço com fibras sintéticas.

Figura 1 – Concreto flexível reforçado com fibras sintéticas

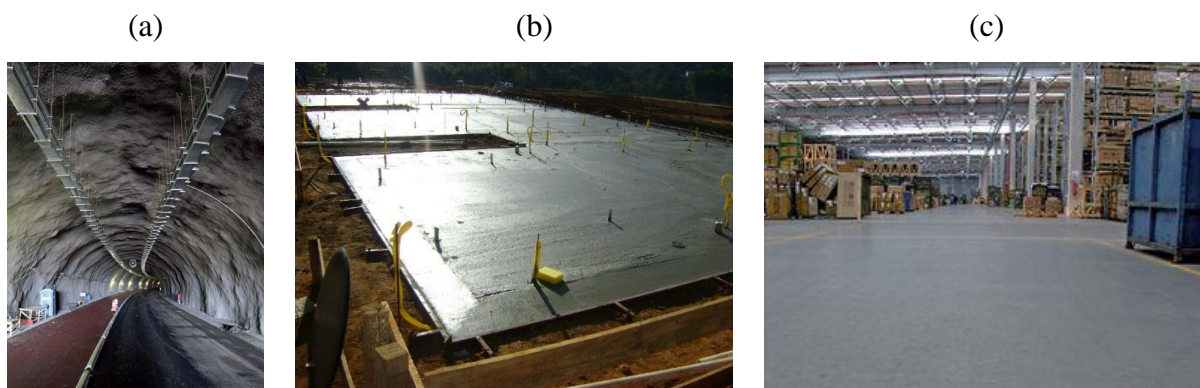


Fonte: Inovação Tecnológica (2009).

A primeira aplicação estrutural do concreto reforçado com fibras ocorreu em 1971, na fabricação de painéis desmontáveis destinados a um estacionamento do aeroporto de Heathrow, em Londres, com a utilização de um concreto com teor de 3% de fibras de aço em massa. Ainda em 1971, foram realizados ensaios em lajes de pistas de concreto reforçado com fibras em Vicksburg, Mississippi. Foi observado que as lajes de concreto reforçado com fibras de 15 cm de espessura apresentaram melhor desempenho em relação às lajes de concreto simples de 25 cm de espessura, suportando um número maior de carregamentos até a abertura da primeira fissura (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Desde então, vem aumentando a quantidade de obras que utilizam o concreto reforçado com fibras.

Hoje em dia o concreto reforçado com fibras possui diversas aplicações: revestimento de túneis (Figura 2(a)), fundação rasa (RADIER) (Figura 2(b)), pisos industriais (Figura 2(c)), elementos pré-moldados, estruturas submetidas a esforços sísmicos, dentre outras. As fibras melhoram a distribuição das fissuras e limitam as aberturas destas no Estado Limite de Serviço, reduzindo a exposição do concreto ao ambiente (DI PRISCO; PLIZZARI; VANDEWALLE, 2009).

Figura 2 – Aplicação do concreto reforçado com fibras em revestimento de túneis (a), radier (b) e pisos industriais (c)



Fonte: Nakamura (2013).

Fonte: Matcon Supply (2017).

Fonte: Bergamo (2012).

O reforço com fibras é apropriado para estruturas com alta capacidade de distribuição de tensões. No caso de estruturas com tensões localizadas e com tensões dispersas, podem ser utilizados simultaneamente reforços locais com barras de aço e fibras dispostas aleatoriamente no concreto (DI PRISCO; PLIZZARI; VANDEWALLE, 2009).

Atualmente são comercializadas fibras de diversos materiais: aço, polímero, vidro etc. Algumas propriedades das fibras, como a resistência mecânica e o módulo de elasticidade, definem sua função de desempenho no concreto. Geralmente, as fibras de alto módulo de

elasticidade e com resistência à tração superior à da matriz cimentícia, como as fibras de aço, atuam como reforço estrutural, enquanto as fibras de menor módulo de elasticidade, como as de polipropileno, agem no controle da propagação de fissuras decorrentes da retração plástica.

A macrofibra polimérica surgiu no mercado com a finalidade de atuar como reforço primário do concreto, possuindo função similar às fibras de aço. No entanto, seu uso ainda é restrito por haver poucos estudos envolvendo sua aplicação no concreto, sendo mais difundida, neste caso, a utilização das fibras de aço.

1.1 Justificativa

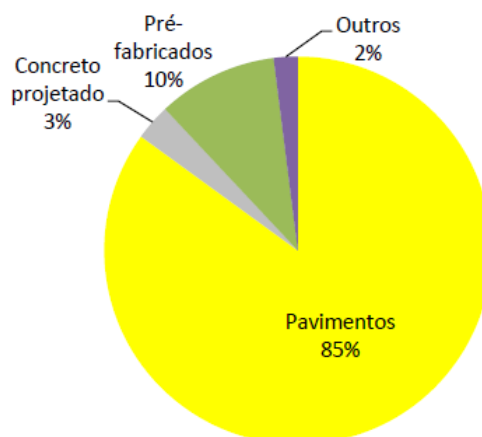
As fibras constituem uma nova alternativa ao emprego da armadura convencional em estruturas de concreto, a qual é localizada e requer prévia montagem. Com as fibras adicionadas diretamente ao concreto e dispostas aleatoriamente, o CRF necessita de menor tempo de execução e reduzida mão-de-obra quando comparado ao concreto tradicional. Além disso, as fibras podem ser armazenadas em tanques, requerendo uma menor área de armazenamento se comparadas às barras de aço (DI PRISCO; PLIZZARI; VANDEWALLE, 2009).

Segundo Salvador e Figueiredo (2013), vários estudos já foram realizados a respeito do comportamento de fibras de aço e sua atuação como reforço primário do concreto, cujas propriedades são afetadas pelo tipo de fibra adicionada e seu teor volumétrico em relação ao concreto. Já os estudos envolvendo a macrofibra polimérica como reforço primário do concreto são mais escassos, visto que a maioria dos trabalhos neste ramo incluem as fibras sintéticas como reforço secundário, atuando no controle da fissuração por retração plástica no concreto. Quando comparados os dois tipos de fibra, as fibras de aço possuem a desvantagem da susceptibilidade à corrosão quando há redução do pH do concreto em ambientes agressivos, o que pode prejudicar a durabilidade da estrutura, e também afetam mais a trabalhabilidade do concreto, devido à sua maior rigidez (FIGUEIREDO, 2010).

O concreto reforçado com fibras tem sido utilizado gradativamente em diversos tipos de obras. As macrofibras poliméricas são aplicadas, principalmente, em pavimentos e pisos industriais de concreto, conforme ilustrado na Figura 3. A partir da análise de diferentes dosagens de fibras, é verificado o desempenho da placa para resistir aos esforços mecânicos e, com isso, determinado o teor de fibras adequado para esta finalidade. A distribuição homogênea das fibras melhora o desempenho do pavimento frente às solicitações dinâmicas do trânsito, aumentando sua vida útil para um determinado nível de tráfego (BARREDA; IAIANI; SOTA,

2000). O processo executivo dos pisos industriais com CRF é semelhante a execução dos pisos convencionais, com lançamento, adensamento e acabamento da superfície realizados normalmente.

Figura 3 – Distribuição das aplicações da macrofibra polimérica no mercado brasileiro em 2009



Fonte: Figueiredo (2011).

Somando-se aos fatos já apresentados, a macrofibra polimérica começou a ser comercializada recentemente no Brasil e ainda não há uma norma brasileira contemplando sua especificação para reforço estrutural do concreto. Desta forma, a presente pesquisa visa contribuir para um melhor entendimento do assunto por parte dos engenheiros, principalmente quando da sua aplicação em pisos industriais, foco deste trabalho.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Diante do pequeno número de pesquisas a respeito do desempenho da macrofibra polimérica no concreto, o objetivo geral da presente pesquisa é avaliar o uso da macrofibra polimérica na composição de concreto para fins estruturais.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analisar o desempenho das macrofibras poliméricas como reforço em matrizes

de concreto convencional e de alta resistência, e comparar com o desempenho de concretos semelhantes, porém reforçados com fibras de aço;

➤ Verificar o impacto da adição de macrofibras poliméricas nas propriedades do concreto no estado fresco;

➤ Verificar a influência do teor de fibras nas propriedades mecânicas do concreto no estado endurecido;

➤ Avaliar o comportamento dos concretos quanto à tenacidade, determinada pelos ensaios Barcelona, flexão em prismas e punção de placa;

➤ Avaliar o desempenho das macrofibras poliméricas no dimensionamento de pisos industriais de concreto pelo critério da tenacidade.

1.3 Organização do trabalho

O capítulo 1 corresponde à introdução do trabalho, no qual é apresentada uma breve história da origem do concreto simples e do concreto reforçado com fibra. Também se encontram neste capítulo a justificativa e os objetivos geral e específicos da pesquisa.

Após a introdução, inicia-se o capítulo 2, referente à revisão bibliográfica, contendo as principais propriedades dos materiais utilizados na pesquisa. Além disso, também é apresentada a relação entre as fibras e a matriz cimentícia, as principais propriedades avaliadas no concreto reforçado com fibras e como é feito o controle tecnológico deste tipo de material. Por fim, são dispostos aspectos sobre a aplicação do concreto reforçado com fibras em pisos industriais e estudos pertinentes, envolvendo fibras de aço e macrofibras poliméricas.

No capítulo 3, correspondente ao programa experimental, há a caracterização dos materiais utilizados na produção dos concretos, assim como detalhes da dosagem dos concretos e da produção, da moldagem e da cura úmida das amostras. Neste capítulo também são estabelecidos alguns parâmetros de ensaio, como velocidade de aplicação da carga e máquinas utilizadas nos ensaios.

O capítulo 4 contém os resultados obtidos e as respectivas análises e discussões. Os resultados incluem propriedades do concreto no estado fresco, como trabalhabilidade e massa específica; propriedades do concreto no estado endurecido, referentes aos ensaios de absorção, índice de vazios, massa específica, resistência à compressão, ensaio Barcelona, tenacidade em prismas e tenacidade em placas; e, por último, o dimensionamento do piso industrial.

No capítulo 5 estão dispostas as principais conclusões obtidas na pesquisa. Para finalizar, são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

Na sequência são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas no trabalho. Em seguida, estão dispostos os apêndices, contendo tabelas e gráficos auxiliares.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Concreto

Considerado um material compósito, o concreto é constituído por uma matriz cimentícia (cerâmica) reforçada com agregados (partículas grandes) (CALLISTER, 2008). Dependendo da aplicação a qual se destina, o concreto deve apresentar propriedades singulares, sendo necessário que algumas de suas deficiências sejam superadas. Tais concretos são denominados concretos especiais.

O concreto de alta resistência e o concreto reforçado com fibras são alguns exemplos de concretos especiais. O concreto de alta resistência é marcado por apresentar resistência à compressão superior à do concreto convencional, enquanto que o concreto reforçado com fibras é caracterizado por oferecer resistência residual pós-fissuração da matriz.

2.1.1 Concreto convencional

A NBR 8953:2015 (ABNT, 2015a), o *fib Model Code 2010* (FIB, 2010) e o EHE-08 (MFE, 2010) consideram concreto estrutural convencional aquele cuja resistência característica à compressão, aos 28 dias, está entre 20 MPa e 50 MPa. Já para o ACI 363R-92 (ACI, 1997), um concreto com resistência característica à compressão de até 55 MPa é classificado como de resistência convencional.

2.1.1.1 Materiais constituintes

Os principais componentes utilizados na produção do concreto convencional são cimento Portland, água e agregados graúdo e miúdo. Em alguns casos é necessário a adição de aditivo plastificante ou superplastificante para se obter a trabalhabilidade desejada para a mistura.

O cimento consiste em um material finamente pulverizado, capaz de manifestar propriedade aglomerante por meio das reações de hidratação quando em contato com a água. O cimento hidráulico é caracterizado por apresentar produtos da hidratação estáveis em ambientes úmidos, sendo o cimento Portland o cimento hidráulico mais usualmente utilizado na produção de concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O agregado é um material granular oriundo da britagem ou da desagregação natural

da rocha, correspondente a cerca de 60% a 80% do volume do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A NBR 7211:2009 (ABNT, 2009a) classifica o agregado cujas partículas são maiores do que 4,75 mm e menores do que 75 mm como agregado graúdo, enquanto que o agregado com partículas maiores do que 75 μ m e menores do que 4,75 mm é denominado agregado miúdo.

A água é o componente que vai reagir com o cimento, interferindo nas propriedades de resistência e durabilidade da mistura. Desta forma, é importante que a água utilizada na produção do concreto esteja respeitando os limites máximos de impurezas, como matéria orgânica, resíduos sólidos, cloretos, sulfatos, entre outros.

2.1.1.2 Propriedades do concreto no estado fresco

Uma das principais propriedades analisadas do concreto convencional no estado fresco é a trabalhabilidade, a qual está relacionada com a capacidade de manipular a mistura sem perda da homogeneidade. Dois aspectos são considerados na avaliação da trabalhabilidade do concreto: consistência e coesão (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A consistência está relacionada à facilidade de o concreto escoar ou fluir. O ensaio convencionalmente realizado para analisar este aspecto é o abatimento de tronco de cone. Já a coesão corresponde tanto à tendência de reter água (resistência à exsudação) quanto à tendência de reter os agregados graúdos na argamassa fresca (resistência à segregação) (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

No ensaio de abatimento de tronco de cone, a diferença entre a altura do tronco de cone e a altura da amostra após a retirada do molde é denominada abatimento ou *slump* do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A NBR 8953:2015 (ABNT, 2015a) apresenta algumas aplicações típicas do concreto de acordo com a sua consistência, conforme exibido na Tabela 1.

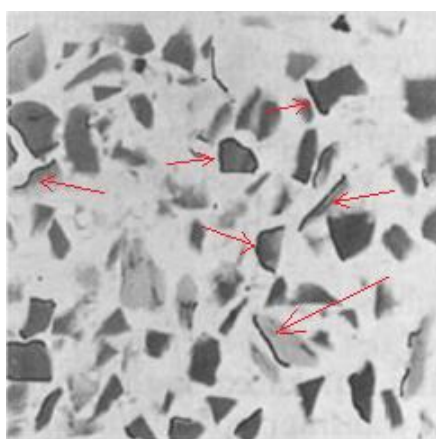
Tabela 1 – Classificação do concreto de acordo com a sua consistência

Classe	Abatimento (mm)	Aplicações típicas
S10	10 < A < 50	Concreto extrusado, vibroprensado ou centrifugado
S50	50 < A < 100	Alguns tipos de pavimentos e de elementos de fundações
S100	100 < A < 160	Elementos estruturais, com lançamento convencional do concreto
S160	160 < A < 220	Elementos estruturais com lançamento bombeado do concreto
S220	> 220	Elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armaduras

Fonte: NBR 8953: 2015 (ABNT, 2015a).

Mesmo antes de estar submetido a qualquer carregamento, o concreto pode apresentar microfissuras na zona de transição da interface entre agregado graúdo e matriz, considerada a parcela mais fraca do material, conforme ilustrado na Figura 4 (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Estas microfissuras surgem devido à diferença de comportamento entre as duas fases, matriz e agregado graúdo, decorrente dos diferentes coeficientes de dilatação das fases. Além disso, a perda de água por evaporação pode contribuir para este estado de fissuração, visto que provoca retração plástica, no estado fresco, e retração por secagem da matriz, no estado endurecido, que são restringidas pelos agregados, cuja rigidez é mais elevada (SALVADOR, 2013). A magnitude desta retração depende de fatores externos, como a temperatura e umidade, velocidade do vento, área exposta do elemento; e do consumo de materiais utilizados na mistura, como água, cimento e agregados graúdos e miúdos (MENDOZA; AIRE; DÁVILA, 2011).

Figura 4 – Microfissuras na zona de transição entre agregado graúdo e matriz cimentícia



Fonte: Adaptado de Ngab, Slate e Nilson¹ (1981 *apud* MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.1.1.3 Propriedades do concreto no estado endurecido

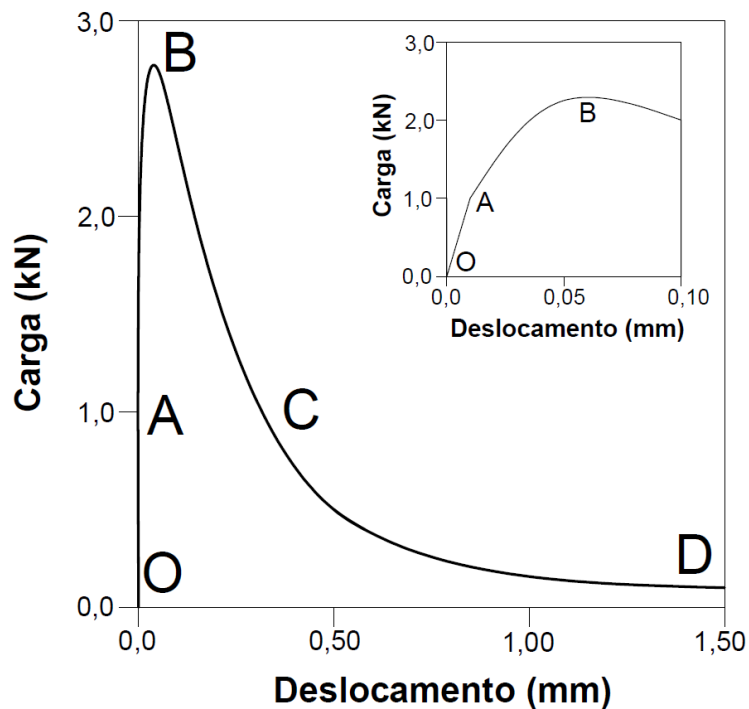
Alta resistência à compressão, elevada resistência à ação da água e ao fogo, consistência plástica no estado fresco, aliadas ao baixo custo, são algumas das propriedades que contribuem para que haja um elevado consumo de concreto mundialmente. Apesar disso, o concreto simples possui comportamento frágil, sofrendo ruptura com pequenas deformações.

Na Figura 5 é apresentada uma curva característica de carga *versus* deslocamento de um prisma de concreto submetido à flexão. Até o valor de 30% da carga máxima, é observado

¹ NGAB, A.J.; SLATE, F.O.; NILSON, A.M. Shrinkage and Creep of High Strength Concrete, **ACI Journal Proceedings**, Farmington Hills, v. 78, n.4, p. 255-261, jul./ago. 1981.

um comportamento linear do concreto (trecho OA). Com o aumento da carga, microfissuras começam a se desenvolver no interior do concreto, reduzindo sua rigidez e caracterizando um comportamento não-linear do material (trecho AB). No instante em que o concreto atinge sua carga máxima, microfissuras são formadas e ocorre um declínio da carga resistida com o aumento do deslocamento (trecho BC). Por fim, resta apenas o efeito do atrito e do trabalho dos agregados (trecho CD) (MALATESTA; CONTRERAS, 2009).

Figura 5 – Curva carga versus deslocamento de uma viga de concreto submetida à flexão

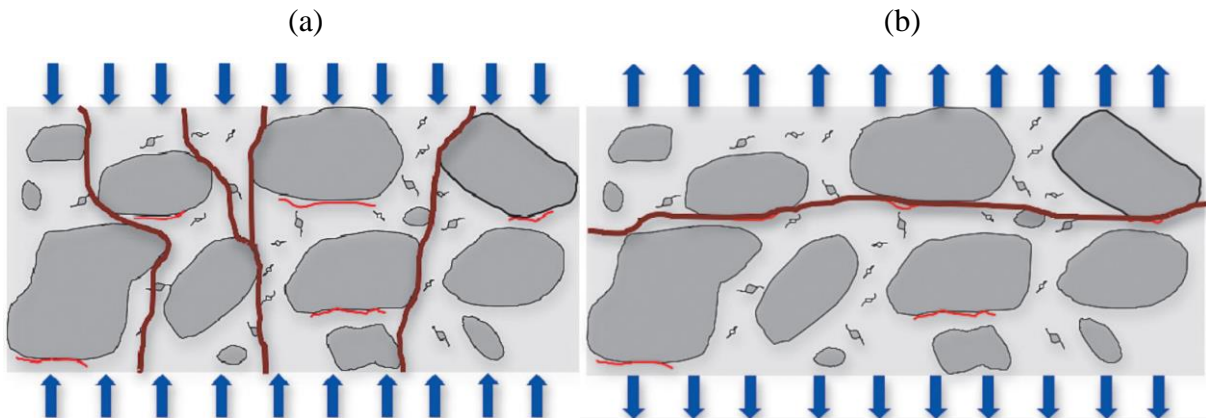


Fonte: Adaptado de Malatesta e Contreras (2009).

Quando solicitado, o concreto começa a apresentar concentração de tensão nos poros e na zona de transição entre a matriz e o agregado. No caso de esforços de compressão, o concreto consegue absorver uma quantidade de energia considerável até que haja a formação e a propagação de fissuras, ocasionando a ruptura (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a baixa capacidade de resistência à tração do concreto está relacionada à facilidade que o material possui de permitir a propagação de fissuras quando exposto a este tipo de sollicitação, principalmente na zona de transição. A existência de qualquer falha no material contribui para que haja enfraquecimento localizado, comprometendo a resistência à tração (HANAI, 2005). Na Figura 6 é ilustrada a fissuração do concreto quando submetido aos esforços de compressão (a) e aos esforços de tração (b).

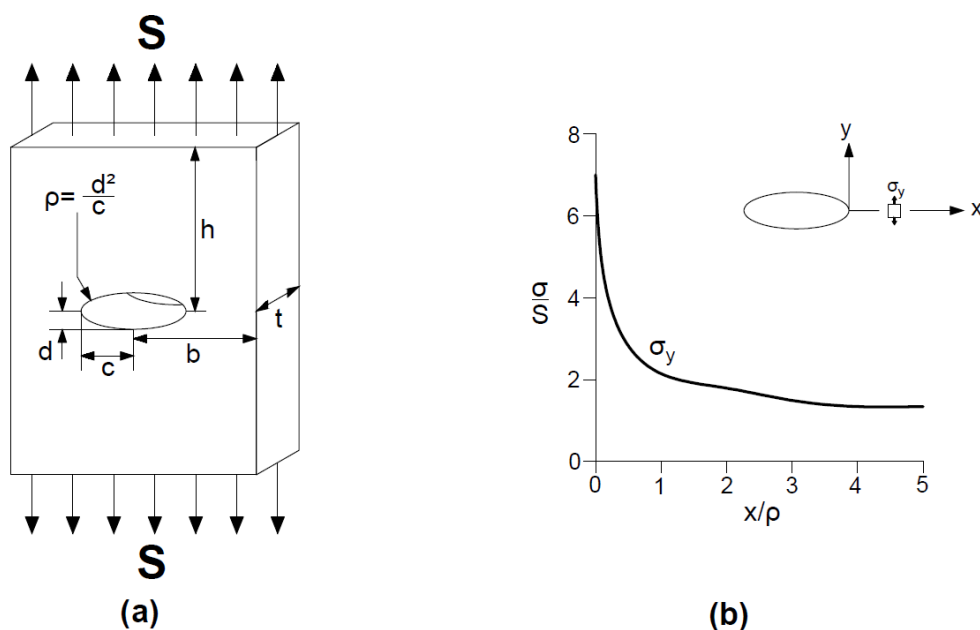
Figura 6 – Fissuração do concreto submetido à compressão (a) e à tração (b)



Fonte: Hanai (2005).

Com o aumento da fissuração ocorre uma redução na área disponível para resistir a carga, provocando um acréscimo das tensões presentes nas bordas da fissura (FIGUEIREDO, 2000). Desta forma, há uma perturbação na distribuição de tensões ao longo da seção, surgindo pontos onde há concentração de tensão, conforme ilustrado na Figura 7. Este comportamento pode ser melhor analisado pelos princípios da mecânica da fratura, sendo possível estimar a tensão máxima atuante na extremidade da fissura.

Figura 7 – (a) Chapa com defeito elíptico submetida a uma tensão uniforme; (b) Variação das tensões ao longo do eixo x em região próxima da falha para caso específico $\frac{c}{d} = 3$



Fonte: Adaptado de Dowling (2006).

De acordo com a Figura 7(b), à medida que se afasta da extremidade da falha há uma redução da magnitude da tensão, cujo valor se iguala ao da tensão aplicada (S) para posições mais distantes. Segundo Dowling (2006), caso se considere que a fissura possa ser representada por um defeito elíptico localizado em uma chapa e perpendicular à direção da sollicitação, o valor da tensão na extremidade da fissura pode ser aproximado pela Equação 1.

$$\sigma_y = S(1 + 2\frac{c}{d}) = S(1 + 2\sqrt{\frac{c}{\rho}}) \quad (1)$$

Onde:

σ_y = tensão na extremidade da fissura;

S = tensão de tração aplicada na chapa;

c = metade do comprimento da fissura interna;

d = metade da largura da fissura interna;

ρ = raio de curvatura da extremidade da fissura.

Fissuras com grandes comprimentos e pequenos raios de curvatura devem apresentar uma maior tensão localizada em sua extremidade, já que o fator $\frac{c}{\rho}$ fica intensificado. A avaliação desse efeito de concentração de tensões é importante na verificação dos modos de falha, já que a maioria das peças estruturais está submetida a esse fenômeno, seja por alteração da sua geometria, mudança de propriedades elásticas ou aplicação de cargas concentradas (ROSA, 2002).

O fator de concentração de tensões, que relaciona a tensão máxima na extremidade da fissura e a tensão aplicada, é dado pela Equação 2.

$$k_t = \frac{\sigma_y}{S} \quad (2)$$

Onde:

k_t = fator de concentração de tensões.

De acordo com a teoria de Griffith, de 1920, a propagação de uma trinca acontece quando há uma redução da energia potencial maior do que a energia necessária para a formação

de novas superfícies. A tensão crítica relacionada ao desenvolvimento de uma falha em um material, segundo esta teoria, é dada pela Equação 3.

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi c}} \quad (3)$$

Onde:

σ_c = tensão crítica;

E = módulo de elasticidade;

γ_s = energia de superfície específica.

Quanto maior for o comprimento da fissura interna, menor será a tensão crítica de sua propagação. Por possuir uma menor superfície de ruptura, a energia relacionada à ruína por tração é inferior à energia ligada à ruptura por compressão (FIGUEIREDO, 2011).

Além da resistência à compressão e da resistência à tração, outra propriedade relevante do concreto no estado endurecido é o módulo de elasticidade, relacionado à declividade da curva tensão-deformação. Uma vez que os agregados atuam restringindo a deformação da matriz, a utilização de agregados mais rígidos contribui para a produção de um concreto com maior módulo de elasticidade. É importante destacar que a porosidade da matriz cimentícia, as características da zona de transição e os parâmetros de ensaio também influenciam no valor do módulo de elasticidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.1.2 Concreto de alta resistência

O concreto de alta resistência é caracterizado por possuir resistência mecânica superior ao concreto convencional. Como o desenvolvimento de novas tecnologias de concreto é um processo contínuo, o conceito de concreto de alta resistência vem passando por algumas mudanças no decorrer do tempo. Na década de 1950, um concreto com f_{ck} de 34 MPa era considerado de alta resistência. Em 1960, começaram a ser comercializados concretos com f_{ck} de 41 MPa e 52 MPa e, na década de 1970, concretos com resistência de 62 MPa já estavam sendo produzidos. Nos últimos anos, concretos com resistência de 132 MPa já são utilizados na construção de edifícios (ACI, 1997).

Atualmente, a NBR 8953:2015 (ABNT, 2015a), o *fib Model Code 2010* (FIB, 2010)

e o EHE-08 (MFE, 2010) estabelecem que o concreto de alta de resistência é aquele cuja resistência característica à compressão é superior a 50 MPa, enquanto que a norma ACI 363R-92 (ACI, 1997) considera um f_{ck} mínimo de 55 MPa para que o concreto seja considerado de alta resistência.

2.1.2.1 Materiais constituintes

O concreto de alta resistência possui propriedades diferentes do concreto convencional, sendo considerado um material não isotrópico, no qual os agregados e a pasta de cimento podem possuir propriedades mecânicas distintas. Além do cimento, dos agregados e da água, outros materiais são utilizados na produção do concreto de alta resistência. A introdução de alguns componentes diferentes dos convencionais, como aditivos químicos, adições minerais e fibras, aliada à utilização de procedimentos de execução diferenciados, como a cura térmica, possibilitam a produção de concretos capazes de suportar solicitações mais elevadas, que podem ser utilizados na execução de estruturas mais esbeltas. Além disso, estruturas que empregam este concreto geralmente apresentam maior durabilidade e maior segurança ao usuário (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

O princípio básico para se alcançar elevadas resistências consiste na redução da porosidade do concreto, alterando a estrutura dos poros. Para isto, são adotadas algumas medidas, como redução da relação água/aglomerante, otimização da granulometria dos agregados e utilização de adições minerais. Todas estas ações contribuem para a formação de poros de menor tamanho e com uma limitada interconexão entre estes (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

A adição mineral é um material silicoso fino, utilizado na produção do concreto em adição ou em substituição ao cimento Portland em diferentes teores. Geralmente, as adições minerais são classificadas em material pozolânico, material cimentante ou fíler. O material pozolânico necessita reagir com o hidróxido de cálcio para adquirir propriedade cimentícia, enquanto o material cimentante é capaz de formar produtos cimentantes sem consumir hidróxido de cálcio do concreto. O fíler não possui atividade química, agindo apenas por efeito físico. Além da sustentabilidade, a utilização de adições minerais diminui tanto a porosidade do concreto, melhorando a qualidade da pasta de cimento hidratada e da zona de transição, quanto o calor de hidratação, reduzindo o surgimento de fissuras de origem térmica (DAL MOLIN, 2011).

A sílica ativa constitui um resíduo do procedimento de obtenção do ferro-silício e

do silício-metálico, sendo um dos materiais pozolânicos mais utilizados na produção de concreto de alto desempenho. A reação química (reação pozolânica) envolvendo a sílica ativa e o hidróxido de cálcio é rápida, provocando uma redução da porosidade e um aumento da resistência mecânica do concreto nas primeiras idades (DAL MOLIN, 2011). O efeito físico promovido pela sílica está relacionado ao maior empacotamento de partículas e à redução de água livre na zona na interface entre agregado graúdo e pasta, o que contribui para o aumento da resistência mecânica do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Para produzir concretos de alta resistência, é necessário utilizar uma baixa relação água/aglomerante, geralmente menor do que 0,40, sem afetar a trabalhabilidade da mistura. Isso é possível com o uso de aditivos químicos plastificantes e/ou superplastificantes (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Os aditivos químicos são produtos adicionados à mistura cimentícia com a finalidade de melhorar uma ou mais de suas propriedades. Dependendo de sua função, os aditivos podem ser redutores de água (plastificantes ou superplastificantes), incorporadores de ar, retardadores de pega, inibidores de corrosão, dentre outros. A principal função dos aditivos plastificantes e superplastificantes é promover a dispersão dos grãos de cimento durante a hidratação, permitindo a liberação da água contida entre as partículas cimentícias e melhorando, desta forma, a fluidez da mistura (HARTMANN *et al.*, 2011). Os superplastificantes são considerados plastificantes de alta eficiência, sendo capazes de reduzir em até quatro vezes a quantidade de água de certo concreto comparado aos aditivos redutores de água comuns (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.1.2.2 Propriedades do concreto no estado fresco

Além da trabalhabilidade, outras propriedades do concreto de alta resistência no estado fresco que são diferentes do concreto convencional são o calor de hidratação e as retrações autógena e hidráulica.

Devido à utilização de uma baixa relação água/aglomerante, a mistura do concreto de alta resistência geralmente fica seca. No entanto, com a adição de aditivo plastificante e/ou superplastificante é possível se alcançar uma trabalhabilidade adequada, melhorando o processo de moldagem e a qualidade do concreto produzido.

De acordo com Aitcin (2008), o concreto de alta resistência não necessariamente apresenta maior calor de hidratação do que o concreto convencional. Isto porque o calor de hidratação está relacionado à taxa de hidratação do cimento e não à quantidade de cimento total

utilizada na mistura. Apesar do concreto de alta resistência possuir uma maior quantidade de cimento por metro cúbico de concreto produzido, pode acontecer que nem todo o cimento da mistura seja hidratado e, com isso, produza calor.

A retração autógena ocorre quando a água existente nos poros do concreto é expelida e, caso não haja uma reposição da água mediante cura na mesma velocidade da perda de água no concreto, inicia-se o fenômeno de autossecação. Neste processo, a água permanece no interior do concreto, reage com partículas de cimento e ocasiona o dessecamento dos poros internos. O concreto de alta resistência geralmente apresenta retração autógena superior ao concreto convencional, já que sua matriz é mais densa, o que retarda a entrada de água. No entanto, a retração hidráulica total tende a ser maior no concreto convencional, já que este possui uma maior quantidade de água, muitas vezes superior à quantidade necessária para a hidratação do cimento (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

2.1.2.3 Propriedades do concreto no estado endurecido

Como já mencionado anteriormente, o concreto de alta resistência possui uma resistência à compressão superior ao concreto convencional. As diversas propriedades do concreto de alta resistência, como resistência à compressão e durabilidade, são definidas não só em função das reações de hidratação do cimento, mas também pelas reações pozolânicas e pelo efeito físico das adições minerais incorporadas à mistura (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), a relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão depende das propriedades da matriz cimentícia e da zona de transição entre agregado e matriz. No geral, à medida que a resistência à compressão aumenta, a relação resistência à tração/resistência à compressão diminui. Enquanto que para concretos de baixa resistência esta relação fica em torno de 10% a 11%, em concretos de alta resistência fica próximo de 7%. É possível se alcançar maiores valores de resistência à tração com a melhoria das propriedades da zona de transição, ocasionada por meio de reações químicas envolvendo os produtos de hidratação na zona de transição (hidróxido de cálcio) e as adições pozolânicas.

A redução da porosidade do concreto, além de contribuir para o aumento da resistência à compressão, também deve provocar um acréscimo do módulo de elasticidade, tornando o material mais frágil. Depois da relação água/aglomerante, a resistência do agregado gráúdo é o parâmetro que exerce maior influência no valor do módulo de elasticidade, visto que os agregados podem se tornar o elo fraco em concretos com elevada resistência (TUTIKIAN;

ISAIA; HELENE, 2011).

Quando submetido a altas temperaturas, o concreto de alta resistência pode apresentar um comportamento explosivo, conhecido por *spalling*. Devido a um maior refinamento dos poros, há uma maior dificuldade de eliminação da pressão de vapor formada no interior do concreto em uma situação de incêndio, ocasionando deslocamentos explosivos (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

2.1.2.4 Aplicações

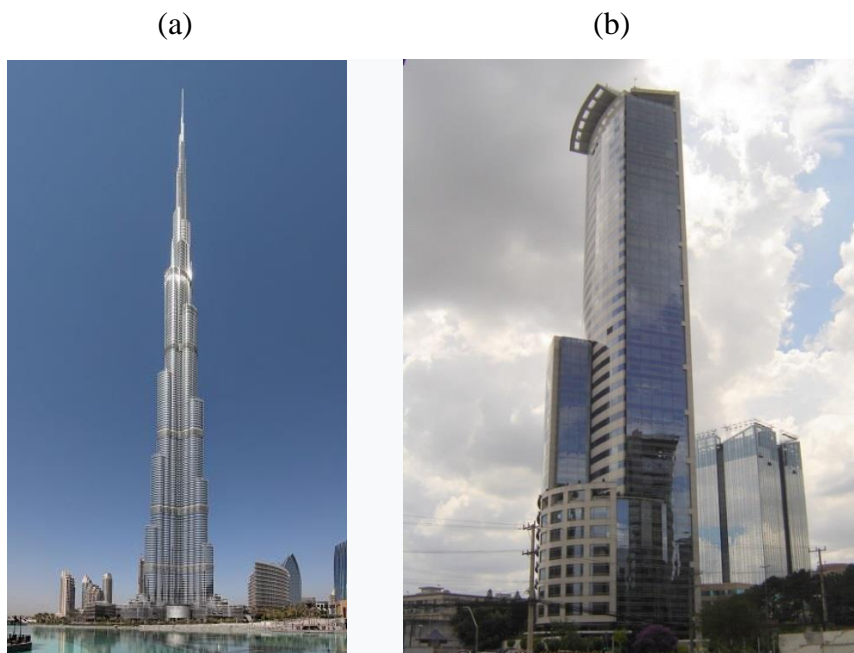
Os edifícios foram os primeiros tipos de obras a empregar o concreto de alta resistência, devido à maior facilidade da aplicação deste material neste tipo de obra e pela busca de se construir edifícios cada vez mais altos (arranha-céus) (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011). Nas primeiras idades, o concreto de alta resistência já apresenta resistência considerável, gerando uma alta velocidade de construção, vantagem que o torna competitivo frente ao aço, e sendo utilizado em elementos de concreto pré-moldado (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Na construção do edifício mais alto do mundo, *Burj Khalifa* (Figura 8(a)), em Dubai, de 828 m de altura e com 160 pavimentos, foi utilizado um concreto autoadensável e de alta resistência. Os elementos verticais possuíam concretos classe C80 e C60, aos 56 dias de idade. Já as lajes possuíam concreto C50, aos 28 dias (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

No Brasil, as cidades que mais utilizam a tecnologia do concreto de alta resistência são Goiânia, São Paulo, Curitiba e Salvador. A obra que utilizou o concreto com maior f_{ck} até o momento, no Brasil, foi o edifício *e-Tower* (Figura 8(b)), em São Paulo, com altura de 162 m e uma área construída de 52000 m². Foi utilizado um concreto com f_{ck} médio aos 28 dias de 125 MPa na concretagem dos pilares do subsolo, de modo a obter uma maior área disponível no estacionamento (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Além de edifícios, obras de infraestrutura também já estão utilizando o concreto de alta resistência, reduzindo a espessura dos elementos estruturais e, conseqüentemente, o volume de concreto e o peso próprio total da estrutura. Na construção da Ponte Stichtse, localizada perto de Amsterdam, Holanda, foi utilizado um concreto C85, o que gerou uma redução de 30% do volume de concreto da obra (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Figura 8 – Edifícios que utilizaram o concreto de alta resistência em sua construção: *Burj Khalifa* (a) e *e-Tower* (b)



Fonte: Wikipedia (2017)

Fonte: Wikipedia (2017)

2.2 Fibras

As fibras são elementos descontínuos que podem possuir tamanhos e formatos variados, e serem produzidas a partir de diversos materiais, como aço, polímero e vidro. Uma grande variedade de fibras com diferentes propriedades mecânicas, físicas e químicas tem sido utilizadas como reforço de matrizes cimentícias (BENTUR; MINDESS, 2007). A Tabela 2 contém algumas propriedades de diversos tipos de fibras.

Algumas fibras possuem a forma de monofilamentos soltos, enquanto outras possuem formato fibrilar, formado por um feixe de filamentos. Há dois modos de incorporação das fibras na matriz de concreto: reforço contínuo, com fibras longas inseridas na matriz por meio de técnicas como enrolamento filamentar ou aplicação de camadas de manta de fibra; e fibras curtas discretas, geralmente com comprimentos menores do que 5 cm e introduzidas no concreto por pulverização ou mistura (BENTUR; MINDESS, 2007).

Dependendo da relação entre os módulos de elasticidade da fibra e da matriz cimentícia, as fibras podem ser classificadas como de alto módulo ou de baixo módulo. As fibras de alto módulo são as que possuem módulo de elasticidade maior do que o da matriz na qual estão inseridas, enquanto que as fibras de baixo módulo apresentam módulo de elasticidade menor do que a matriz.

Tabela 2 – Propriedades de variados tipos de fibras

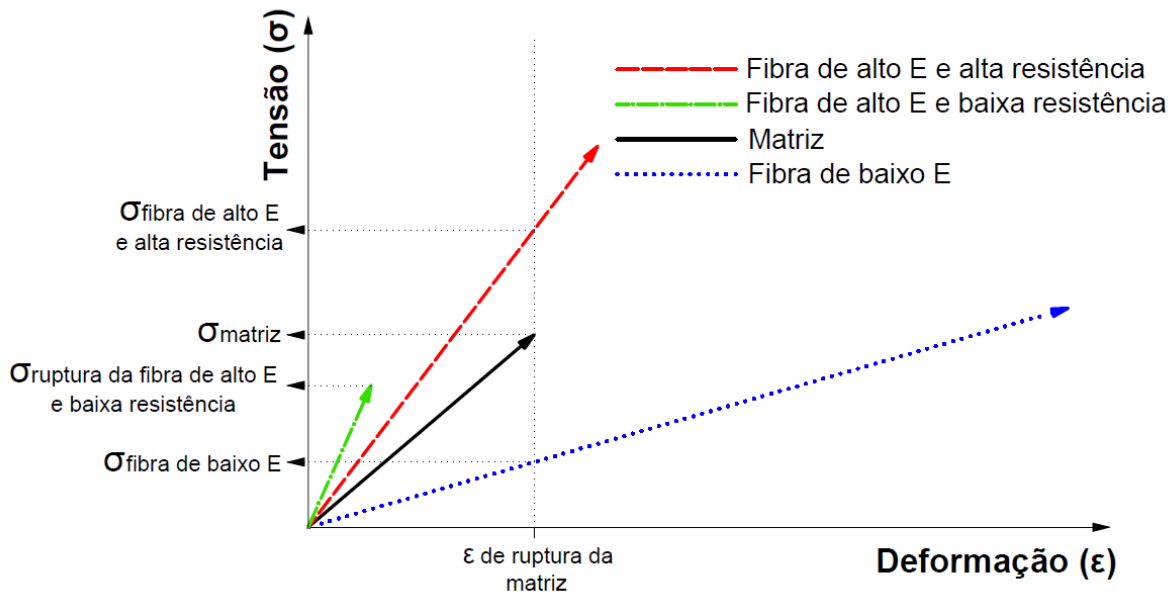
Material	Diâmetro (µm)	Densidade (g/cm³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Deformação na ruptura (%)
Aço	5-500	7,84	200	500-2000	0,5-3,5
Vidro	9-15	2,6	70-80	2000-4000	2-3,5
Amianto					
Crocidolite	0,02-0,4	3,4	196	3500	2-3
Crisolite	0,02-0,4	2,6	164	3100	2-3
Polipropileno	20-400	0,9-0,95	3,5-10	450-760	15-25
Aramida (Kevlar)	10-12	1,44	63-120	2300-3500	2-4,5
Carbono	8-9	1,6-1,7	230-380	2500-4000	0,5-1,5
Nylon	23-400	1,14	4,1-5,2	750-1000	16-20
Celulose	-	1,2	10	300-500	-
Acrílico	18	1,18	14-19,5	400-1000	3
Polietileno	25-1000	0,92-0,96	5	80-600	3-100
Fibra de madeira	-	1,5	71	900	-
Sisal	10-50	1,5	-	800	3
Matriz cimentícia (para comparação)	-	1,5-2,5	10-45	3-7	0,02

Fonte: Bentur e Mindess (2007).

As propriedades mais importantes que irão influenciar no desempenho das fibras no concreto são sua resistência mecânica e seu módulo de elasticidade. Desta forma, a Figura 9 ilustra os diagramas tensão-deformação de uma matriz de referência e de fibras com diferentes características, sendo possível avaliar a utilização de determinada fibra como elemento de reforço no concreto.

Considerando uma perfeita aderência entre os elementos do compósito, as fibras de baixo módulo de elasticidade atingem tensões relativamente baixas no momento de ruptura da matriz, sendo necessário um alto teor dessas fibras para que possam suportar a tensão transferida pela matriz. Caso seja adotado um baixo consumo destas fibras, as mesmas podem atingir deformações consideráveis, ocasionando elevadas aberturas de fissura. Com isto, este tipo de fibra não é a mais adequada para reforço do concreto. Porém, pode ser utilizada no controle da fissuração por retração plástica do material, já que nesta fase o concreto se encontra no estado fresco e submetido a menores tensões (FIGUEIREDO, 2011).

Figura 9 – Diagramas de tensão *versus* deformação de uma matriz de concreto e de fibras com diferentes propriedades mecânicas



Fonte: Adaptado de Figueiredo (2011).

As fibras de alto módulo de elasticidade adquirem uma tensão maior do que a da matriz para uma determinada deformação do compósito, sendo apropriadas para reforço do concreto, desde que possuam resistência mecânica superior à da matriz. Desta forma, fibras com alto módulo de elasticidade, mas baixa resistência mecânica, não são vantajosas de serem utilizadas como reforço, pois sofrem ruptura antes da matriz, em pequenas deformações. Já as fibras de alto módulo de elasticidade e de alta resistência possuem uma tensão superior à da matriz no momento de sua ruptura, sendo possível resistir a carga transmitida pela matriz e atuar como reforço, mesmo em baixos teores (FIGUEIREDO, 2011).

As fibras mais tradicionalmente utilizadas como elemento de reforço no concreto estrutural são as fibras de aço. Posteriormente, surgiram as macrofibras poliméricas, com a finalidade de utilização semelhante à das fibras de aço. Algumas propriedades destes dois tipos de fibras são detalhadas a seguir.

2.2.1 Fibras de aço

As fibras de aço começaram a ser comercializadas na década de 1970 e, com o decorrer do tempo, foram bem aceitas como uma alternativa ao uso do reforço tradicional do concreto com telas metálicas. Desta forma, estas fibras têm sido utilizadas em diversas

aplicações, como: lajes sobre solo, concreto projetado, revestimento de túneis e elementos pré-moldados (THE CONCRETE SOCIETY, 2007).

Dependendo do processo de fabricação, as fibras de aço podem possuir diversos formatos e comprimentos. As seções transversais podem ter formato circular, retangular, achatado ou ondulado, de modo a obter uma ligação mais resistente com a matriz (HANNANT, 2003). O comprimento destas fibras geralmente varia de 10 mm, consideradas fibras curtas, até 60 mm, para as fibras longas, com diâmetros entre 0,4 mm e 1,4 mm (THE CONCRETE SOCIETY, 2007).

O Brasil possui a NBR 15530:2007 (ABNT, 2007a) - Fibras de aço para concreto – Especificação, que trata da especificação de fibras de aço de baixo teor de carbono para concreto. De acordo com esta norma, as fibras podem ser classificadas quanto à sua forma como fibras tipo A (com extremidades ancoradas - Figura 10(a)), fibras tipo C (corrugadas - Figura 10(b)), ou fibras tipo R (retas). Já em relação ao processo de produção, as fibras podem ser especificadas como fibras classe I (proveniente de arame trefilado a frio), fibras classe II (proveniente de chapa laminada cortada a frio) ou fibras classe III (proveniente de arame trefilado e escarificado). A partir desta especificação, a referida norma estabelece limites mínimos de fator de forma (relação entre comprimento e diâmetro equivalente) e de resistência à tração do aço para as fibras, conforme exibido na Tabela 3. A Tabela 4 contém as geometrias associadas a cada classificação das fibras de aço, segundo a NBR 15530:2007 (ABNT, 2007a). Para a caracterização geométrica destas fibras é utilizado um paquímetro digital.

Figura 10 – Amostras de fibras de aço (a) com extremidades ancoradas e (b) corrugadas



Fonte: Figueiredo (2011).

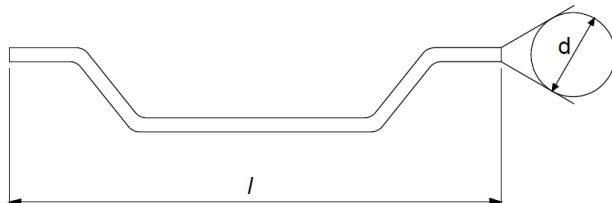
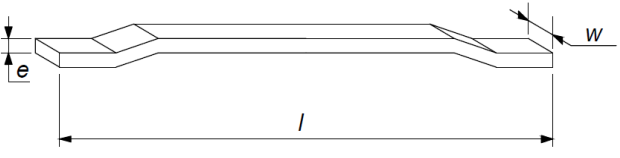
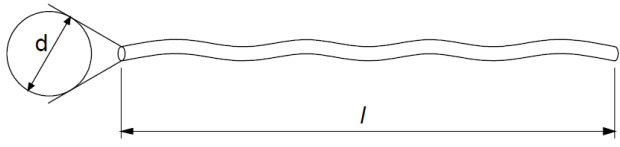
Tabela 3 – Limites mínimos para utilização de fibras de aço no concreto

Tipo (geometria)	Classe da fibra	Fator de forma mínimo λ	Limite de resistência à tração do aço f_u MPa ^(*)
A	I	40	1000
	II	30	500
C	I	40	800
	II	30	500
	III	30	800
R	I	40	1000
	II	30	500

(*) Esta determinação deve ser feita no aço, no diâmetro equivalente final imediatamente antes do corte.

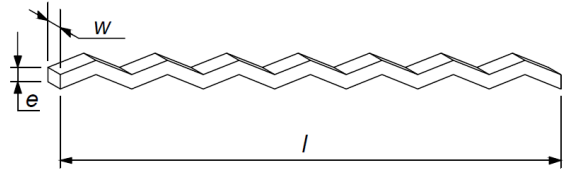
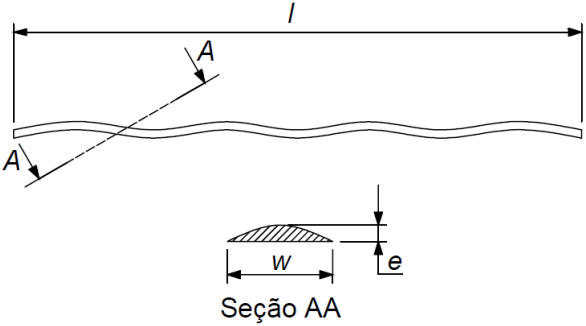
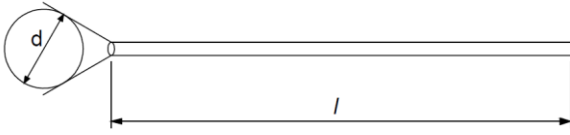
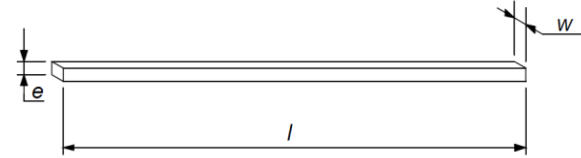
Fonte: NBR 15530:2007 (ABNT, 2007a).

Tabela 4 – Geometria dos diversos tipos de fibras de aço segundo a classificação da NBR 15530:2007 (ABNT, 2007a)

Tipo	Classe da fibra	Geometria
A	I	
	II	
C	I	

(continua)

Tabela 4 – Geometria dos diversos tipos de fibras de aço segundo a classificação da NBR 15530:2007 (ABNT, 2007a)
(conclusão)

Tipo	Classe da fibra	Geometria
C	II	
	III	
R	I	
	II	

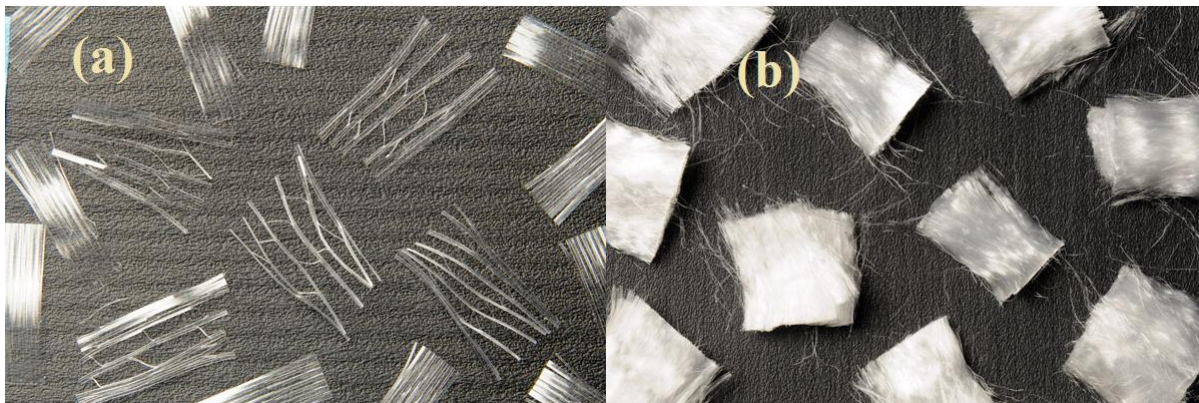
Fonte: Adaptado de Figueiredo (2011).

2.2.2 Fibras de polipropileno

De acordo com a UNE-EN 14889-2:2008 (AENOR, 2008), *Fibras para homigón, Parte 2: Fibras poliméricas – Definições, especificaciones y conformidad*, as fibras poliméricas podem ser classificadas, quanto à sua forma física, como Classe I - Microfibras, cujo diâmetro é inferior a 0,30 mm, ou Classe II - Macrofibras, com diâmetro maior do que 0,30 mm. Por sua vez, as microfibras podem ser divididas em Classe Ia – Microfibras monofilamentos e Classe Ib – Microfibras fibriladas. As microfibras fibriladas são formadas por uma malha de finos filamentos, enquanto que as fibras de monofilamentos correspondem a pequenos fios cortados de comprimentos iguais (FIGUEIREDO, 2011). Os dois tipos de

microfibras são mostrados na Figura 11.

Figura 11 – Microfibras poliméricas (a) fibriladas e (b) monofilamentos



Fonte: Abcpolymer (2017).

As microfibras de polipropileno, com comprimento variando entre 6 mm e 20 mm, são utilizadas no concreto desde 1980 com o objetivo de melhorar suas propriedades no estado fresco, reduzindo a exsudação e a fissuração por retração plástica. Já as macrofibras poliméricas, com dimensões similares às fibras de aço, começaram a ser comercializadas nos anos 2000 com a finalidade de proporcionar resistência pós-fissuração ao concreto (THE CONCRETE SOCIETY, 2007). Segundo Figueiredo (2011) também já existem no mercado fibras de polipropileno que incluem tanto as macrofibras, quanto as microfibras, conforme exibido na Figura 12. Tais fibras são utilizadas tanto para o controle da fissuração no concreto fresco quanto para reforço nas idades posteriores.

Figura 12 – Fibras de polipropileno formadas por mistura de macrofibras e microfibras



Fonte: Figueiredo (2011).

As fibras de polipropileno são resistentes a ambientes alcalinos e são protegidas

pela matriz cimentícia dos raios ultravioletas, os quais poderiam provocar sua degradação. Foi observado que a resistência destas fibras apresentou pequena alteração após serem expostas a uma variedade de ambientes ao longo de 18 anos e, por meio de experimentos, foi estimado que sua vida útil geralmente ultrapassa 30 anos (HANNANT, 2003).

As fibras sintéticas podem retardar o aparecimento da água de exsudação na superfície do concreto. Com isso, deve-se esperar um tempo maior para a evaporação da água de exsudação no concreto contendo fibras sintéticas, comparado ao concreto convencional (sem fibras). Por serem relativamente leves, estas fibras podem se desprender do concreto quando ficam expostas (MENDOZA; AIRE; DÁVILA, 2011).

A adição de fibras de polipropileno ao concreto já é realidade em diversos tipos de obras: barragens, pontes, pavimentos, pisos de concreto, entre outros. Vários fatores justificam o emprego do polipropileno no concreto, entre eles: é um material quimicamente inerte, não sofre corrosão, não absorve água, apresenta baixo custo e é de fácil disponibilidade (MEDEIROS, 2012). Além disso, este tipo de fibra também é utilizado em estruturas em que a resistência ao fogo é importante. Em situações de incêndio, ocorre a fusão das fibras, originando canais por onde os vapores são liberados mais facilmente, dificultando a ocorrência do *spalling* (HANNANT, 2003).

No Brasil ainda não há norma referente a especificação das fibras de polipropileno para utilização em concreto. Desta forma, é necessário recorrer a normas estrangeiras que contemplem os requisitos do material para utilização estrutural, como a UEN-EN 14889-2:2008 (AENOR, 2008).

Cáceres (2016) propôs uma metodologia para a caracterização geométrica e mecânica das macrofibras poliméricas. A caracterização geométrica se deu de acordo com a UEN-EN 14889-2:2008 (AENOR, 2008), enquanto a caracterização mecânica ocorreu de acordo com metodologia própria elaborada pelo autor, de acordo com normas destinadas a ensaios mecânicos de fibras gerais ou de materiais metálicos. Para a determinação do comprimento das macrofibras poliméricas foram utilizados dois métodos: o uso do paquímetro e das imagens digitais. Para a determinação do diâmetro equivalente, foram utilizados três métodos: paquímetro, imagens digitais e método da densidade. Na caracterização mecânica, foram utilizadas macrofibras em condições normais e macrofibras misturadas, de modo a verificar o efeito abrasivo dos agregados nas propriedades mecânicas das macrofibras. Os dois métodos utilizados na mensuração do comprimento da macrofibra foram considerados eficazes. Já na determinação do diâmetro, o método da densidade forneceu resultados mais confiáveis. O procedimento adotado no ensaio de tração direta se mostrou eficiente, principalmente em

relação aos valores de resistência obtidos, enquanto o módulo de elasticidade foi considerado subestimado, ao ser comparado com os valores fornecidos pelo fabricante. A ação abrasiva dos agregados provocou redução nos valores da resistência e do módulo de elasticidade das fibras.

2.3 Concreto reforçado com fibras: o compósito e a relação matriz-fibra

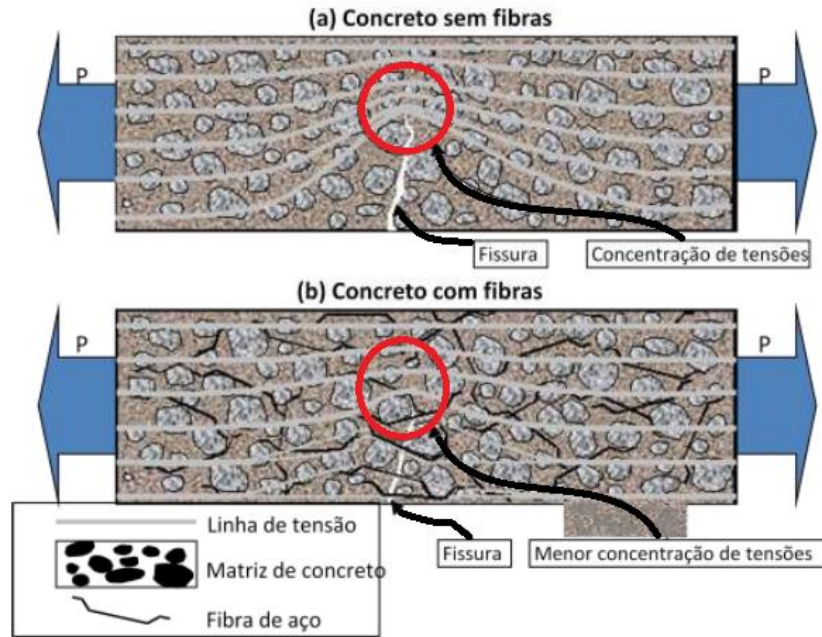
Compósitos podem ser definidos como materiais formados por duas ou mais fases, na qual uma delas é denominada matriz e a outra é chamada reforço. O produto resultante deve possuir melhores propriedades para certas aplicações do que seus constituintes, quando estes são analisados individualmente e, para que isso ocorra, é necessário que o reforço e a matriz sejam compatíveis, melhorando a durabilidade do conjunto (CALLISTER, 2008). Neste contexto, o concreto reforçado com fibras pode ser considerado um compósito, no qual a matriz é formada pelo concreto e as fibras constituem o reforço, que atua de modo a reduzir o comportamento frágil do concreto.

Geralmente, os elementos estruturais de concreto sofrem algum tipo de restrição, devido à fundação, ao reforço ou aos agregados graúdos presentes na mistura. No estado fresco, quando a deformação por retração plástica é restringida, surgem tensões de tração na peça estrutural. Caso estas tensões sejam elevadas, ocorre fissuração (MEHTA; MONTEIRO, 2014). As fibras atuam reduzindo a abertura e a propagação destas fissuras.

No estado endurecido, ao ser submetido a esforços externos de tração, o concreto fissa. No local de abertura da fissura, a transferência de tensão na matriz é interrompida e ocorre uma concentração de tensões na extremidade da fissura (Figura 13(a)). Caso os esforços de tração aumentem e, conseqüentemente, a concentração de tensões na extremidade da fissura ultrapasse a tensão de resistência oferecida pelo material, a ruptura do mesmo ocorre. Tal ruptura acontece de modo frágil, já que o concreto não apresenta resistência residual à tração pós-fissuração (FIGUEIREDO, 2011).

Ao serem adicionadas ao concreto, as fibras atuam como ponte de transferência de tensão ao longo das fissuras, dificultando a propagação das mesmas e reduzindo a concentração de tensões em suas extremidades, conforme ilustrado na Figura 13(b). Desta forma, o concreto deixa de ser um material frágil e se torna um material pseudo-dúctil, possuindo capacidade resistente pós-fissuração (FIGUEIREDO, 2011).

Figura 13 – Concentração de tensões na fissura de concreto sem fibras (a) e com fibras (b)



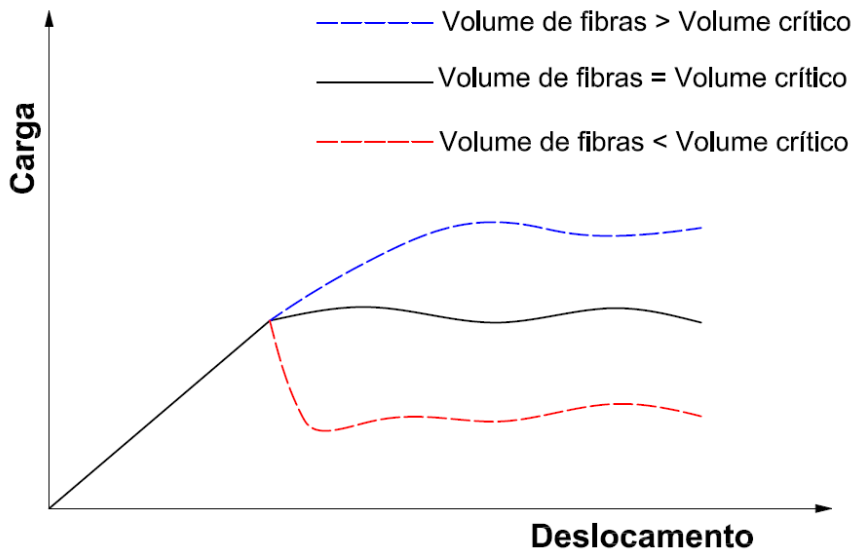
Fonte: Adaptado de Figueiredo (2000).

Diversos fatores afetam o desempenho do concreto reforçado com fibras, como o volume e o comprimento críticos das fibras adotadas.

2.3.1 Volume crítico de fibras

O volume crítico de fibras corresponde ao teor de fibras que proporciona ao compósito capacidade de suportar a carga após ocorrer a ruptura da matriz. Para teores de fibras superiores ao volume crítico, o compósito é capaz de suportar uma carga maior do que a carga de ruptura da matriz. Caso o volume de fibras adotado seja inferior ao volume crítico, após a ruptura da matriz há uma queda na capacidade resistente do compósito. O trecho inicial pré-fissuração não sofre mudança significativa quando diferentes teores de fibra são adicionados, representando o comportamento elástico da matriz antes da fissuração (FIGUEIREDO, 2000). Este comportamento está ilustrado na Figura 14, que apresenta curvas carga *versus* deslocamento obtidas em ensaios de tração na flexão de prismas de concreto reforçado com fibras contendo três diferentes teores de fibras de aço.

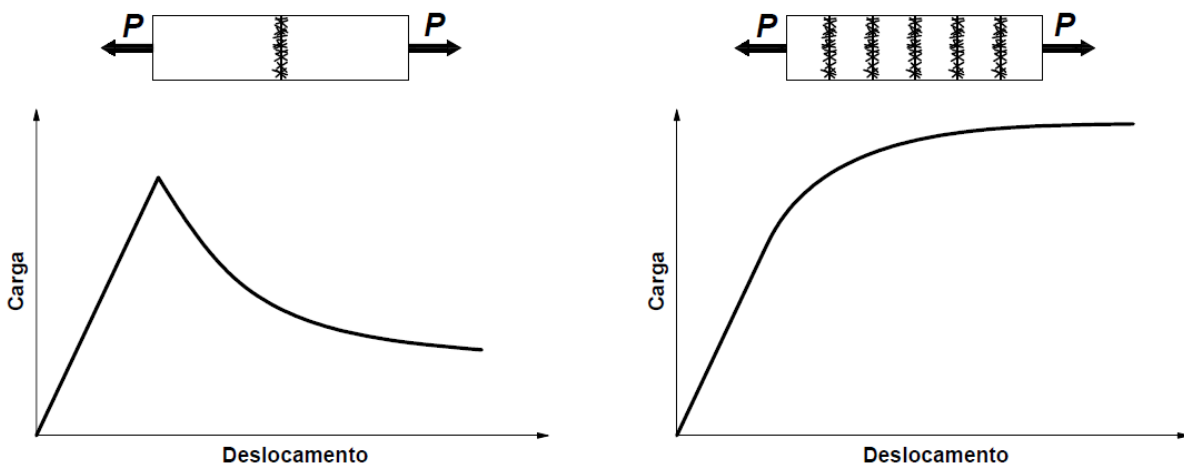
Figura 14 – Desempenho de CRF contendo teor de fibras de aço inferior (a), superior (b) e igual (c) ao volume crítico



Fonte: Adaptado de Figueiredo (2000).

Após a fissuração, o compósito pode apresentar comportamento *softening* ou *hardening*. O comportamento *softening* é caracterizado por deformações localizadas em apenas uma fissura e por um decréscimo da carga resistida após a ruptura do concreto, enquanto que no comportamento *hardening* há a formação de múltiplas fissuras e um aumento da carga resistente após a ruptura do concreto (FIB, 2010). A Figura 15 exibe estes dois comportamentos para uma amostra submetida à tração uniaxial.

Figura 15 – Comportamento (a) *softening* e (b) *hardening* pós-fissuração do concreto reforçado com fibras

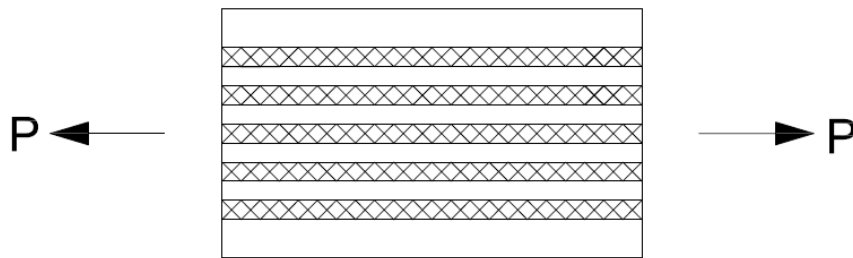


Fonte: Adaptado de Di Prisco, Plizzari e Vandewalle (2009).

O comportamento *hardening* é obtido principalmente com uma matriz de concreto de alta resistência e com um volume de fibras adicionado superior ao volume crítico. Alguns materiais podem apresentar comportamento *softening* quando submetido à tensão uniaxial, mas apresentar comportamento *hardening* quando submetido à flexão. Isto acontece por que, na flexão, há uma distribuição de deformação linear ao longo da seção transversal da peça não-fissurada, favorecendo uma propagação estável das fissuras (DI PRISCO; PLIZZARI; VANDEWALLE, 2009).

O volume crítico depende da relação entre a resistência à tração da matriz e a resistência efetiva das fibras, a qual está relacionada com a tensão atuante nas fibras no momento da falha do compósito, que acontece por uma combinação de ruptura e arrancamento das fibras (THE CONCRETE SOCIETY, 2007). Assumindo de modo simplista que todas as fibras são contínuas e estão alinhadas ao eixo de aplicação de tensão, conforme ilustrado na Figura 16, o volume crítico pode ser determinado pela Equação 4 (HANNANT, 2003).

Figura 16 – Fibras contínuas e alinhadas ao eixo de aplicação da força P



Fonte: Adaptado de Bentur e Mindess (2007).

$$V_{f_{crit}} = \frac{\sigma_c}{\sigma_f} \quad (4)$$

Onde:

$V_{f_{crit}}$ = volume crítico de fibras;

σ_c = tensão de ruptura à tração da matriz;

σ_f = resistência da fibra ou tensão média nas fibras dependendo se há a ruptura ou arrancamento das fibras na falha do compósito.

Segundo Hannant (2003), alguns fatores que afetam uma estimativa mais realista

do volume crítico de fibras são o número de fibras atuando na seção de ruptura, que varia de acordo com a aleatoriedade das fibras, e a aderência da fibra na matriz, que influencia no arrancamento ou ruptura das fibras quando da falha do compósito. A partir do número de fibras atuando em uma fissura de área unitária, é possível obter a tensão última no compósito multiplicando-se esse número pela força de ruptura por fibra, considerando pequenas aberturas de fissuras. De acordo com a tensão última no compósito é determinado o teor crítico de fibras para as diferentes orientações de fibras, conforme disposto na Tabela 5.

Tabela 5 – Número de fibras na fissura, tensão última no compósito e teor crítico de fibras de acordo com a orientação das fibras

Orientação das fibras	Número de fibras em fissura de área unitária	Tensão última em uma área unitária do compósito	Teor crítico de fibras
1 direção	$\frac{V_f}{A_f}$	$\sigma_f \cdot V_f$	$\frac{\sigma_c}{\sigma_f}$
2 direções	$\frac{2V_f}{\pi A_f}$	$\frac{2 \cdot \sigma_f \cdot V_f}{\pi}$	$\frac{\pi \sigma_c}{2 \sigma_f}$
3 direções	$\frac{V_f}{2A_f}$	$\frac{\sigma_f \cdot V_f}{2}$	$\frac{2 \sigma_c}{\sigma_f}$

Nota: V_f = Volume de fibras em um volume unitário de compósito; A_f = Área da seção transversal da fibra.

Fonte: Hannant (2003).

O valor do σ_f depende de vários fatores, como resistência do concreto, dimensões da fibra e mecanismo de ancoragem. Para as fibras de aço, σ_f geralmente varia de 300 a 500 MPa, enquanto que para fibras de polipropileno σ_f pode variar de 200 a 300 MPa (HANNANT, 2003). Para uma matriz de concreto convencional, com σ_c aproximadamente igual a 3 MPa, o volume crítico de fibras de aço varia de 1,2% a 2%, já para as fibras sintéticas este número fica entre 2% e 3%, considerando as fibras dispostas aleatoriamente nas três direções e utilizando a faixa de valores de σ_f estimado por Hannant (2003). De maneira geral, segundo Bentur e Mindess (2007), o volume crítico de fibras de aço, de vidro ou de polipropileno variam de 1% a 3% em misturas de concreto reforçado com fibras.

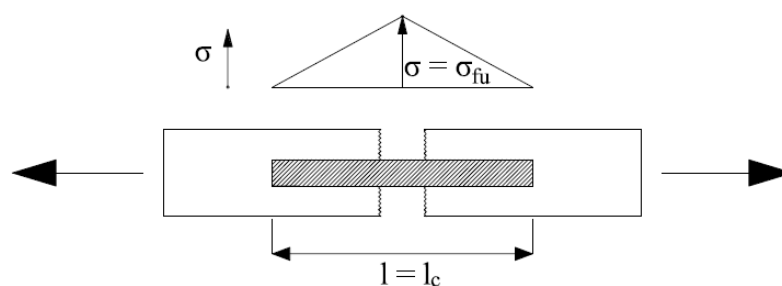
Geralmente, as fibras de aço são utilizadas em dosagens que variam de 20 a

80 kg/m³ (0,25 – 1,0% em volume). As microfibras poliméricas, destinadas principalmente ao controle de fissuração no concreto, são usadas em pequenas dosagens, em torno de 0,9 kg/m³, correspondente a 0,1% em volume. Já as macrofibras sintéticas são usadas em dosagens mais altas, podendo chegar a um teor máximo de 1,35% em volume, com consumo de aproximadamente 12 kg/m³ (THE CONCRETE SOCIETY, 2007). Na maioria das situações práticas construtivas utilizam-se teor de fibras descontínuas relativamente baixos, menores do que 2% em volume, com a média variando de 0,1 % a 0,7 % (MENDOZA; AIRE; DÁVILA, 2011).

2.3.2 Comprimento crítico das fibras

Além do volume crítico, outro fator que afeta o desempenho pós-fissuração do concreto reforçado com fibras é a geometria das fibras. O comprimento crítico pode ser definido como o comprimento no qual a tensão máxima que atua na fibra é igual à sua tensão de ruptura. Para analisar este aspecto, considera-se um modelo no qual a tensão aumenta linearmente das extremidades da fibra até o seu centro e que a abertura de fissura ocorre perpendicular e na metade do comprimento da fibra (FIGUEIREDO, 2000), conforme ilustrado na Figura 17.

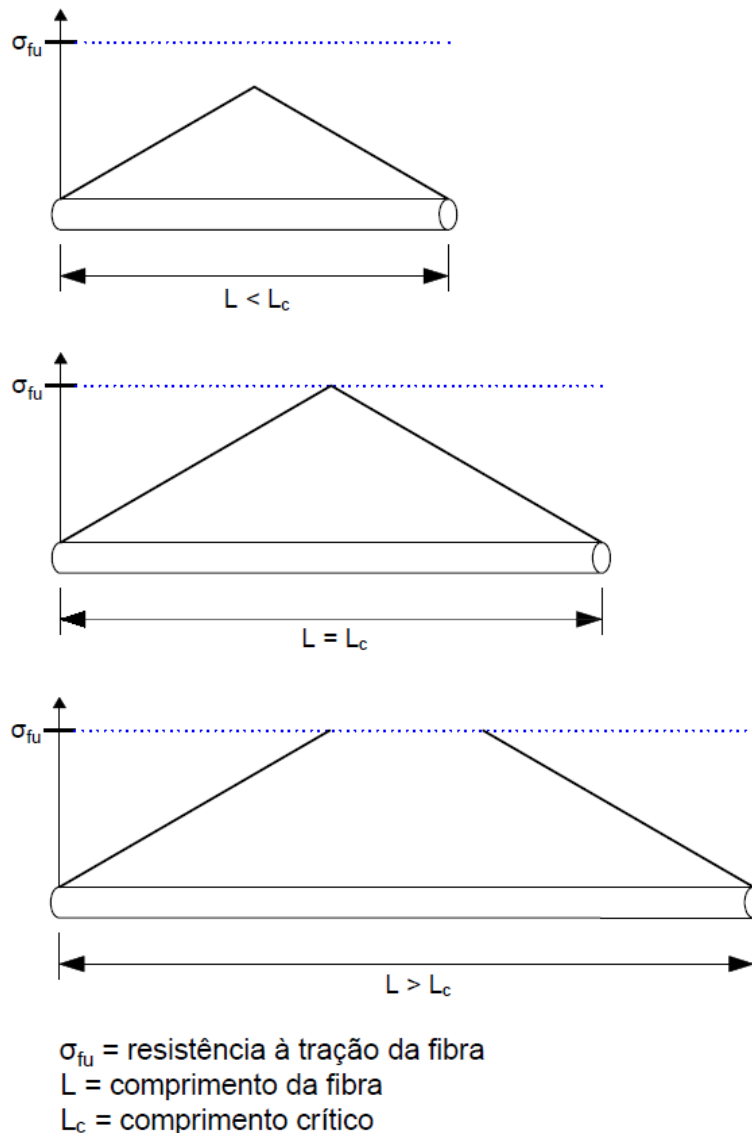
Figura 17 – Distribuição de tensão ao longo da fibra



Fonte: Adaptado de Bentur e Mindess (2007).

Quando o comprimento de fibra é menor do que o crítico, a tensão transferida da matriz para a fibra é menor do que a resistência da fibra. Com isso, à medida que ocorre a abertura de fissura, a fibra se deforma e termina sendo arrancada do lado que possui menor comprimento embutido na matriz. Caso o comprimento da fibra seja superior ao crítico, a tensão máxima atuante na fibra ultrapassa a sua resistência e acontece sua ruptura (FIGUEIREDO, 2000). As possíveis distribuições de tensão na fibra de acordo com o seu comprimento são mostradas na Figura 18.

Figura 18 – Distribuição de tensão na fibra de acordo com seu comprimento



Fonte: Figueiredo (2000), Bentur e Mindess (2007).

O comprimento crítico das fibras depende de diversos fatores, como a resistência da matriz e a tensão de ruptura da fibra. Desta forma, em concretos de resistência moderada ou baixa reforçados com fibras de aço há a predominância do arrancamento das fibras na ruína do compósito. Já em concretos de alta resistência, há uma melhor aderência entre as fibras e a matriz, fazendo com que a carga desenvolvida no centro das fibras ultrapasse a sua resistência e aconteça sua ruptura (FIGUEIREDO, 2000).

De acordo com recomendações práticas, o comprimento das fibras deve ser, no mínimo, igual ao dobro da dimensão máxima característica do agregado graúdo constituinte do concreto, para que haja compatibilidade entre fibras e agregados. Isto permite que as fibras

atuem como reforço do concreto, dificultando a propagação de fissuras que surgem na interface entre os agregados (FIGUEIREDO, 2000).

Figueiredo (2011) chama a atenção para algumas desvantagens quando da utilização de fibras muito longas no concreto. Uma delas se refere à perda de trabalhabilidade da mistura; já a outra está relacionada ao modo de falha da fibra no compósito. Fibras de maiores comprimentos tendem a romper logo após o início de abertura de fissura, reduzindo a resistência residual do material. Com isso, geralmente se utilizam fibras com comprimento inferior ao crítico, em que há a predominância do arrancamento das fibras na ruína, contribuindo para a melhoria da tenacidade do compósito.

De acordo com Malatesta e Contreras (2009), as falhas por ruptura das fibras são mais rápidas e catastróficas, enquanto que as falhas devido ao arrancamento das fibras acontecem de modo gradual, aumentando a ductilidade do material. Geralmente, quanto mais dúcteis são as fibras, mais estável é a falha do compósito. Na prática, usualmente se utilizam fibras com fator de forma menor do que 100 para que haja uma distribuição uniforme das fibras no concreto e a predominância do arrancamento destas na falha do compósito.

2.4 Propriedades do concreto reforçado com fibras

As principais propriedades do concreto consideradas no projeto estrutural são a resistência mecânica e o módulo de elasticidade. No caso do concreto reforçado com fibras, a resistência residual também se torna um parâmetro diferencial, devendo ser avaliada.

Como as fibras atuam dificultando a propagação de fissuras, espera-se que o concreto reforçado com fibras tenha uma maior durabilidade e resistência à abrasão em relação ao concreto convencional (sem fibras). Geralmente, o peso específico do concreto não é modificado consideravelmente com a adição de fibras, enquanto que há uma redução da trabalhabilidade da mistura no estado fresco, dependendo do material constituinte, do comprimento e do teor de fibras adicionadas. Para compensar essa perda de trabalhabilidade, são utilizados aditivos superplastificantes (ANDRADE, 2013).

O concreto reforçado com fibras requer um menor tempo de vibração quando comparado ao concreto convencional para se alcançar um determinado abatimento. A vibração na superfície pode alterar a orientação das fibras, deixando-as paralelas à superfície da amostra (ANDRADE, 2013). Desta forma, é recomendável a utilização de um vibrador externo ao invés de um vibrador por imersão, de modo a alcançar uma distribuição uniforme das fibras (MENDOZA; AIRE; DÁVILA, 2011).

2.4.1 Resistência à compressão

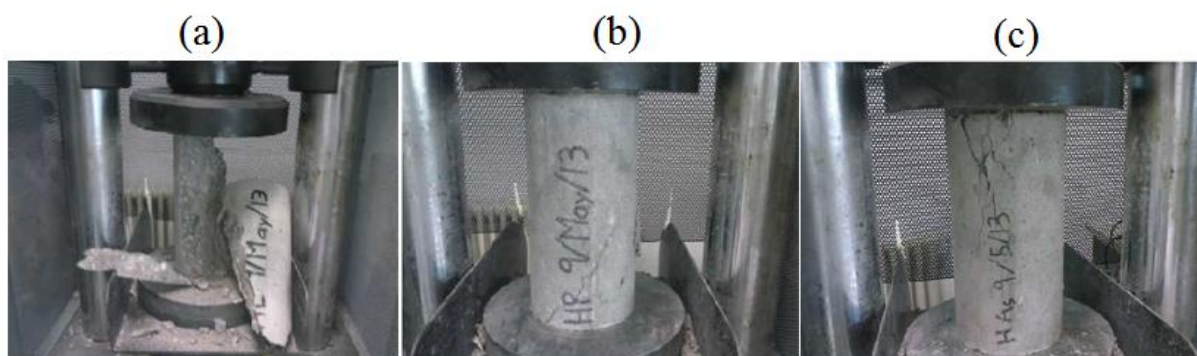
As propriedades mecânicas do concreto são modificadas quando fibras são adicionadas à mistura. No entanto, as propriedades elásticas e a resistência à compressão não são alteradas significativamente, desde que sejam utilizados baixos teores de fibras (FIB, 2010). Alguns estudos são contraditórios quanto ao efeito da adição de fibras em algumas propriedades mecânicas do concreto, como resistência à compressão e resistência à tração na flexão (MENDOZA; AIRE; DÁVILA, 2011).

A partir do volume de 1% de fibras adicionadas, o valor da resistência à compressão do concreto começa a modificar-se (DI PRISCO; PLIZZARI; VANDEWALLE, 2009). Em estudo desenvolvido por Song e Hawang (2004), verificou-se um aumento crescente da resistência à compressão do concreto com a adição de fibras de aço até o teor de 1,5% em volume. Para teores superiores, o valor da resistência à compressão começou a diminuir.

Há uma tendência de se reduzir a resistência à compressão do concreto com o incremento de fibras, já que há uma redução do abatimento e da compactação do compósito. No entanto, é possível modificar a trabalhabilidade da mistura com fibras utilizando aditivo superplastificante, o que gera também uma melhoria da resistência do concreto, podendo alcançar a resistência do concreto sem fibras (MENDOZA; AIRE; DÁVILA, 2011). O teor de ar incorporado na mistura devido à perda de abatimento ou durante a incorporação de fibras também pode contribuir para que haja uma menor resistência à compressão do concreto (MIAO; CHERN; YANG, 2003). Resultados de ensaios obtidos por Carrillo, González e Aperador (2012) em amostras de concreto reforçado com fibras de aço, sem a incorporação de aditivo superplastificante, indicaram uma redução da resistência à compressão em relação à amostra sem fibras.

Andrade (2013) analisou as propriedades de um concreto autoadensável reforçado com fibras de aço e com fibras de polipropileno. Na Figura 19 é mostrado o momento de ruptura no ensaio de resistência à compressão de três amostras de concreto, uma de referência e as outras duas reforçadas com fibras. Enquanto o concreto de referência se desfez em várias partes, os corpos de prova dos concretos reforçados com fibras de aço e de polipropileno se mantiveram praticamente íntegros após a ruptura.

Figura 19 – Ensaio de resistência à compressão: (a) concreto de referência, (b) concreto reforçado com fibras de polipropileno e (c) concreto reforçado com fibras de aço



Fonte: Adaptado de Andrade (2013).

No Brasil, Shimosaka (2017) verificou que a adição de diferentes tipos de fibra de aço em teores variando de 0,4% a 1,5%, em volume, causou pequena variação no valor da resistência à compressão de um concreto autoadensável. No entanto, o efeito do teor de fibra de aço na variação da resistência foi mais significativo do que o efeito do tipo de fibra de aço. Com emprego de 1,5% de fibras, foi alcançada uma resistência do concreto maior do que com os demais teores adotados.

2.4.2 Resistência à tração

Ensaio de resistência à tração na flexão em amostras de concreto reforçado com fibras de polipropileno foram executados por Mendoza, Aire e Dávila (2011). Enquanto em amostras de concreto com agregado graúdo de dimensão máxima característica igual a 19 mm e com maior teor de finos foi observado um aumento da resistência à tração com o incremento do teor de fibras, nas amostras com agregado graúdo de dimensão máxima característica igual a 9,5 mm e com menor teor de finos houve redução da resistência à tração com a adição de fibras. Desta forma, não se pode generalizar o comportamento das fibras na resistência à tração do concreto, já que, em algumas misturas, as fibras aumentam a resistência, enquanto que em outras diminui.

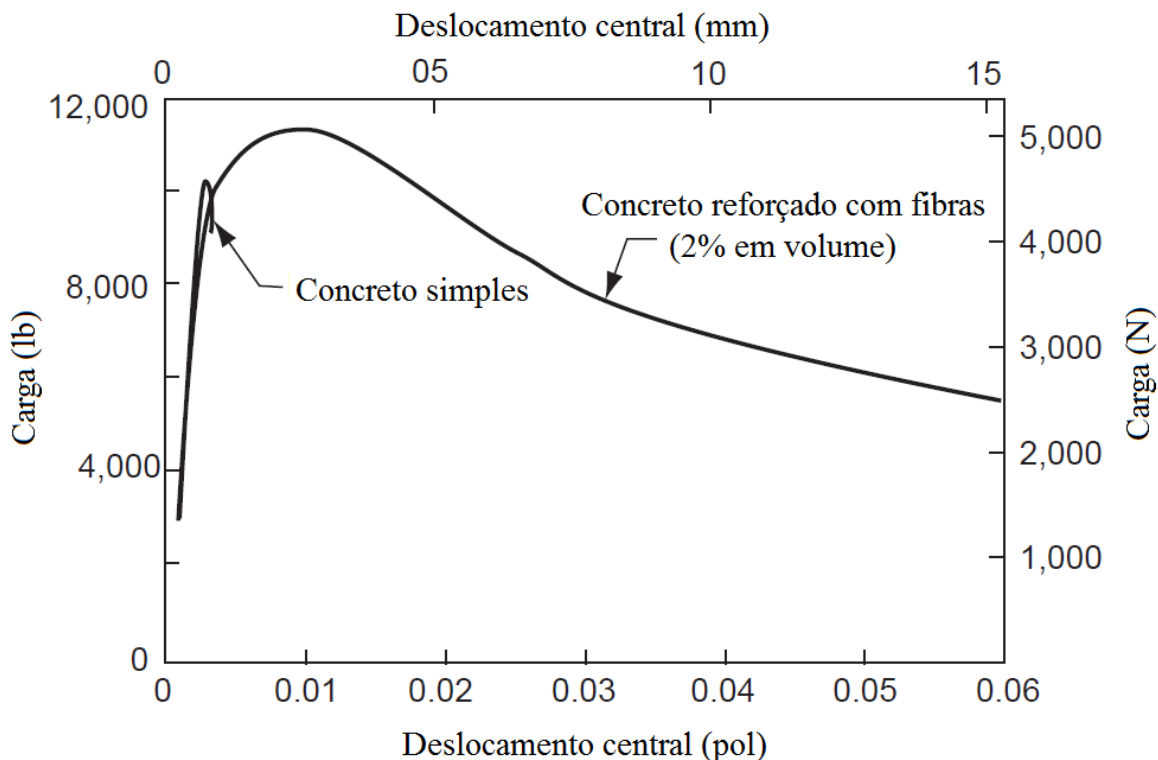
Por começarem a atuar a partir do instante em que a matriz cimentícia fissa, as fibras devem exercer pouca influência na resistência à tração do concreto, afetando em maior grau o comportamento não-linear do compósito (DI PRISCO; PLIZZARI; VANDEWALLE, 2009). Algumas amostras de concreto reforçado com fibras de aço analisadas por Carrillo, González e Aperador (2012) apresentaram resistência à tração na flexão superior à resistência

à fissuração. Este fenômeno, denominado endurecimento por deformação, foi observado principalmente em misturas com produto volume percentual de fibras x fator de forma das fibras maior do que 50.

2.4.3 Tenacidade (resistência residual)

Diferente do concreto convencional, cuja ruptura acontece logo após o início da primeira fissura, o concreto reforçado com fibras apresenta resistência pós-fissuração e tenacidade significativas (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Esta propriedade é avaliada a partir da área sob a curva de carga-deslocamento, cujo comportamento é diferente para os dois tipos de concreto (Figura 20). Além do tipo e de teor de fibras adicionado, as propriedades da matriz cimentícia também influenciam na tenacidade do compósito (ANDRADE, 2013).

Figura 20 – Curvas carga *versus* deslocamento para um concreto convencional e para um concreto reforçado com fibras



Fonte: Hanna² (1977 *apud* MEHTA; MONTEIRO, 2014).

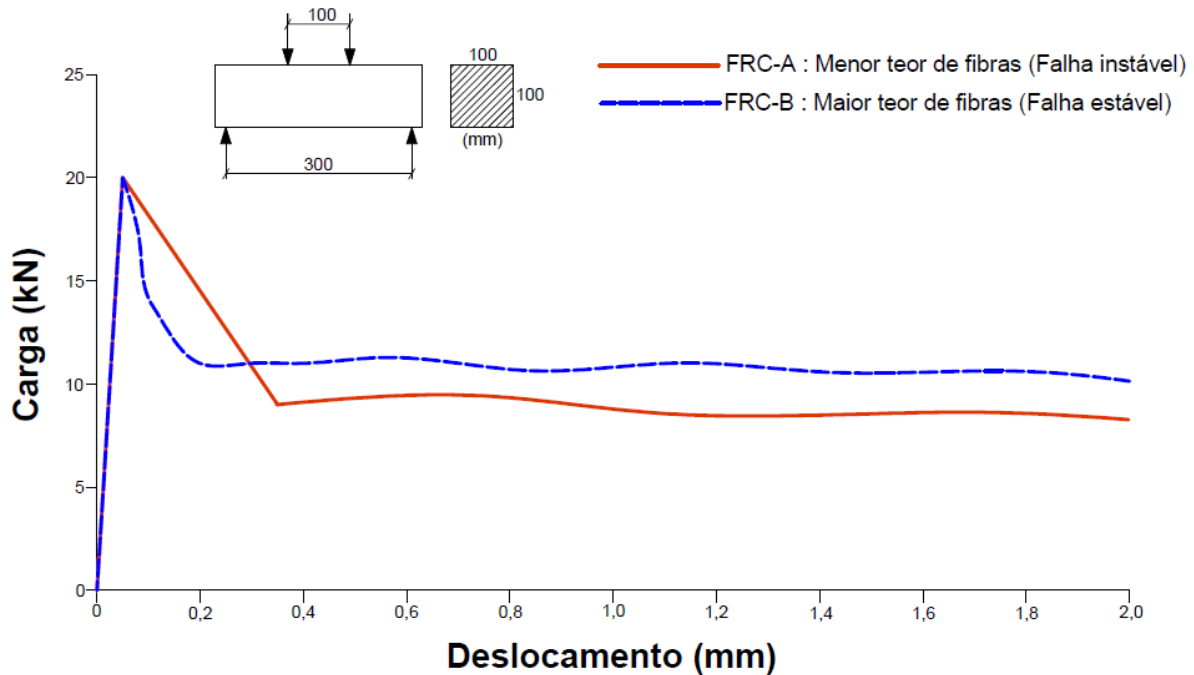
² HANNA, A. N. Steel Fiber Reinforced Concrete Properties and Resurfacing Applications, **Portland Cement Association**, Skokie, IL, Report RD049.01P, 1977.

Alguns aspectos que afetam a variabilidade das resistências residuais do concreto reforçado com fibras são o teor de fibras adicionado, o volume de concreto produzido e a trabalhabilidade da mistura. Di Prisco, Plizzari e Vandewalle (2009) observaram que amostras com maior teor de fibras e retiradas de um maior volume de concreto apresentaram uma menor variabilidade dos resultados quando comparadas às amostras com baixos teores de fibras e coletadas de um volume menor de concreto. Isto indica que um maior teor de fibras e um maior volume de concreto melhoram a homogeneidade da mistura. Segundo Montaignac *et al.* (2011), uma alta trabalhabilidade também melhora a uniformidade da mistura, com probabilidade reduzida de haver área sem fibras.

Um dos fatores que influenciam na determinação da tenacidade, dependendo do ensaio a ser executado, é a instabilidade pós-pico. Este é um fenômeno que ocorre imediatamente após a ruptura da matriz, momento em que a carga é transferida para as fibras e ocorre um aumento do deslocamento do corpo de prova. Este acréscimo de deslocamento é registrado pelos LVDTs, o que gera uma superestimação do comportamento do material. É influenciado pela rigidez do sistema de carregamento da máquina utilizada no ensaio, em que há controle do deslocamento vertical (BENTUR; MINDESS, 2007). De acordo com Villares (2001), o efeito da instabilidade pós-pico é mais significativo em compósitos com matriz de alta resistência e com teor de fibra abaixo do volume crítico, no qual ocorre uma queda na capacidade resistente após a carga de pico. Além disso, a região de instabilidade pode atingir deflexões de até 0,5 mm, prejudicando a medida de alguns parâmetros de tenacidade que utilizam pequenos deslocamentos (FIGUEIREDO, 2000).

O problema da instabilidade pós-pico pode ser visto na Figura 21, que apresenta curvas carga *versus* deslocamento resultantes de ensaios de tenacidade à flexão em corpos de prova prismáticos realizados por Banthia e Trottier (1995). Foram ensaiados dois tipos de concreto com matrizes similares, mas com diferentes teores de fibras. O FRC-B possuía um teor de fibras maior do que o FRC-A. A carga de pico foi semelhante para os dois casos, enquanto a região de instabilidade pós-pico foi mais significativa para o FRC-A do que para o FRC-B.

Figura 21 – Instabilidade pós-fissuração em concreto reforçado com diferentes fibras



Fonte: Adaptado de Banthia e Trottier (1995).

Guimarães (1999) analisou a ductilidade de pilares de alta resistência reforçado com variados teores de fibras metálicas e de fibras de polipropileno. Foi observado que quanto maior o teor de fibra adicionado, maior a ductilidade do compósito. O valor da resistência média à compressão sofreu pouca alteração com a adição de fibras. Já o índice de tenacidade e a resistência média à tração foram maiores com o aumento do teor de fibras adicionado. Ao se comparar resultados de concretos reforçados com iguais teores de fibras de aço e de macrofibras poliméricas, verificou-se um maior índice de tenacidade no concreto contendo fibras de aço, devido à maior rigidez destas fibras.

2.5 Controle do concreto reforçado com fibras

Visto que a maior contribuição das fibras no desempenho do concreto acontece após a fissuração da matriz, os ensaios de controle deste material geralmente avaliam a tenacidade do compósito. Desta forma, é possível quantificar a energia absorvida pelo concreto submetido a um determinado carregamento, incluindo a fase anterior e posterior à fissuração da matriz (FIGUEIREDO, 2011).

Os ensaios de tenacidade podem ser desenvolvidos em corpos de prova cilíndricos ou prismáticos, e/ou em placas. O ensaio em corpos de prova cilíndricos consiste no duplo

puncionamento da amostra, sendo determinado o acréscimo do comprimento circunferencial após a fissuração da matriz. No caso do ensaio com prismas, é medida a tenacidade à flexão do compósito. Já no ensaio com placas, é determinada a tenacidade à punção. Os ensaios mais tradicionais envolvendo estes três mecanismos são detalhados na sequência.

2.5.1 Ensaio Barcelona

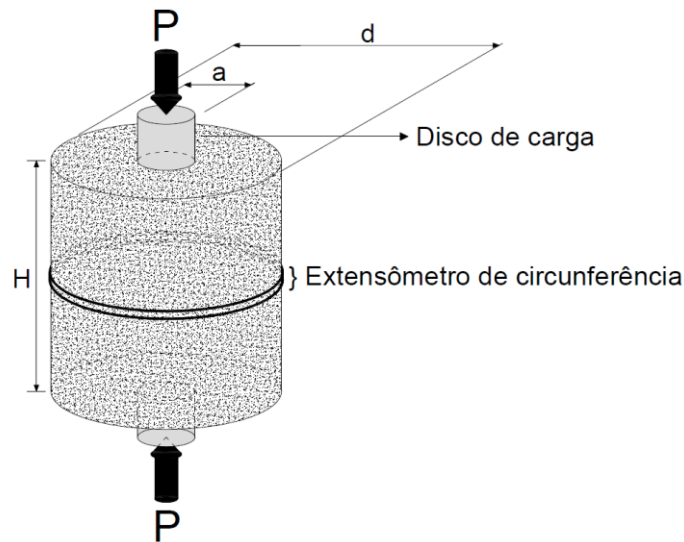
O ensaio de duplo puncionamento (ensaio Barcelona) começou a ser executado em 1970, com a finalidade de se obter a resistência à tração indireta do concreto. Em 2006, foi proposta a utilização deste ensaio na avaliação da tenacidade do concreto reforçado com fibras e, posteriormente, houve a normalização de tal procedimento pela norma espanhola UNE 83515:2010 (MONTE, 2015). De execução mais simples, o ensaio Barcelona foi desenvolvido para contornar alguns desafios encontrados na execução dos ensaios tradicionais de tenacidade em prismas, como a alta variabilidade dos resultados e a utilização de amostras pesadas, de difíceis transporte e montagem (MALATESTA *et al.*, 2009).

2.5.1.1 Configurações e considerações do ensaio

No ensaio Barcelona, normatizado pela UNE 83515:2010 (AENOR, 2010), são utilizados corpos de prova cilíndricos de altura aproximadamente igual ao diâmetro (para amostras moldadas, o valor do diâmetro deve ser 150 mm) e discos nas superfícies superior e inferior do corpo de prova para aplicação da carga. Por meio de um extensômetro de circunferência, deve ser medido o aumento do perímetro circunferencial de cada amostra (TCOD) durante a aplicação da carga. Na Figura 22, é ilustrada a configuração do ensaio.

A velocidade de aplicação da carga é de 0,5 mm/min durante todo o ensaio, que deve ser finalizado quando for registrado um TCOD de 6 mm. A partir deste ensaio, é possível se obter a resistência à tração, a resistência residual à tração e a tenacidade da amostra de concreto reforçado com fibras, conforme disposto na Tabela 6. A norma UNE 83515:2010 estabelece que tais propriedades devem ser determinadas para valores de aumento perimetral iguais a 2 mm, 2,5 mm, 4 mm e 6 mm. A tenacidade é obtida por meio da área sob a curva carga por aumento perimetral ou carga por deslocamento do pistão.

Figura 22 – Configuração do ensaio Barcelona



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

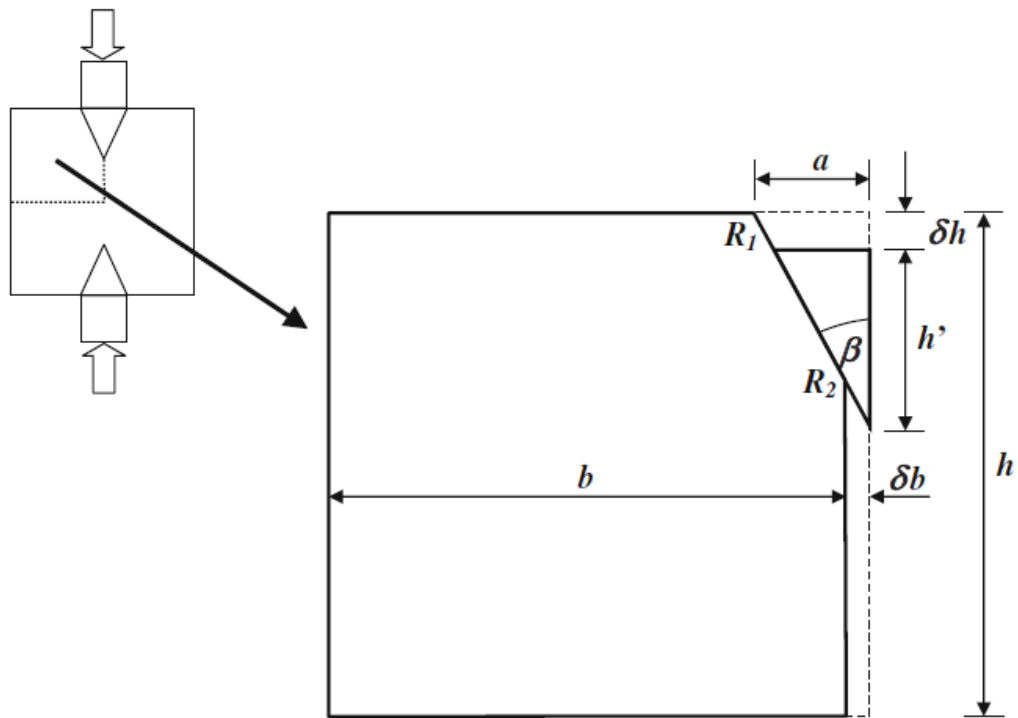
Tabela 6 – Formulário utilizado na determinação das propriedades obtidas no ensaio Barcelona

Propriedade	Equação
Resistência à tração (f_{ct})	$\frac{4P_f}{9\pi aH}$
Resistência residual à tração (f_{ctRx})	$\frac{4P_{Rx}}{9\pi aH}$
Nota: P_f = Carga que provoca a fissuração; a = Diâmetro do disco de carga; H = Altura do corpo de prova; P_{Rx} = Carga correspondente a determinado aumento perimetral.	

Fonte: UNE 83515:2010 (AENOR, 2010).

Pelo fato do extensômetro de circunferência ser um equipamento caro, que poucos laboratórios possuem, já existem estudos que relacionam o deslocamento axial e o aumento do perímetro circunferencial do corpo de prova (MONTE, 2015). Inicialmente, Malatesta, De Cea e Borrell (2012) estabeleceram uma relação teórica entre o deslocamento axial e o TCO (Figura 23), conforme disposto na Equação 5, sendo posteriormente analisado o comportamento de concretos com diferentes tipos e teores de fibras. A partir dos resultados experimentais obtidos, foram estabelecidas correlações lineares entre o deslocamento axial e o aumento do perímetro.

Figura 23 – Deslocamentos vertical e horizontal durante a fissuração da amostra no ensaio Barcelona



Fonte: Malatesta, Cea e Borrell (2012).

$$TCOD = \alpha \delta_A \quad (5)$$

Onde:

$\alpha = \pi \tan \beta$ (α é determinado experimentalmente, por meio do qual se obtém o valor do ângulo de declive do cone β).

Entretanto, Pujadas *et al.* (2013) afirmam que as correlações apresentadas por Malatesta, De Cea e Borrell (2012) são limitadas. As relações obtidas entre o TCOd e o deslocamento axial não são medições diretas, sendo consideradas empíricas e não representativas do comportamento físico relacionado à ruptura por tração da amostra durante o ensaio. Além disso, tais correlações são válidas apenas para deslocamentos axiais entre 1 mm e 4 mm e foram estabelecidas utilizando poucas amostras de concreto reforçado com fibras.

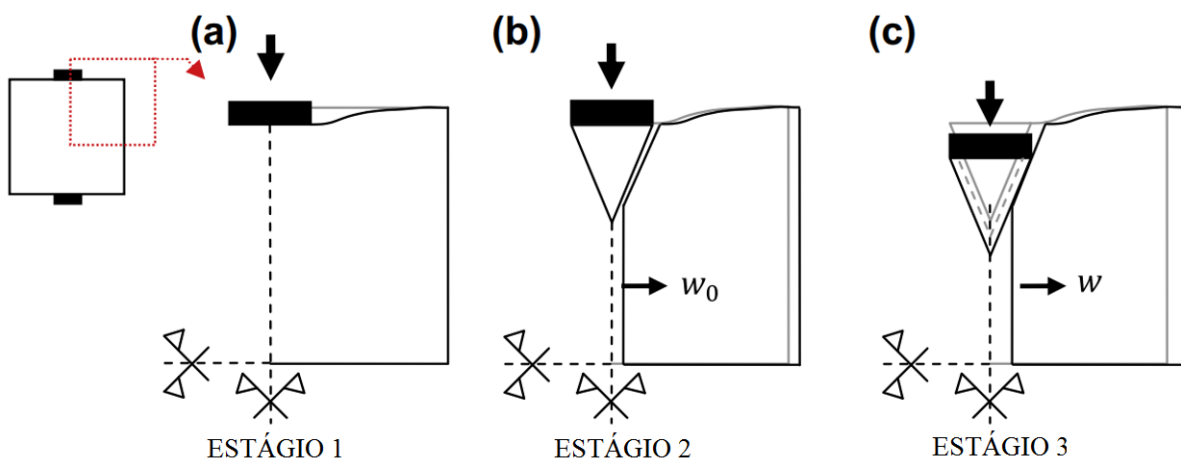
Correlações mais acuradas entre o deslocamento axial e o TCOd foram propostas por Pujadas *et al.* (2013), considerando três estágios de mecanismo de fratura. No estágio 1 (Figura 24 (a)), a amostra permanece íntegra. A carga é suportada apenas pela matriz de concreto, sem o desenvolvimento de grandes fissuras. Neste estágio, o TCOd medido é devido principalmente ao efeito de Poisson e à microfissuração do concreto. O valor do TCOd é

praticamente zero nesta fase, independentemente do valor do deslocamento axial. A partir do momento que o concreto fissura, se inicia o estágio 2.

No estágio 2 (Figura 24 (b)) há formação de cunhas de formato cônico e o desenvolvimento de maiores fissuras, com a divisão do corpo de prova em partes que permanecem unidas por meio das fibras. Dependendo do teor de fibras no concreto, a relação entre o TCOD e o deslocamento axial é diferente. À medida que se aumenta o teor de fibras, o estágio 2 tende a ficar menos notável, com o valor do TCOD ficando próximo de 0 também neste estágio. Após a estabilização das fissuras, se inicia o estágio 3 (PUJADAS *et al.*, 2013).

O estágio 3 (Figura 24 (c)) é marcado pelo mecanismo cinemático que envolve o deslizamento entre a cunha cônica e a amostra fragmentada. Neste trecho, os fragmentos da amostra se mantêm unidos por meio das fibras, que atuam como ponte de transferência de tensões, proporcionando o desenvolvimento da resistência residual. O deslocamento axial no momento de aplicação da carga provoca um deslocamento lateral no corpo de prova. Por meio da geometria da cunha cônica formada e considerando que o número de grandes fissuras seja facilmente identificável, contribuindo igualmente para o aumento do perímetro radial da amostra, é possível se encontrar uma relação entre o TCOD e o deslocamento axial (PUJADAS *et al.*, 2013).

Figura 24 – Estágios do mecanismo de fratura da amostra no ensaio Barcelona



Fonte: Pujadas *et al.* (2013).

As equações que relacionam o TCOD e o deslocamento axial nos três estágios estão dispostas na Tabela 7. Maiores detalhes a respeito das equações podem ser obtidos em Pujadas *et al.* (2013).

Tabela 7 – Correlações entre TCOD e deslocamento axial

Estágio	Equação
1	$TCOD = 0$
2	$TCOD = n \frac{a \delta_{R,0}}{2l} \operatorname{sen} \frac{\pi}{n} \left(1 - \frac{F}{F_{cr}} \right)$
3	$TCOD = n \frac{a}{2l} \operatorname{sen} \frac{\pi}{n} \left(\delta - \delta_{R,0} \frac{F_{R,0}}{F_{cr}} \right)$

Nota:

TCOD = aumento do perímetro do cilindro;

n = número de fissuras formadas;

a = diâmetro da cunha;

l = comprimento da cunha;

F = carga em determinado ponto do estágio 2;

F_{cr} = carga de ruptura;

$F_{R,0}$ = carga referente ao ponto de início da resistência residual;

δ = deslocamento em determinado ponto do estágio 3;

$\delta_{R,0}$ = deslocamento referente ao ponto de início da resistência residual.

Fonte: Pujadas *et al.* (2013).

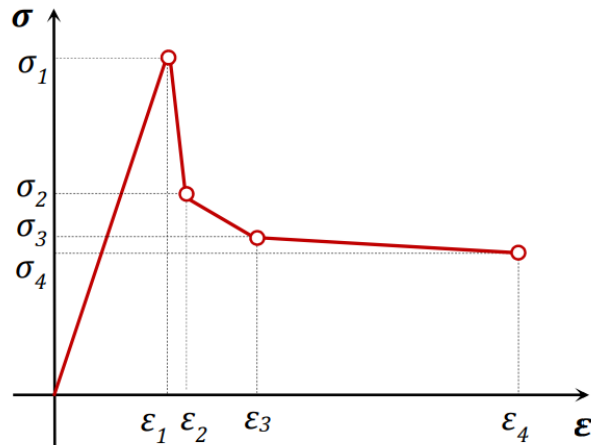
Para a validação das equações da Tabela 7, Pujadas *et al.* (2013) utilizaram resultados do ensaio Barcelona realizado em amostras de concreto reforçado com fibras de aço, de concreto reforçado com fibras de polipropileno e de concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras de aço. As curvas TCOD *versus* deslocamento axial e carga *versus* TCOD obtidas experimentalmente ficaram próximas das curvas resultantes do modelo proposto de conversão do deslocamento axial em TCOD. Os valores de tenacidade obtidos experimentalmente, considerando o TCOD, foram comparados com os valores de tenacidade obtidos tanto utilizando as equações do Tabela 7 quanto por meio da formulação empírica apresentada por Malatesta, De Cea e Borrell (2012). Enquanto a tenacidade determinada por meio da formação de Pujadas *et al.* (2013) apresentou um erro médio de 6,7% em relação aos valores obtidos experimentalmente, a formulação desenvolvida por Malatesta, De Cea e Borrell (2012) possuiu um erro consideravelmente maior, de 51,1%.

2.5.1.2 Modelo constitutivo

Várias normas internacionais apresentam modelos constitutivos para representar o comportamento do CRF, cujos parâmetros são definidos a partir de ensaios de flexão. Para representar o comportamento do CRF no ensaio Barcelona e possibilitar a utilização deste

ensaio no dimensionamento de estruturas, Blanco (2013) propôs um modelo constitutivo baseado em um diagrama multilinear σ - ε (Figura 25), cujas equações para os valores de deformação e de tensão estão dispostas na Tabela 8. Maiores informações a respeito do desenvolvimento das equações das tensões estão dispostas em Blanco (2013).

Figura 25 – Diagrama multilinear σ - ε para representação do comportamento do concreto no ensaio Barcelona



Fonte: Blanco (2013).

Tabela 8 – Equações para representação do comportamento do concreto no ensaio Barcelona

Deformação	Tensão
$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_{cm}}$	$\sigma_1 = \frac{F_{p\max}}{2\pi A} \times \frac{\cos \beta - \mu_k \operatorname{sen} \beta}{\operatorname{sen} \beta + \mu_k \cos \beta}$
$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + 0,1\%_0$	$\sigma_2 = \frac{F_{p\Delta\delta P2}}{2\pi A} \times \frac{\cos \beta - \mu_k \operatorname{sen} \beta}{\operatorname{sen} \beta + \mu_k \cos \beta}$
$\varepsilon_3 = 4,0\%_0$	$\sigma_3 = \frac{F_{p\Delta\delta P3}}{2\pi A} \times \frac{\cos \beta - \mu_k \operatorname{sen} \beta}{\operatorname{sen} \beta + \mu_k \cos \beta}$
$\varepsilon_4 = 20\%_0$	$\sigma_4 = \frac{F_{p\Delta\delta P4}}{2\pi A} \times \frac{\cos \beta - \mu_k \operatorname{sen} \beta}{\operatorname{sen} \beta + \mu_k \cos \beta}$

Nota:

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ = tensões pontuais;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$ = deformações pontuais;

$F_{p\max}$ = carga de ruptura do concreto;

$F_{p\Delta\delta P2}, F_{p\Delta\delta P3}, F_{p\Delta\delta P4}$ = cargas referentes às deformações $\varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$, respectivamente;

E_{cm} = módulo de elasticidade médio do concreto;

A = área da superfície radial fissurada;

β = ângulo de fratura;

μ_k = coeficiente de atrito cinético;

Fonte: Blanco (2013).

Para se determinar os valores de $F_{p\Delta\delta P2}$, $F_{p\Delta\delta P3}$ e $F_{p\Delta\delta P4}$, é necessário encontrar a variação de deslocamento $\Delta\delta_p$ relacionada à variação de deformação $\Delta\varepsilon$, segundo a Equação 6.

$$\Delta\delta_p = \frac{\pi \times R \times \Delta\varepsilon}{n \times \text{tg} \beta \times \text{sen} \frac{\pi}{n}} \quad (6)$$

Onde:

R = raio da amostra ensaiada;

$\Delta\varepsilon$ = variação da deformação;

n = número de fissuras.

De acordo com resultados experimentais, Blanco *et al.* (2014) aconselham adotar ε_3 igual a 4,0‰. Já os valores de ε_2 e ε_4 são baseados em guias e normas internacionais que estabelecem modelos constitutivos para o CRF.

2.5.2 Tenacidade em prismas

Um dos ensaios mais utilizados para o controle do concreto reforçado com fibras é o de tenacidade em prismas. Por se tratar de uma representação mais realista das condições em diversas situações práticas e de execução mais simples do que o ensaio de tração direta, este ensaio se tornou popular para avaliação da tenacidade (GOPALARATNAM; GETTU, 1995).

Diversas normas internacionais prescrevem o ensaio de tenacidade em prismas: JSCE-SF4 (JSCE, 1984), ASTM C1609 (ASTM, 2012a), ASTM C1399 (ASTM, 2015) e EN 14651 (UENOR, 2007). As principais diferenças entre estas normas estão associadas ao sistema de controle de carregamento adotado, que pode ser *open-loop* ou *close-loop*, à presença de entalhe na amostra e ao modo de análise dos resultados, que pode estar relacionado à tenacidade e/ou à resistência residual.

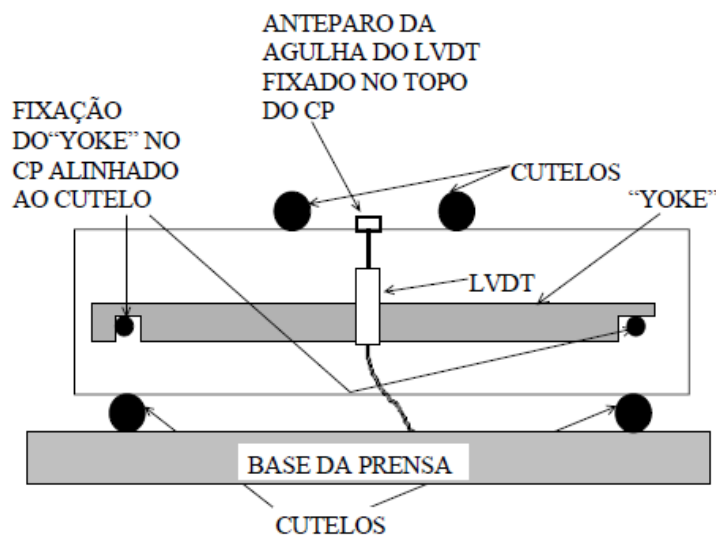
2.5.2.1 Configurações e considerações do ensaio

Um dos ensaios mais utilizados no Brasil para avaliar o desempenho do concreto quanto à tenacidade a flexão é o prescrito pela norma japonesa JSCE-SF4 (JSCE, 1984). Os corpos de prova a serem ensaiados seguindo esta norma devem ter dimensões 10x10x40 cm para vãos de 30 cm ou 15x15x50 cm para vãos de 45 cm, mantendo o comprimento do vão

igual a três vezes a altura do corpo de prova. Além disso, deve haver compatibilidade entre o tamanho da fibra e as dimensões da peça a ser ensaiada, conforme disposto na JSCE-SF2 (1984). De acordo com tal norma, para fibras com comprimento igual ou menor do que 40 mm, a seção transversal do corpo de prova deve ser de 10x10 cm, enquanto que para fibras com comprimento superior a 40 mm, a seção transversal da peça deve ser de 15x15 cm.

Neste procedimento são utilizados quatro cutelos com rotação livre, dois na face inferior do corpo de prova prismático, representando os apoios, e dois na face superior, a uma distância $L/3$ destes apoios, para aplicação de carga. Ao longo do ensaio há o controle do deslocamento do pistão da máquina e a medida da deflexão do corpo de prova no meio do vão é realizada com um sistema composto por um LVDT (Transformador Linear Diferencial Variável) em cada face lateral do prisma e seu suporte, o qual é denominado *yoke*. Um esquema ilustrativo deste ensaio é exibido na Figura 26.

Figura 26 – Esquema de ensaio de tenacidade à flexão proposto pela JSCE-SF4 (JSCE, 1984)



Fonte: Figueiredo (2000).

Ao final do ensaio, caso a ruptura ocorra fora do terço médio do vão do corpo de prova, o resultado da amostra deve ser descartado. A partir dos resultados obtidos, é possível calcular a resistência à flexão (Equação 7) e o fator de tenacidade do compósito.

$$\sigma_b = \frac{Pl}{bh^2} \quad (7)$$

Onde:

σ_b = módulo de ruptura do compósito (MPa);

P = carga máxima (N);

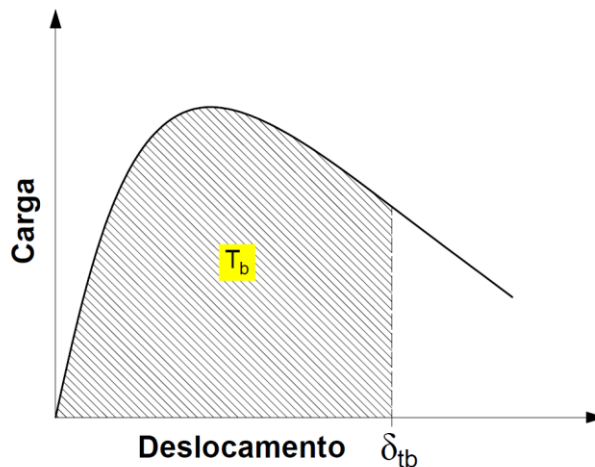
l = comprimento do vão (mm);

b = largura do corpo de prova (mm);

h = altura do corpo de prova (mm).

A tenacidade à flexão é determinada a partir da área sob a curva carga *versus* deslocamento até um deslocamento igual a L/150, conforme ilustrado na Figura 27. O fator de tenacidade à flexão pode ser calculado conforme a Equação 8.

Figura 27 – Tenacidade à flexão a partir da curva carga versus deslocamento



Fonte: Adaptado de JSCE-SF4 (1984).

$$\overline{\sigma}_b = \frac{T_b l}{\delta_{tb} b h^2} \quad (8)$$

Onde:

$\overline{\sigma}_b$ = fator de tenacidade à flexão (MPa);

T_b = tenacidade à flexão (área sob a curva carga *versus* deslocamento até o deslocamento δ_{tb} , em J ou N.m);

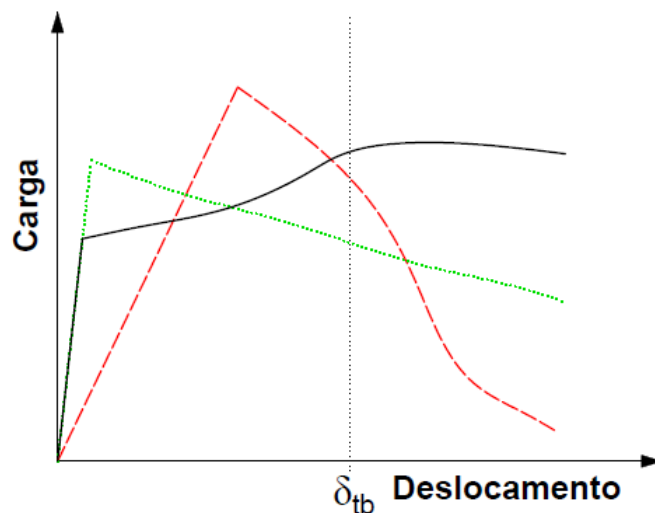
δ_{tb} = deslocamento de valor igual a L/150 (m).

Em procedimentos mais antigos, a medida do deslocamento era obtida por meio do

deslocamento do pistão da máquina de ensaio. Desta forma, deslocamentos relacionados à acomodação do suporte, à baixa rigidez da máquina de ensaio ou à rigidez do instrumento de medição de deflexão (LVDT) podiam estar inclusos no valor do deslocamento final fornecido pelo equipamento, interferindo nos resultados finais (SIVAKUMAR; SOUNTHARARAJAN, 2013).

O modelo de ensaio proposto pela norma japonesa apresenta algumas limitações, como a influência das dimensões do corpo de prova e da idade do concreto, até que este complete 60 dias, nos parâmetros de tenacidade (BENTUR; MINDESS, 2007). A deflexão do ponto final ($L/150$) é maior do que as deflexões aceitáveis em serviço, fugindo da representação real do comportamento da peça em serviço (SIVAKUMAR; SOUNTHARARAJAN, 2013). Além disso, o fator de tenacidade calculado não diferencia o comportamento das regiões pré-pico e pós-pico. Tal fato pode ser observado na Figura 28, na qual compósitos com diferentes comportamentos de curvas carga *versus* deslocamento possuem o mesmo fator de tenacidade segundo a JSCE-SF4 (JSCE, 1984).

Figura 28 – Compósitos com fator de tenacidade semelhantes de acordo com o critério da norma JSCE-SF4 (1984)

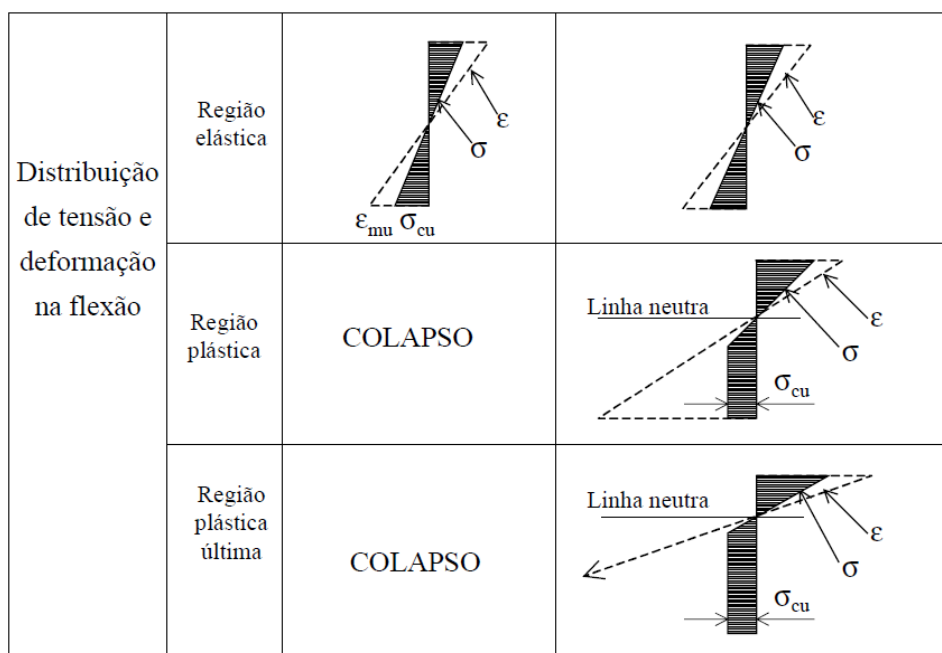


Fonte: Adaptado de Figueiredo (2000).

O fator de tenacidade proposto pela norma japonesa é fundamentado no comportamento elástico do compósito pós-fissuração, quando na realidade há um comportamento quase plástico da região tracionada do compósito, na qual as fibras agem como pontes de transferência de tensão nas fissuras (FIGUEIREDO, 2000; HANNANT, 2003). Este

comportamento distinto entre material elástico e material elastoplástico pode ser verificado na Figura 29.

Figura 29 – Distribuição de tensão e deformação na flexão para materiais elásticos e elastoplásticos



Fonte: Adaptado de Figueiredo (2000), Bentur e Mindess (2007).

Uma das vantagens apresentada por este método é que são utilizadas deflexões elevadas para o cálculo do fator de tenacidade, havendo pouca influência da região de instabilidade pós-pico no resultado. Ademais, não é considerado o deslocamento vertical referente à primeira fissura na determinação do fator de tenacidade (VILLARES, 2001).

Outro método utilizado para avaliar a tenacidade à flexão de prismas de concreto reforçado com fibras é prescrito pela norma americana ASTM C1609 (ASTM, 2012a), no qual são adotadas dimensões de corpo de prova e sistema de carregamento similares ao proposto pela norma japonesa. No entanto, exige-se um sistema de controle de carregamento fechado, em que o controle da velocidade de carregamento ocorre por meio da medida do deslocamento no centro do prisma.

A menor dimensão do corpo de prova deve medir pelo menos três vezes o maior comprimento de fibra. A velocidade de carregamento depende das dimensões do corpo de prova e do seu nível de deformação. Na Tabela 9 são apresentadas as velocidades de carregamento que devem ser adotadas para cada situação específica, conforme estabelecido na ASTM C1609 (ASTM, 2012a).

Tabela 9 – Velocidade de carregamento a ser aplicada de acordo com dimensões do corpo de prova

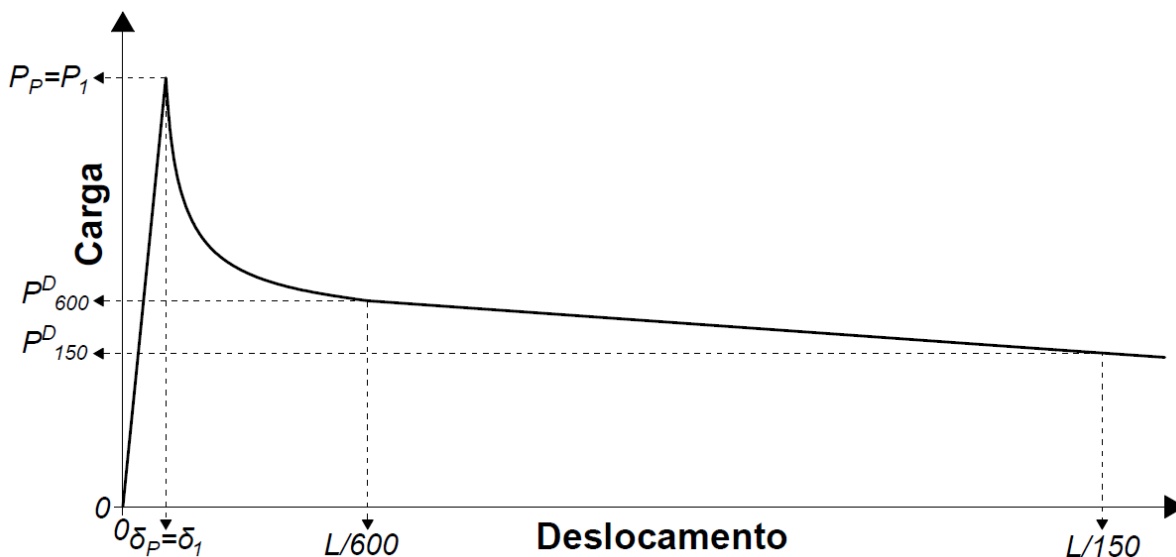
Dimensões do corpo de prova (cm)	Até o deslocamento de L/900	Após o deslocamento de L/900
100 x 100 x 350	0,025 a 0,075 mm/min	0,05 a 0,20 mm/min
150 x 150 x 500	0,035 a 0,10 mm/min	0,05 a 0,30 mm/min

Fonte: ASTM C1609 (2012a).

No início da execução do ensaio, a velocidade de carregamento exigida é menor, pois busca-se uma minimização do efeito da instabilidade pós-pico, que pode ocorrer nesta fase de carregamento, quando o compósito começa a manifestar um comportamento elastoplástico. Para deslocamentos superiores à L/900, espera-se que não haja regiões de instabilidade, o que justifica a adoção de uma velocidade de carregamento do incremento de deflexão maior (FIGUEIREDO *et al.*, 2012).

O ensaio deve continuar até que se obtenha um deslocamento do corpo de prova de, pelo menos, L/150. A partir da curva carga *versus* deslocamento, são determinados o módulo de ruptura do material, as resistências residuais para deflexões iguais a L/600 e L/150 e a relação de resistência à flexão equivalente. Um exemplo de curva carga *versus* deslocamento com os principais parâmetros a serem avaliados por esse método de ensaio é exibido na Figura 30.

Figura 30 – Curva carga por deslocamento com principais parâmetros destacados



Fonte: Adaptado de ASTM C1609 (2012a).

O módulo de ruptura é determinado de modo similar ao disposto na norma japonesa. As resistências residuais também são calculadas utilizando a Equação 7, diferindo desta por adotar as cargas residuais P_{600}^D e P_{150}^D , determinadas para deflexões iguais a L/600 e L/150, respectivamente. Já o cálculo da relação de resistência à flexão equivalente é feito de acordo com a Equação 9, que considera a tenacidade do compósito e a resistência relacionada à primeira carga de pico.

$$R_{T,150}^D = \frac{150T_{150}^D}{f_1bd^2} \times 100\% \quad (9)$$

Onde:

$R_{T,150}^D$: relação de resistência à flexão equivalente (%);

T_{150}^D : tenacidade do compósito, medida a partir da área sob a curva carga *versus* deslocamento do início do deslocamento até o valor de L/150;

f_1 : resistência residual referente à primeira carga de pico;

b : largura do corpo de prova;

d : altura do corpo de prova.

Além da dimensão do corpo de prova e da técnica de medida do deslocamento, outros fatores que influenciam na tenacidade à flexão em prismas são o sistema de carregamento e a presença de entalhe nas amostras. O ensaio de flexão a quatro pontos é o mais utilizado nos procedimentos normativos por não envolver técnicas muito sofisticadas. No entanto, possui a dificuldade de medir o valor da deflexão no eixo neutro, já que há um aumento da região fletida no decorrer do ensaio. Por proporcionar um trecho de flexão pura, com momento fletor constante, ao longo da amostra, há uma certa flexibilidade para o cálculo da resistência à tração na flexão. Em ensaios realizados em amostras com entalhe, a fissura se propaga na região do entalhe, com praticamente toda a energia sendo absorvida no plano do entalhe, com a vantagem de se obter a resposta do material a partir desta energia absorvida (SIVAKUMAR; SOUNTHARARAJAN, 2013). No entanto, predefinindo-se a direção da fissura, esta pode se propagar ao longo de um plano mais resistente à flexão do que outros planos da viga (MONTAIGNAC *et al.*, 2011).

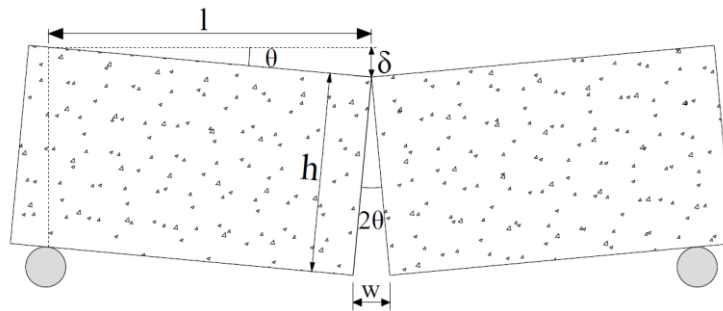
Os ensaios de flexão são questionáveis por alguns autores, pois a dispersão e

orientação das fibras são alteradas pelo processo de moldagem. Além disso, a orientação e a distribuição das fibras em elementos delgados são diferentes de uma viga. Com isso, os ensaios de flexão em prismas, com seção quadrada, acabam não representando o comportamento das fibras em um elemento de pequena espessura. A escolha do ensaio a ser executado envolvendo o concreto reforçado com fibras deve ser de acordo com a aplicação para a qual se destina o material (DI PRISCO; PLIZZARI; VANDEWALLE, 2009).

Nos ensaios de tenacidade em prismas de concreto reforçado com fibras de aço, Andrade (2013) verificou a ocorrência de um “efeito parede”, ou seja, alinhamento das fibras nas paredes do molde. Isto melhora a capacidade das fibras de dificultar a propagação de fissuras, maximizando a carga de suporte da estrutura.

Varona (2011) apresenta a equivalência entre o deslocamento vertical e a abertura de fissura registrada em determinada amostra, possibilitando comparar resultados obtidos a partir de diferentes procedimentos normativos. No que se refere ao ensaio de flexão em quatro pontos, conforme mostrado na Figura 31, é possível relacionar o deslocamento vertical com a abertura de fissura de acordo com o ângulo de rotação (Equação 10).

Figura 31 – Esquema do deslocamento vertical e da abertura de fissura em um ensaio de flexão em quatro pontos



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

$$\theta = \frac{\delta}{l} = \frac{w/2}{h} \Rightarrow w = \frac{2h\delta}{l} \quad (10)$$

Para o ensaio de flexão em prismas de concreto realizado de acordo com as normas JSCE-SF4 (JSCE, 1984) e ASTM C1609 (ASTM, 2012a), l e h são iguais a 22,5 cm e 15 cm, respectivamente. Desta forma, a relação entre a abertura de fissura e o deslocamento vertical fica reduzida à Equação 11.

$$w = 1,33 \times \delta \quad (11)$$

2.5.2.2 Modelo constitutivo

Existem vários modelos constitutivos compostos por curvas σ - ε (tensão-deformação) e σ - w (tensão-abertura de fissura) para representar o comportamento do CRF. Alguns modelos são fundamentados em abordagens indiretas, cujos parâmetros necessitam de dados experimentais, situação considerada mais comum, enquanto outros se baseiam em abordagens diretas, fornecendo as curvas a partir das propriedades dos materiais constituintes (BLANCO *et al.*, 2013).

Alguns modelos constitutivos europeus para representação do comportamento do CRF são apresentados na Tabela 10. A norma alemã DBV *Merkblatt Stahlfaserbeton* (Deutscher Beton-und Bautechnik-Verein e.V., 2001) foi a primeira a estabelecer um modelo constitutivo σ - ε para representar o comportamento do CRF. Tal norma recomenda a utilização de um diagrama trilinear para analisar o Estado Limite de Serviço (ELS) e de um diagrama bilinear ou retangular para o Estado Limite Último (ELU). Na determinação das tensões são considerados fatores de segurança (γ_{ct}^f) e coeficientes relacionados ao comportamento da resistência a longo prazo (α_c^f) e ao efeito tamanho do corpo de prova (α_{sys}).

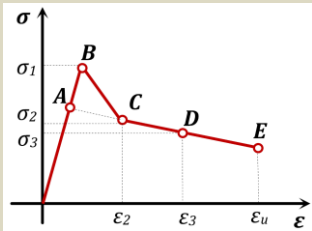
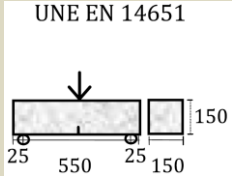
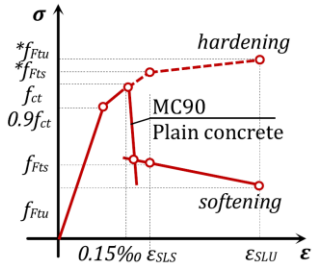
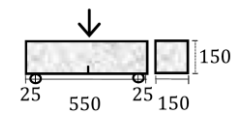
O RILEM TC 162-TDF (RILEM, 2003) apresenta um diagrama trilinear σ - ε , em que são considerados a resistência à tração na flexão e as resistências residuais, obtidas em um ensaio de flexão a três pontos, como parâmetros para a determinação das tensões para representação do comportamento do CRF. Além disto, também é adotado um coeficiente referente ao efeito tamanho do corpo de prova.

Na norma italiana *Commissione di studio per la predisposizione e l'analisi di norme tecniche relative alle costruzioni* CNR-DT 204 (CNR, 2006) estão dispostos um modelo linear-elástico e um modelo rígido-plástico para caracterizar o comportamento à tração do CRF. Enquanto o modelo elástico-linear é aplicado para os ELU e ELS, o modelo rígido-plástico é destinado para representar o comportamento do material apenas no ELU. Além disso, a norma diferencia o comportamento *softening* do *hardening*, refletindo no valor da deformação última adotada (ε_u).

Tabela 10 – Modelos constitutivos europeus para representação do comportamento do CRF (continua)

Diagrama	Parâmetros	Ensaio de caracterização	Norma
	$\sigma_1 = f_{eq,ctd,II} = f_{eq,ctk,II} \cdot \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f \leq f_{eq,ctd,I}$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = 10\%$		DBV
	$\sigma_1 = f_{Ftu} = f_{eq2}/3$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = [20\% \text{ softening}; 10\% \text{ hardening}]$		CNR-DT 204
	$\sigma_1 = f_{ctRd} = 0,33 f_{R,3,d}$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = [20\% \text{ flexão}; 10\% \text{ tração}]$		EHE
	$\sigma_1 = f_{Ftu} = f_{R3}/3$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = [20\% \text{ softening}; 10\% \text{ hardening}]$		MC
	$\sigma_1 = f_{eq,ctd,I} = f_{eq,ctk,I} \cdot \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f$ $\sigma_2 = f_{eq,ctd,II} = f_{eq,ctk,II} \cdot \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f \leq f_{eq,ctd,I}$ $\epsilon_2 = \epsilon_u = 10\%$ $\sigma_1 = f_{Fts} = 0,45 f_{eq1}$ $\sigma_2 = f_{Ftu} = k [f_{Fts} - (w_u/w_{i2})(f_{Fts} - 0,5 f_{eq2} + 0,2 f_{eq1})]$ $k = [0,7 - \text{tração pura}; 1 - \text{outros casos}]$ $\epsilon_2 = \epsilon_u = [20\% \text{ softening}; 10\% \text{ hardening}]$		DBV
			CNR-DT 204
	$\sigma_1 = f^{cd} = \alpha_c^f \cdot f_{ctk,fl} / \gamma_{ct}^f$ $\sigma_2 = f_{eq,ctd,I} = f_{eq,ctk,I} \cdot \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f$ $\sigma_3 = f_{eq,ctd,II} = f_{eq,ctk,II} \cdot \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f \leq f_{eq,ctd,I}$ $\epsilon_1 = \sigma_1 / E_{HRF}; \epsilon_2 = \epsilon_1 + 0,1\%; \epsilon_3 = \epsilon_u = 10\%$ $\sigma_1 = 0,7 f_{ctm,fl} (1,6-d)$ $\sigma_2 = 0,45 \cdot \kappa_h \cdot f_{R,1}$ $\sigma_3 = 0,37 \cdot \kappa_h \cdot f_{R,4}$ $\epsilon_1 = \sigma_1 / E_{HRF}; \epsilon_2 = \epsilon_1 + 0,1\%; \epsilon_3 = \epsilon_u = 25\%$		DBV
			RILEM

Tabela 10 – Modelos constitutivos europeus para representação do comportamento do CRF
(conclusão)

Diagrama	Parâmetros	Ensaio de caracterização	Norma
	$\sigma_1 = f_{ct,d} = 0,6 f_{ct,fl,d}$ $\sigma_2 = f_{ctR1,d} = 0,45 f_{R,1,d}$ $\sigma_3 = f_{ctR3,d} = k_1(0,5 f_{R,3,d} - 0,2 f_{R,1,d})$ $\epsilon_2 = 0,1 + 1000 \cdot f_{ct,d} / E_{c,0}$ $\epsilon_3 = 2,5 / l_{cs}$ $\epsilon_u = [20\% \text{ flexão}; 10\% \text{ tração pura}]$		EHE
	$f_{ctm} = f_{ctk0,m} (f_{ck} / f_{ck0})^{2/3} = 0,3 \cdot (f_{ck})^{2/3}$ $f_{Fts} = 0,45 f_{R1}$ $f_{Ftu} = k [f_{Fts} - (w_u / CMOD_3) (f_{Fts} - 0,5 f_{R3} + 0,2 f_{R1})]$ $\epsilon_{SLS} = CMOD_1 / l_{cs}$ $\epsilon_{SLU} = w_u / l_{cs} = \min(\epsilon_{Fu}, 2,5 / l_{cs} = 2,5 / y)$ $\epsilon_{Fu} = [20\% \text{ softening}; 10\% \text{ hardening}]$		MC

Fonte: Blanco *et al.* (2013)

A norma espanhola EHE-08 (MFE, 2010) estabelece um diagrama σ - ϵ retangular, que pode ser utilizado para representação do ELU do CRF, e um outro diagrama multilinear para análises mais precisas. Os parâmetros são definidos a partir de um ensaio de flexão a três pontos. No entanto, podem ser utilizados outros ensaios para caracterizar o comportamento do CRF submetido à tração. Para calcular a deformação ϵ_3 , é considerado o comprimento característico l_{cs} , que corresponde ao menor valor entre o espaçamento médio entre as fissuras e a altura da linha neutra. Já a deformação última ϵ_u fica em função do esforço solicitante, sendo de 20‰ para flexão e de 10‰ para tração pura.

Assim como a norma italiana CNR-DT 204 (CNR, 2006), o *fib* Model Code (FIB, 2010) propõe modelos simplificados rígido-plástico e elástico-linear de diagrama tensão-abertura de fissura para representar o comportamento do CRF, diferenciando o comportamento *softening* do *hardening*. A partir de um ensaio de flexão a três pontos são determinadas as resistências residuais à tração na flexão. Enquanto w_u (máxima abertura de fissura aceitável no projeto estrutural) tem valor fixo e igual a 2,5 mm no modelo rígido-plástico, o valor de w_u

pode variar no modelo linear-elástico, dependendo da ductilidade requerida, mas sempre com valor máximo de 2,5 mm. Para materiais com comportamento *softening*, considera-se a deformação última (ϵ_u ou ϵ_{Fu}) igual a 20‰, enquanto que nos materiais com comportamento *hardening*, tal deformação fica 10‰. O fator K é um dos aspectos que diferencia o *fib* Model Code (FIB, 2010) das demais normas, estando relacionado à distribuição e orientação das fibras.

2.5.3 Tenacidade em placas

O ensaio de tenacidade em placas foi desenvolvido com o objetivo de possibilitar uma avaliação comparativa do desempenho do concreto reforçado com fibras com o concreto reforçado com telas metálicas (FIGUEIREDO, 2000). Esta avaliação se torna interessante em casos de revestimento de túneis e lajes sobre solos, nos quais há a possibilidade da substituição do sistema de reforço convencional com telas metálicas pelo reforço com fibras.

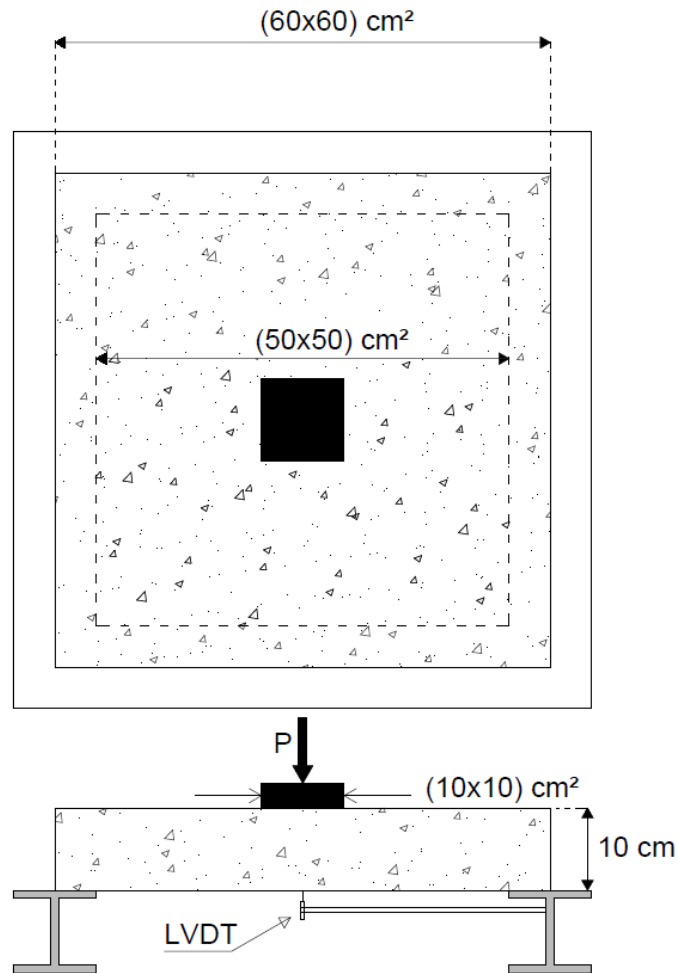
O ensaio tradicional de punção em placas foi prescrito pela *European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures* (EFNARC) em 1996. Apesar da grande dificuldade de sua execução, devido ao grande peso da placa e a frequente possibilidade de apresentar deformações, o que prejudica as condições de continuidade dos apoios, ainda é o ensaio mais utilizado no Brasil (FIGUEIREDO, 2011).

Além da EFNARC (1996), a ASTM C1550-12a (ASTM, 2012b) também descreve um método de ensaio de tenacidade em placas, sendo estas de formato circular, enquanto que as placas do ensaio da recomendação da entidade europeia devem ser quadradas. Há ainda o ensaio de flexão a três pontos em uma placa quadrada com entalhe, proposto pela EFNARC (2011), em que é medida a abertura de fissura com a aplicação da carga.

2.5.3.1 Configurações e considerações do ensaio

De acordo com a EFNARC (1996), a placa a ser ensaiada deve ter seção quadrada, com dimensões mínimas de 600x600x100 mm, e apoiada nos quatro lados, com vão central de 500 mm, conforme ilustrado na Figura 32. A carga deve ser aplicada no centro da placa utilizando uma superfície de contato de 100x100 mm.

Figura 32 – Esquema do ensaio de punção em placas proposto pela EFNARC (1996)

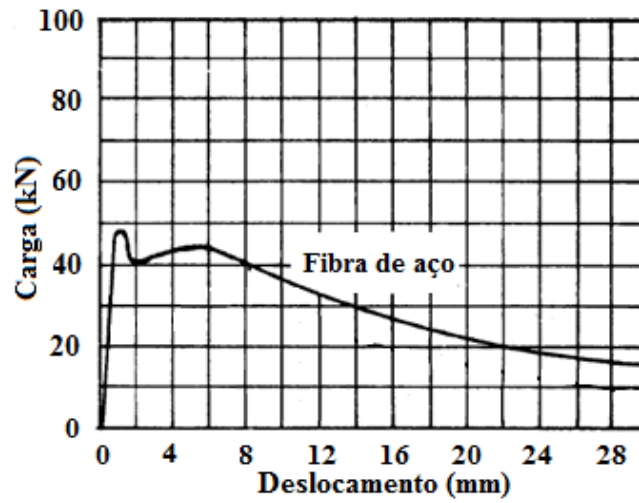


Fonte: Adaptado de Figueiredo (2000).

É sugerido que o lado áspero da placa seja posicionado para baixo, oposto ao lado em que a força é aplicada. No entanto, Figueiredo (2011) recomenda o contrário, ou seja, que a face lisa da placa seja apoiada, já que a placa pode apresentar deformações superficiais, influenciando nos valores das leituras de deslocamento. O ensaio só deve ser finalizado após registrar um deslocamento de 25 mm no centro da placa.

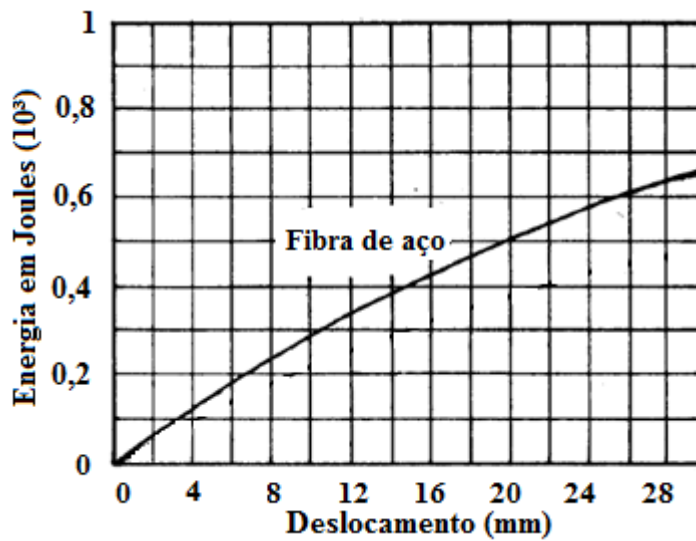
Por fim, é plotada a curva carga *versus* deslocamento com a deflexão variando até 25 mm (Figura 33). A partir da integração da área sob esta curva, uma segunda curva é elaborada referente à energia absorvida no deslocamento (Figura 34). De acordo com a energia absorvida até a deflexão de 25 mm, a tenacidade do compósito é classificada de acordo com a Tabela 11.

Figura 33 – Exemplo de curva de carga por deslocamento



Fonte: Adaptado de EFNARC (1996).

Figura 34 – Exemplo de curva de energia por deslocamento



Fonte: Adaptado de EFNARC (1996).

Tabela 11 – Classificação da tenacidade do compósito

Classificação da tenacidade	Energia absorvida até o deslocamento de 25mm (Joules)
a	500
b	700
c	1000

Fonte: EFNARC (1996).

Morgan³ (1998 *apud* PAPWORTH, 2002) apresenta algumas aplicações para o concreto projetado reforçado com fibra de aço de acordo com a classificação da tenacidade proposta pela EFNARC (1996):

- *Classe A*: Deve ser utilizado em locais onde a possibilidade de fissuração devido à tensão e ao movimento é baixa, com as fibras atuando principalmente no controle de fissuras de origem térmica e de retração;

- *Classe B*: Adequado para rochas relativamente estáveis ou túneis com tensões e movimento relativamente baixos, cujo potencial de fissuração do revestimento de concreto seja menor em relação ao do concreto da Classe C;

- *Classe C*: Adequado para situações com severos movimentos de terra, em que há uma maior possibilidade de ocorrência de fissuração do revestimento. Neste caso, pode ser necessário a utilização de parafusos de rocha e parafusos de cabo como suportes adicionais.

Em estudo realizado por Di Prisco, Plizzari e Vandewalle (2009), os valores de cargas residuais obtidos de ensaios em placas apresentaram uma menor variação quando comparados aos resultados dos ensaios em prismas. Isto ocorreu devido a habilidade que as placas possuem de redistribuir as tensões e pelo maior volume de material da amostra, gerando uma mistura mais homogênea.

Montaignac *et al.* (2011) analisaram resultados obtidos de ensaios em placas circulares, em prismas com entalhe e em corpos de prova cilíndricos submetidos à tração direta. Foi verificado que, para aberturas de fissura maiores do que 1,0 mm, as placas circulares apresentaram valores de tensões residuais menores do que os outros dois tipos de amostra. Isto pode ter sido causado pela natureza bidimensional da dispersão das fibras e sua maior homogeneidade na mistura. Além disso, neste ensaio, as fissuras ficaram livres para se formar ao longo dos planos mais fracos da amostra. As amostras que apresentaram uma maior região fissurada, como as placas, também tiveram uma menor variação dos resultados.

2.5.3.1 Modelo constitutivo

A maioria dos modelos constitutivos para representação do comportamento do CRF utilizam parâmetros obtidos a partir do ensaio de tenacidade em prismas. Tais modelos podem ser utilizados em análises de elementos estruturais com diferentes dimensões, como é o caso das placas.

³ MORGAN, D. R. *Agra Earth & Environmental Communication to Bekaert NV*, 1998.

Pujadas *et al.* (2014a) analisaram o desempenho de lajes de diferentes dimensões reforçadas com fibras poliméricas, com condições de apoio hiperestáticas e submetidas a aplicação de uma carga central. Os resultados obtidos experimentalmente foram comparados aos resultados de simulações numéricas realizadas com um software de elementos finitos e adotando modelos constitutivos do RILEM TC 162-TDF (RILEM, 2003) e do EHE-08 (MFE, 2010). As metodologias propostas por ambas instituições de pesquisa apresentaram resultados superestimados, com o erro relativo à carga máxima aumentando com o emprego de lajes de maiores dimensões transversais. Além disso, os erros do RILEM TC 162-TDF (RILEM, 2003) foram relativamente maiores do que os erros do EHE-08 (MFE, 2010), o que pode estar relacionado às maiores resistências à tração, resistências residuais e deformação última (ϵ_u) obtidas a partir das equações estabelecidas pela instituição.

A orientação das fibras e as condições isostáticas dos ensaios padrões em vigas não reproduzem a capacidade de redistribuição de tensão que as lajes apresentam quando submetidas a condições de apoio hiperestáticas como resultado das fibras. No ensaio de vigas, as fibras tendem a se alinhar ao longo do eixo longitudinal, perpendicularmente, e então mais favoravelmente à abertura de fissuras. Como consequência, os ensaios de flexão em vigas conduzem a uma maior capacidade resistente da seção quando comparadas às lajes, em que a orientação das fibras com relação às fissuras não é tão favorável (PUJADAS *et al.*, 2014a).

Pujadas *et al.* (2014b) realizaram um estudo paramétrico das lajes de concreto reforçado com fibras poliméricas analisadas por Pujadas *et al.* (2014a) e, por meio de um processo iterativo, propuseram valores para os parâmetros σ_2 , ϵ_2 e σ_3 , enquanto que os parâmetros σ_1 , ϵ_1 e σ_3 foram definidos de acordo com EHE-08 (MFE, 2010). O valor da carga de ruptura teve maior influência de σ_2 e, em lajes com maiores dimensões, também foi influenciada por ϵ_2 . Já a variável σ_3 apresentou um efeito mais significativo no comportamento residual do que na carga máxima. A adoção de $\sigma_2=0,2\sigma_1$ e de ϵ_2 entre 0,1‰ e 0,3‰ forneceram valores próximos aos resultados experimentais.

Dois coeficientes geométricos foram propostos por Pujadas *et al.* (2014b) para serem aplicados aos modelos constitutivos da EHE-08 (MFE, 2010) e melhorar a representação do desempenho das lajes de concreto reforçado com fibras poliméricas. O primeiro coeficiente, ψ , está relacionado ao desenvolvimento radial de fissuras junto à orientação perimetral das fibras, que é mais vantajoso com o aumento da relação largura/comprimento da laje, conduzindo a maiores capacidades de suporte. Desta forma, ψ representa o aumento da resistência residual (σ_3) associado à geometria das lajes e é determinado pela Equação 12.

$$\begin{cases} \psi = 1 & \left(\frac{b}{l}\right) \leq 0,5 \\ \psi = -0,5\left(\frac{b}{l}\right)^2 + \frac{b}{l} + 0,6 & \left(\frac{b}{l}\right) > 0,5 \end{cases} \quad (12)$$

Onde:

b = largura da laje;

l = comprimento da laje.

O segundo coeficiente proposto por Pujadas *et al.* (2014b), ζ , busca aproximar os parâmetros dos modelos constitutivos da EHE-08 (MFE, 2010) daqueles obtidos para as lajes. Os coeficientes $\zeta(\sigma_2)$ e $\zeta(\sigma_3)$ são definidos como a razão entre a tensão numérica referente à laje e o valor de tensão original obtida da EHE-08 (MFE, 2010) (Equação 13). A partir dos valores destes coeficientes, é possível calcular σ_2 e σ_3 , gerando diagramas σ - ε para elementos de laje com fibras poliméricas.

$$\begin{cases} (\zeta)_{\sigma_2} = \frac{(\sigma_2)_{LAJE}}{(\sigma_2)_{EHE-08}} \\ (\zeta)_{\sigma_3} = \frac{(\sigma_3)_{LAJE}}{(\sigma_3)_{EHE-08}} \end{cases} \quad (13)$$

Onde:

$(\sigma_2)_{LAJE}$, $(\sigma_3)_{LAJE}$ = tensões pontuais obtidas no ensaio das lajes;

$(\sigma_2)_{EHE-08}$, $(\sigma_3)_{EHE-08}$ = tensões pontuais obtidas de acordo com a EHE-08 (MFE, 2010).

Blanco *et al.* (2015) verificaram o desempenho de lajes de concreto reforçado com fibras de aço, com dimensões similares às lajes analisadas por Pujadas *et al.* (2014a). Diante da divergência entre os resultados experimentais e os obtidos a partir de simulações numéricas utilizando modelos constitutivos do RILEM TC 162-TDF (RILEM, 2003) e da EHE-08 (MFE, 2010), concluiu-se que modelos constitutivos baseados no desempenho de prismas não são adequados para o dimensionamento de lajes de concreto reforçado com fibras de aço. Adotando um diagrama σ - ε trilinear, foi realizado um estudo paramétrico com variação dos parâmetros σ_2 , ε_2 e σ_3 , sendo verificada uma maior influência da variação de σ_2 nos valores da carga máxima e da energia absorvida. Os valores propostos para σ_2 , ε_2 e σ_3 , que apresentaram maior

proximidade com os resultados experimentais, estão dispostos na Tabela 12.

A resposta estrutural da laje também é influenciada pela orientação das fibras. À medida que a relação largura/comprimento da laje aumenta, há uma tendência de orientação favorável das fibras em relação ao plano de fissuração, o que deve ser considerado nas análises de estruturas de concreto reforçado com fibras (BLANCO *et al.*, 2015).

Tabela 12 – Valores dos parâmetros σ_2 , ε_2 e σ_3 para as lajes pequena, média e grande

Laje	σ_2/ σ_1	σ_3/ σ_2	ε_2 (‰)
Pequena (3,0 x 1,5 x 0,2) m	0,40	0,50	$\varepsilon_1 + 0,1$
Média (3,0 x 2,0 x 0,2) m	0,47	0,95	$\varepsilon_1 + 0,1$
Grande (3,0 x 3,0 x 0,2) m	0,57	1,00	$\varepsilon_1 + 0,1$

Fonte: Blanco et al. (2015).

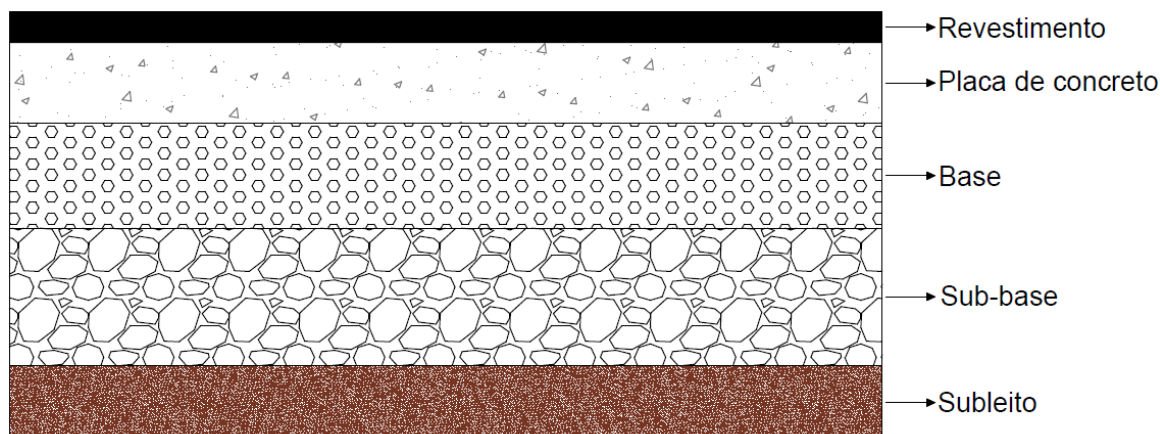
2.6 Aplicação do concreto reforçado com fibras em pisos industriais

Os primeiros estudos teóricos referentes a pisos industriais de concreto foram realizados pelo americano Harold M. Westergaard, em 1920, nos quais foram estabelecidas premissas teóricas para o dimensionamento de placas de concreto no regime elástico. Posteriormente, por volta de 1960, o europeu Anders Losberg apresentou a base teórica para o dimensionamento de placas no limite plástico do concreto. Enquanto as placas dimensionadas de acordo com o critério americano são de elevada rigidez e pequenas dimensões, os pisos industriais dimensionados segundo o critério europeu são mais esbeltos, com placas de maiores dimensões. No Brasil, apenas a partir da década de 1980 houve a difusão destes métodos de dimensionamento, já que os pisos industriais eram pouco solicitados e o revestimento com argamassas de alta resistência apresentava resultados operacionais satisfatórios (RODRIGUES, 2011; RODRIGUES; FARIA; SILVA, 2015).

O piso industrial deve ser analisado como um sistema composto por várias camadas, cujos desempenhos individuais refletem no comportamento global da estrutura. Os principais componentes de um piso industrial são revestimento, placa de concreto, base, sub-base e subleito, conforme mostrado na Figura 35. Além disso, recomenda-se que pisos industriais possuam juntas, permitindo o movimento do concreto decorrente de retração e de variações

térmicas (RODRIGUES, 2011).

Figura 35 – Componentes de um piso industrial



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

No estado fresco, o concreto para piso deve ter um abatimento da ordem de (100 ± 20) mm, como regra geral, e possuir coesão suficiente para evitar a segregação dos seus componentes. No caso do concreto reforçado com fibras, o ensaio de abatimento de tronco de cone pode não ser adequado para avaliar sua trabalhabilidade. Em relação à exsudação, o teor limite é de 3% para pisos, sendo importante destacar que a ocorrência de exsudação prejudica a resistência à abrasão do concreto, visto que há a formação de uma camada superior com uma maior relação água/cimento e, conseqüentemente, com maior porosidade (RODRIGUES, 2010; 2011).

Para controlar a fissuração por retração plástica no concreto podem ser utilizados diferentes tipos de fibras. Rodrigues (2011) afirma que as fibras sintéticas apresentam melhor desempenho, visto que possuem baixo módulo de elasticidade, compatível com a rigidez do concreto nas primeiras idades. No entanto, após analisarem a fissuração de concretos de resistência convencional com teor de 0,1%, em volume, de fibra de aço, de fibra de vidro e de fibra de polipropileno, Rahmani *et al.* (2012) verificaram que o concreto com fibra de aço apresentou melhores resultados, com menores valores de abertura de fissura, constatando que as fibras de aço melhoram a capacidade de deformação por tração do concreto. O concreto com fibras de polipropileno foi o que apresentou pior desempenho.

No estado endurecido, a resistência à abrasão do concreto é influenciada por diversos fatores, como: relação água/cimento, consumo de cimento, acabamento, dentre outros. Desta forma, Rodrigues (2011) recomenda que o concreto para piso industrial possua uma

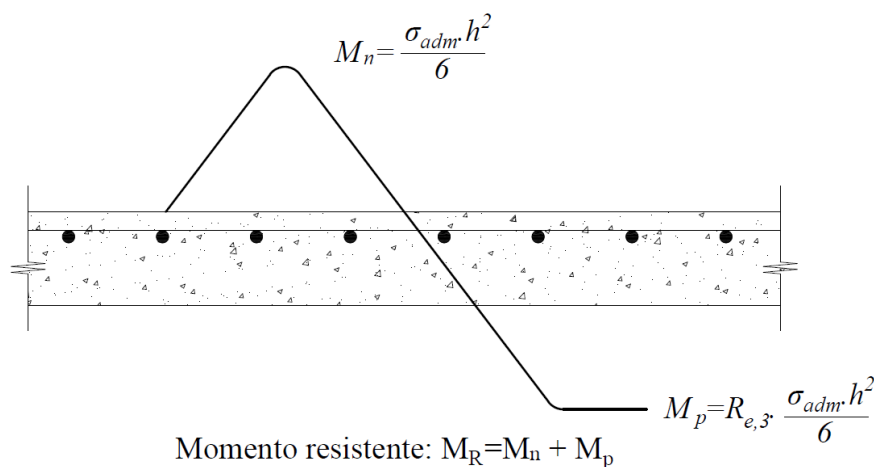
relação água/cimento menor do que 0,55 e um consumo de cimento acima de 325 kg/m³, de modo a possibilitar um adequado acabamento. A adição de fibras de polipropileno também pode trazer melhorias para a resistência à abrasão do concreto, conforme verificado por Horszczaruk (2009) em um concreto de alta resistência. Já a adição de fibras de aço traz mudanças pouco significativas à resistência à abrasão do concreto, principalmente em misturas com maiores relações água/cimento, sendo observado a delaminação das fibras em alguns casos (CHENG *et al.*, 2014).

Diferente do que ocorre na maioria das estruturas, é desejável que o concreto para piso industrial possua baixo módulo de elasticidade, proporcionando uma melhor acomodação da placa na fundação. A fluência também pode ser benéfica em pisos industriais, tornando possível a dissipação de tensões sem que o concreto fissure (RODRIGUES, 2011).

No caso de pisos de concreto reforçado com fibras, outra propriedade importante é a tenacidade, correspondente a capacidade do material em absorver energia. É possível dimensionar placas de acordo com o valor de tenacidade do material, levando em consideração a plastificação do concreto pelo momento positivo e a consequente contribuição do momento negativo para suportar o carregamento (RODRIGUES, 2011).

O dimensionamento de pisos e pavimentos de concreto reforçado com fibras de acordo com o critério da tenacidade foi idealizado por Losberg⁴ (1961 *apud* RODRIGUES; FARIA; SILVA, 2015). Segundo este critério, a capacidade resistente de uma placa sobre meio elástico é determinada pela somatória dos momentos positivo e negativo, conforme ilustrado na Figura 36.

Figura 36 – Representação do momento resistente da placa



Fonte: Adaptado de Rodrigues, Faria e Silva (2015)

⁴ LÖSBERG, A. **Design Methods for Structurally Reinforced Concrete Pavements**. Chalmers Tekniska Högskolas Handlingar, Gothenburg, n. 250, 1961.

O momento negativo é calculado no regime elástico, considerando a não-fissuração do concreto, de acordo com a Equação 14. O valor da tensão admissível à tração do concreto (σ_{adm}) é obtido a partir da resistência média à tração na flexão do concreto ($f_{ct,f}$), considerando um coeficiente de segurança igual a 2,0.

$$M_n = \frac{\sigma_{adm} \times h^2}{6} = \frac{f_{ct,f} \times h^2}{12} \quad (14)$$

Onde:

M_n = momento negativo;

σ_{adm} = resistência admissível à tração na flexão do concreto;

$f_{ct,f}$ = resistência média à tração na flexão do concreto;

h = espessura do piso.

O momento positivo é determinado por meio do fator $R_{e,3}$, obtido no ensaio de tenacidade, segundo a Equação 15.

$$M_p = R_{e,3} \frac{\sigma_{adm} \times h^2}{6} \quad (15)$$

Onde:

M_p = momento positivo.

$R_{e,3}$ = fator relacionado à resistência residual e à resistência à tração do concreto.

O $R_{e,3}$ (Equação 16) corresponde à relação entre a resistência residual média ou fator de tenacidade (Equação 8) e a resistência à tração na flexão do compósito (Equação 7), obtidas a partir do ensaio JSCE-SF4 (JSCE, 1984).

$$R_{e,3} = 100 \times \frac{\overline{\sigma}_b}{\sigma_b} (\%) \quad (16)$$

Por meio da soma do momento positivo (Equação 15) com o momento negativo (Equação 14) se obtém o momento resistente da placa de concreto (Equação 17).

$$M_R = \left(1 + \frac{R_{e,3}}{100} \right) \times \frac{f_{ct,f} \times h^2}{12} \quad (17)$$

Onde:

M_R = momento resistente.

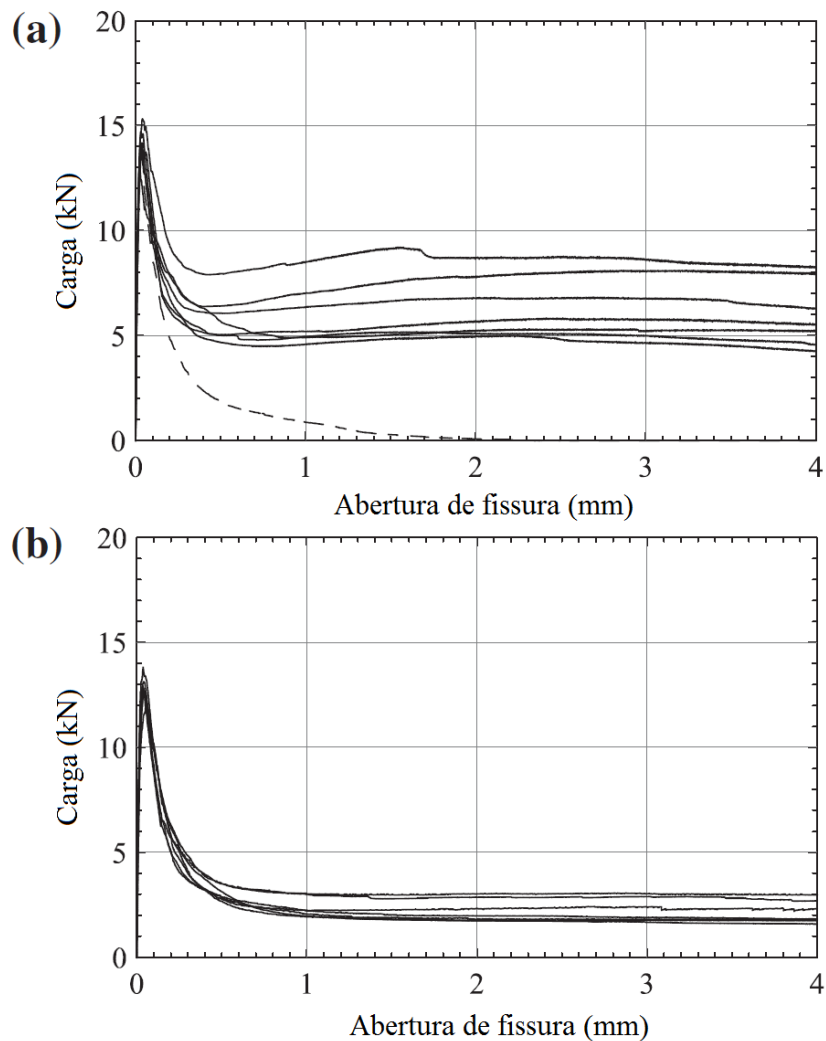
2.7 Estudos pertinentes

Na literatura, já existem alguns estudos envolvendo o desempenho mecânico do concreto reforçado com fibras de aço e do concreto reforçado com macrofibras poliméricas. A seguir são apresentados alguns destes estudos.

2.7.1 *Buratti, Mazzotti e Savoia (2011)*

O comportamento pós-fissuração de uma matriz de concreto reforçado com fibras de aço e com macrofibras poliméricas foi avaliado por Buratti, Mazzotti e Savoia (2011). Foram utilizadas três tipos de fibras poliméricas e um tipo de fibra de aço, as quais foram adicionadas em dois diferentes teores na matriz cimentícia. A partir de ensaios de flexão a três pontos em corpos de prova prismáticos, foi verificado um melhor desempenho das fibras de aço em relação às fibras sintéticas, considerando número de fibras semelhante na região de propagação da fissura. Além disso, as curvas obtidas de carga por abertura de fissura tiveram maior variação entre as amostras com fibras de aço do que entre as amostras com fibras poliméricas, considerando teores semelhantes de fibras adicionadas, como mostrado na Figura 37. Isto aconteceu devido ao maior número e maior homogeneidade das fibras poliméricas em relação às fibras de aço na seção fissurada. Por estes motivos, em elementos com maiores dimensões, como pisos industriais, deveriam ser utilizados outros ensaios, como o ensaio de placa, para obter resultados mais precisos a respeito dos valores de resistência residual.

Figura 37 – Curvas carga *versus* abertura de fissura de amostras de (a) concreto reforçado com fibras de aço e (b) concreto reforçado com macrofibra polimérica

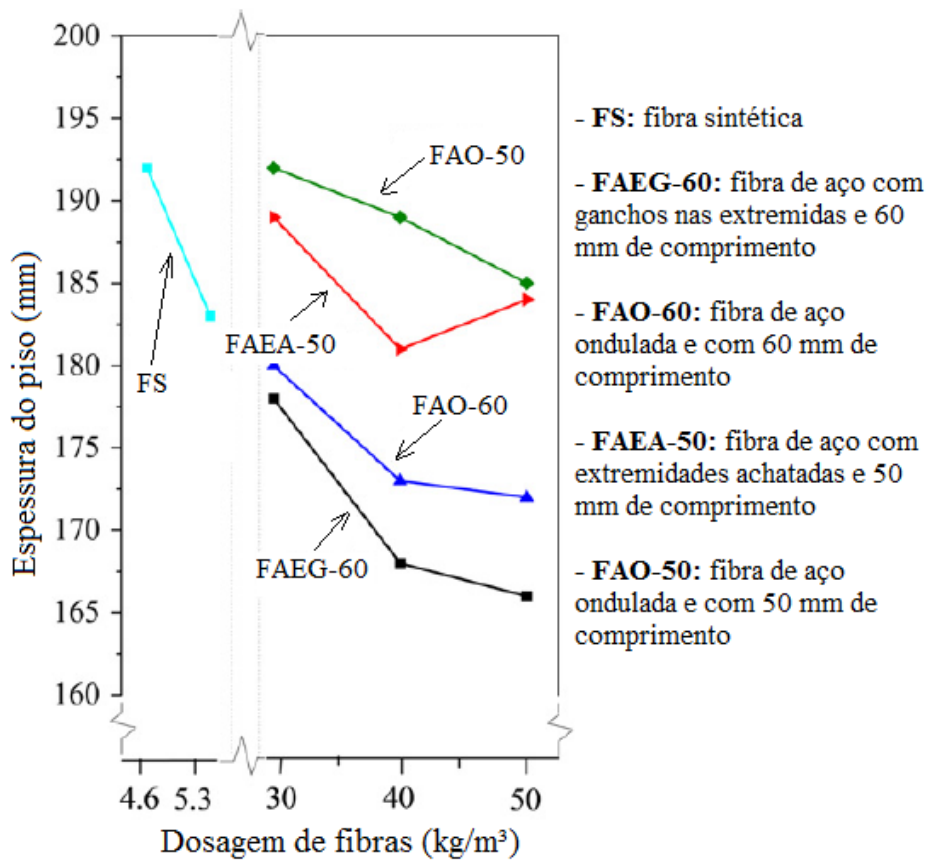


Fonte: Adaptado de Buratti, Mazzotti e Savoia (2011).

2.7.2 Soutsos, Le e Lampropoulo (2012)

Um estudo relacionado ao desempenho à flexão do concreto reforçado com fibras de aço e com fibras poliméricas foi desenvolvido por Soutsos, Le e Lampropoulo (2012). Neste experimento, foram utilizadas macrofibras sintéticas com comprimento de 40 mm e fibras de aço com diferentes formatos e com comprimento variando de 50 mm a 60 mm. A partir do fator de tenacidade à flexão e da resistência à tração na flexão obtidos em ensaio realizados em corpos de prova prismáticos, foram determinadas as espessuras de pisos compostos pelos materiais avaliados, conforme exibido na Figura 38. A forma, o tamanho e o material constituinte da fibra influenciaram nos parâmetros de tenacidade, refletindo no dimensionamento do piso.

Figura 38 – Espessura mínima de piso de acordo com diferentes tipos de fibras e dosagens

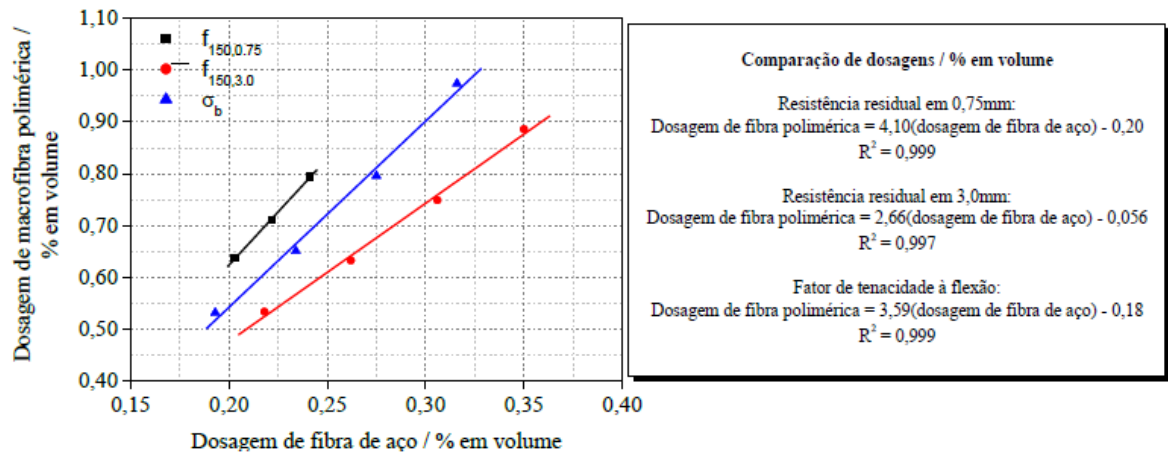


Fonte: Adaptado de Soutsos, Le e Lampropoulo (2012).

2.7.3 Salvador e Figueiredo (2013)

No Brasil, Salvador e Figueiredo (2013) analisaram o desempenho mecânico de uma matriz de concreto reforçada com fibras de aço e com macrofibras poliméricas. A resistência média à compressão da matriz de referência foi de 35 MPa e foram adicionados variados teores dos dois tipos de fibras. A partir dos resultados obtidos em ensaios de tenacidade à flexão em corpos de prova prismáticos, foram estabelecidas correlações entre o teor de fibras e os parâmetros de avaliação da tenacidade e entre dosagens de macrofibras poliméricas e de fibras de aço, considerando critérios de desempenho predeterminados (Figura 39). Verificou-se que a fibra polimérica pode ser utilizada na substituição da fibra de aço, contanto que sejam adotados teores de fibra com equivalência de desempenho.

Figura 39 – Correlações entre dosagens de macrofibras poliméricas e de fibras de aço de acordo com critérios de desempenho predeterminados



Fonte: Salvador e Figueiredo (2013).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A primeira parte do programa experimental consistiu na caracterização dos materiais empregados na produção dos concretos da pesquisa. Com base nas características dos materiais e em traços de concreto da literatura, foram elaborados e validados novos traços para as resistências mecânicas requeridas, uma convencional e outra de alta resistência. Após validados os traços, procedeu-se a produção, a moldagem e a cura úmida das amostras analisadas na presente pesquisa. Por fim, cada amostra foi submetida ao respectivo ensaio. Na Figura 40 é apresentado um fluxograma com as principais atividades e ensaios do programa experimental.

Figura 40 – Principais atividades e ensaios do programa experimental



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

3.1 Materiais

Para a produção dos concretos referentes à presente pesquisa foram utilizados cimento, agregados miúdo e graúdo, água, sílica ativa, aditivo superplastificante, fibra de aço e

macrofibra poliméricas. A seguir são detalhados cada um destes materiais.

3.1.1 Cimento

Para a pesquisa, foi utilizado cimento Portland composto com pozolana, com classe de resistência de 32 MPa (CPII Z 32). A massa específica e a área superficial específica deste cimento foram determinadas de acordo com a NBR NM 23:2001 (ABNT, 2001) - Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica e com a NBR 16372:2015 (ABNT, 2015b) - Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine), respectivamente.

3.1.2 Agregados

3.1.2.1 Agregado miúdo

Como agregado miúdo foram utilizadas duas areias naturais, de origem quartzosa, classificadas como areia média e areia fina. Os valores de massa específica e massa específica aparente de cada areia foram determinados de acordo com a NBR NM 52:2009 (ABNT, 2009b) - Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente, enquanto que a Dimensão Máxima Característica (DMC) e o Módulo de Finura (MF), assim como a composição granulométrica, foram obtidos a partir da NBR NM 248:2003 (ABNT, 2003) - Agregados - Determinação da composição granulométrica. Como foram utilizadas duas areias de granulometrias diferentes, a composição ideal das areias foi determinada por meio do método da máxima massa unitária no estado compactado, descrito por Helene e Terzian (1992).

3.1.2.2 Agregado graúdo

O agregado graúdo empregado foi brita de origem basáltica, com DMC de 19 mm. Os valores de massa específica, massa específica aparente e absorção do agregado graúdo foram determinados de acordo com a NBR NM 53:2009 (ABNT, 2009c) - Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água, enquanto que a DMC e o MF, assim como a composição granulométrica, foram obtidos a partir da NBR NM 248:2003 (ABNT, 2003) - Agregados - Determinação da composição granulométrica.

3.1.3 Sílica ativa

No concreto de alta resistência, foi utilizada sílica ativa derivada do processo de produção do silício metálico ou de ligas de ferro silício. A massa específica e a área superficial específica desta sílica foram determinadas de acordo com a NBR NM 23:2001 (ABNT, 2001) - Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica e com a NBR 16372:2015 (ABNT, 2015b) - Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine), respectivamente.

3.1.4 Aditivo superplastificante

Para se alcançar a consistência desejada, foi empregado o aditivo superplastificante ADVA CAST 525 à base de policarboxilatos. A avaliação da compatibilidade entre cimento e superplastificante foi realizada por meio do ensaio de miniabatimento, descrito por Kantro (1980).

3.1.5 Água de amassamento

Em todas as concretagens foi utilizada água proveniente da rede de abastecimento local, sendo dispensável o controle de sua aceitação.

3.1.6 Fibras

3.1.6.1 Fibra de aço

A fibra de aço utilizada na pesquisa (Figura 41) possuía seção transversal circular e ancoragens nas extremidades. As principais propriedades desta fibra, de acordo com informações do fabricante, estão dispostas na Tabela 13. Segundo a classificação proposta pela NBR 15530:2007 (ABNT, 2007a), a fibra de aço adotada pode ser classificada como fibra A-1, proveniente de arame trefilado a frio e ancorada nas extremidades. A caracterização geométrica das fibras de aço foi realizada utilizando um paquímetro digital e uma amostra composta por 15 fibras.

Figura 41 – Fibra de aço utilizada na pesquisa



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela 13 – Propriedades físicas e mecânicas da fibra de aço

Propriedade	Resultado
Massa específica (g/cm ³)	7,85
Comprimento (mm)	50
Fator de forma	45
Módulo de elasticidade (GPa)	210
Resistência à tração (MPa)	1115

Fonte: Belgo Bekaert Arames (2017).

3.1.6.2 Macrofibra polimérica

A macrofibra polimérica empregada na pesquisa (Figura 42) era constituída de polipropileno e possuía seção transversal retangular. Estas fibras possuíam formato reto e com ranhuras na superfície, de maneira que a ancoragem ocorria ao longo de todo do seu comprimento. Na Tabela 14 são apresentadas as principais propriedades desta fibra, de acordo com dados do fabricante. A caracterização geométrica das macrofibras poliméricas também foi realizada com o auxílio de um paquímetro digital e empregando uma amostra composta por 15 fibras.

Figura 42 – Macrofibra polimérica utilizada na pesquisa



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela 14 – Propriedades físicas e mecânicas da macrofibra polimérica

Propriedade	Resultado
Massa específica (g/cm ³)	0,95
Comprimento (mm)	50
Fator de forma	75
Módulo de elasticidade (GPa)	7
Resistência à tração (MPa)	550

Fonte: Grace Construction Products (2017).

3.2 Dosagem dos concretos

Na presente pesquisa foram elaborados dois traços de concreto: um traço para um concreto convencional, com resistência característica à compressão (f_{ck}) igual a 40 MPa; e outro para um concreto de alta resistência, com f_{ck} de 70 MPa. Como a relação água/cimento foi mantida constante, a consistência desejada para todas as misturas foi alcançada pelo ajuste do aditivo superplastificante. O abatimento foi fixado em (120±20) mm tanto para o concreto convencional quanto para o concreto de alta resistência. Para os dois traços de concreto, convencional e de alta resistência, foi determinado o ponto de saturação do aditivo de acordo com o método AFREM (DE LARRARD *et al.*, 1997).

O traço em massa adotado para o concreto convencional de referência (sem fibra) foi 1: 2,30: 2,70: 0,47, com o consumo de materiais sendo apresentado na Tabela 15. Para a produção dos traços de concreto convencional com fibras, foram utilizadas fibra de aço e

macrofibra polimérica. Ambas as fibras foram adicionadas em teores de 0,5% e 1,0% em volume, o que corresponde, respectivamente, às dosagens de 39,25 kg/m³ e 78,5 kg/m³ para a fibra de aço, e de 4,75 kg/m³ e 9,5 kg/m³ para a macrofibra polimérica.

Tabela 15 – Consumo de materiais para o traço de concreto convencional de referência (sem fibra)

Material	Consumo (kg/m³)
Cimento	382,4
Brita	1032,5
Areia média	527,7
Areia fina	358,1
Água	179,7
Aditivo superplastificante	1,5

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Para o concreto de alta resistência de referência (sem fibra), foi utilizado o traço em massa 1: 1,70: 1,80: 0,35, com a sílica incorporada em substituição volumétrica ao cimento no teor de 10%. O consumo de materiais para este traço é apresentado na Tabela 16. Para a produção dos traços de concreto de alta resistência com fibras, também foram adotadas fibra de aço e macrofibra polimérica, sendo ambas adicionadas em teores de 1,0% e 2,0% em volume, o que equivale, respectivamente, às dosagens de 78,5 kg/m³ e 157 kg/m³ para a fibra de aço, e de 9,5 kg/m³ e 19 kg/m³ para a macrofibra polimérica.

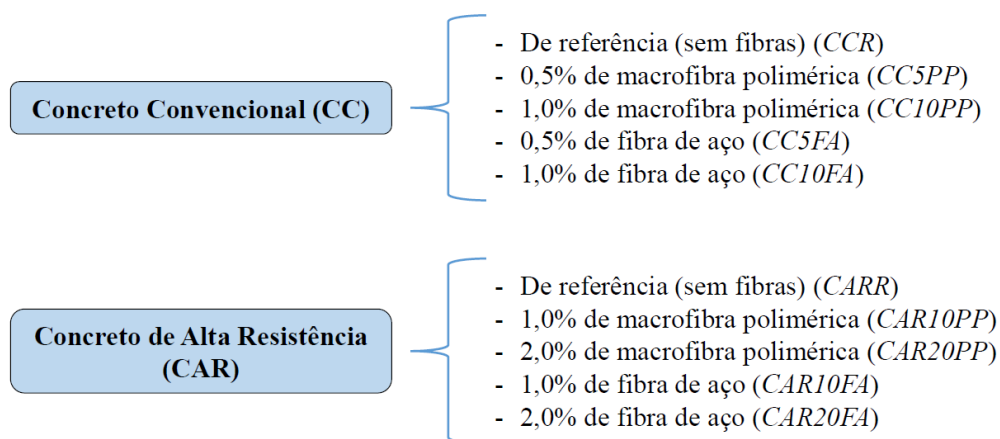
Tabela 16 – Consumo de materiais para o traço de concreto de alta resistência de referência (sem fibra)

Material	Consumo (kg/m³)
Cimento	468,2
Sílica ativa	38,7
Brita	936,3
Areia média	530,6
Areia fina	353,7
Água	163,9
Aditivo superplastificante	3,0

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Na Figura 43 é apresentado um esquema com as diferentes misturas de concreto analisadas na presente pesquisa. No total são 10 misturas, variando-se a matriz cimentícia, o tipo e teor de fibras.

Figura 43 – Misturas de concreto analisadas na pesquisa



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

3.3 Produção, moldagem e cura úmida das amostras

Na produção de cada concreto foram utilizados materiais secos, seguindo a mesma ordem de incorporação dos materiais na betoneira. Primeiro, eram misturados os agregados graúdo e miúdo com parte da água por 1 minuto. Em seguida, eram acrescentados o cimento (e a sílica ativa, no caso do concreto de alta resistência) e o restante da água, seguindo-se a mistura por 5 minutos. O aditivo superplastificante era então incorporado à mistura, que continuava por mais 5 minutos. Após isto, era verificada a consistência da mistura por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone (NBR NM 67: 1998). Caso o valor do abatimento estivesse dentro do intervalo estabelecido, procedia-se com a moldagem dos corpos de prova. Caso contrário, o abatimento era ajustado pela adição de aditivo superplastificante à mistura.

A produção dos concretos da pesquisa foi dividida em duas etapas. Na primeira etapa foram moldados corpos de prova cilíndricos e prismáticos, enquanto que na segunda etapa foram moldadas placas. Para validação do teor de aditivo necessário à obtenção do abatimento especificado, cada concretagem da primeira etapa foi dividida em duas betonadas. Na primeira betonada eram moldados oito corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100 mm x 200 mm e mais três corpos de prova cilíndricos com dimensões de 150 mm x 300 mm, os quais foram posteriormente cortados nas dimensões 150 mm x 150 mm para execução do ensaio Barcelona. Já na segunda betonada, quando se tinha definido o teor de superplastificante a ser adicionado para se obter a consistência desejada, eram moldados três corpos de prova prismáticos com

dimensões de 150 mm x 150 mm x 500 mm. Na segunda etapa foi executada uma betonada para cada concreto, com moldagem de três placas de dimensões de 600 mm x 600 mm x 100mm.

Para cada mistura de concreto foram moldados cinco corpos de prova para o ensaio de resistência à compressão. Já para os ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica, Barcelona, tenacidade em prismas e tenacidade em placas foram moldados três corpos de prova para cada tipo de ensaio. A Tabela 17 contém o tipo, a quantidade total e as dimensões dos corpos de prova moldados para cada ensaio.

Tabela 17 – Detalhes dos corpos de prova de cada ensaio executado

Ensaio	Tipo	Quantidade	Dimensões (mm)
Absorção, índice de vazios e massa específica	Cilíndrico	30	100 x 200
Resistência à compressão	Cilíndrico	50	100 x 200
Barcelona	Cilíndrico	30	150 x 150
Tenacidade em prismas	Prismático	30	150 x 150 x 500
Tenacidade em placas	Placas	30	100 x 600 x 600

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Após alcançar a consistência desejada, era realizada a moldagem dos corpos de prova. O adensamento dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos foi realizado em uma mesa vibratória, enquanto que para as placas foi utilizado um vibrador de imersão. Após 24 horas, os corpos de prova eram desmoldados e transferidos para uma câmara úmida, onde eram submetidos à cura contínua até os 28 dias de idade, quando eram retirados para os respectivos ensaios.

3.4 Métodos de ensaio

No estado fresco, foram determinadas a consistência e a massa específica de cada mistura de concreto. A consistência foi avaliada por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone, prescrito pela NBR NM 67:1998 (ABNT, 1998) - Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Para se obter a massa específica do concreto fresco foi utilizado o procedimento da NBR 9833:2008 (ABNT, 2008) – Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico.

Para a realização do ensaio de determinação da absorção de água, do índice de vazios e da massa específica de cada concreto no estado endurecido seguiu-se a NBR 9778:2009 (ABNT, 2009d) – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água,

índice de vazios e massa específica. Já os ensaios de resistência à compressão foram executados de acordo com o procedimento estabelecido pela NBR 5739:2007 (ABNT, 2007b) - Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos, utilizando uma máquina de ensaio hidráulica, da marca ELE, modelo AUTOTEST 2000, com capacidade de 2000 kN e velocidade de aplicação de carga de 2,4 kN/s.

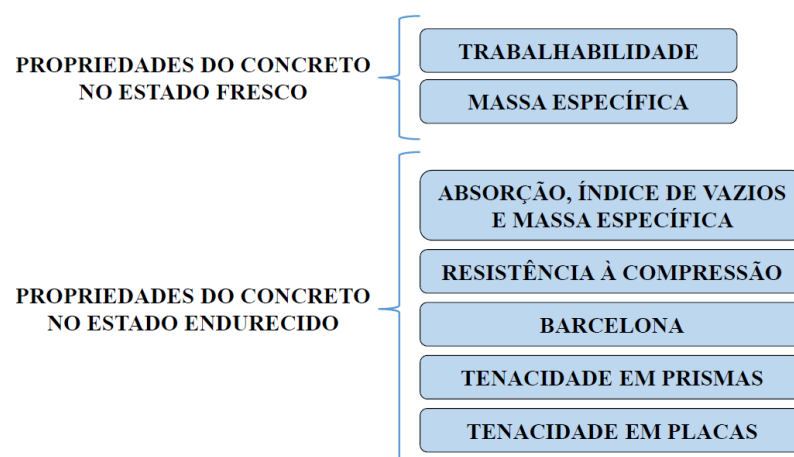
Para analisar a tenacidade de cada concreto foram realizados os ensaios tradicionais de flexão em prismas e de punção em placas, além do ensaio Barcelona de duplo puncionamento. Esses são os ensaios normatizados frequentemente realizados para a avaliação da tenacidade do concreto reforçado com fibra.

O ensaio Barcelona foi realizado de acordo com as recomendações da norma espanhola UNE 83515 (AENOR, 2010), adotando-se uma velocidade de deslocamento do pistão da máquina de 0,5 mm/min. Para o ensaio de tenacidade em prismas, foi empregado o procedimento prescrito pela norma japonesa JSCE-SF4 (JSCE, 1984), com velocidade de deslocamento do pistão da máquina igual a 0,15 mm/min. Em ambos os ensaios foi utilizada uma máquina de ensaio Instron, modelo 300HVL, com capacidade para 1500 kN.

Para o ensaio de tenacidade em placas, utilizou-se a recomendação europeia EFNARC (1996), com velocidade de deslocamento do pistão da máquina igual a 1,5 mm/min. Tal ensaio foi executado em uma máquina universal marca INSTRON, modelo 8506/Custom, com capacidade para 2500 kN (ensaios dinâmicos) e 3000 kN (ensaios estáticos).

Um fluxograma com os ensaios realizados para cada mistura de concreto é mostrado na Figura 44. Para o resultado final de cada ensaio foi considerada a média referente aos resultados individuais obtidos nos corpos de prova, assim como o desvio-padrão e o coeficiente de variação.

Figura 44 – Ensaio realizados para cada mistura de concreto



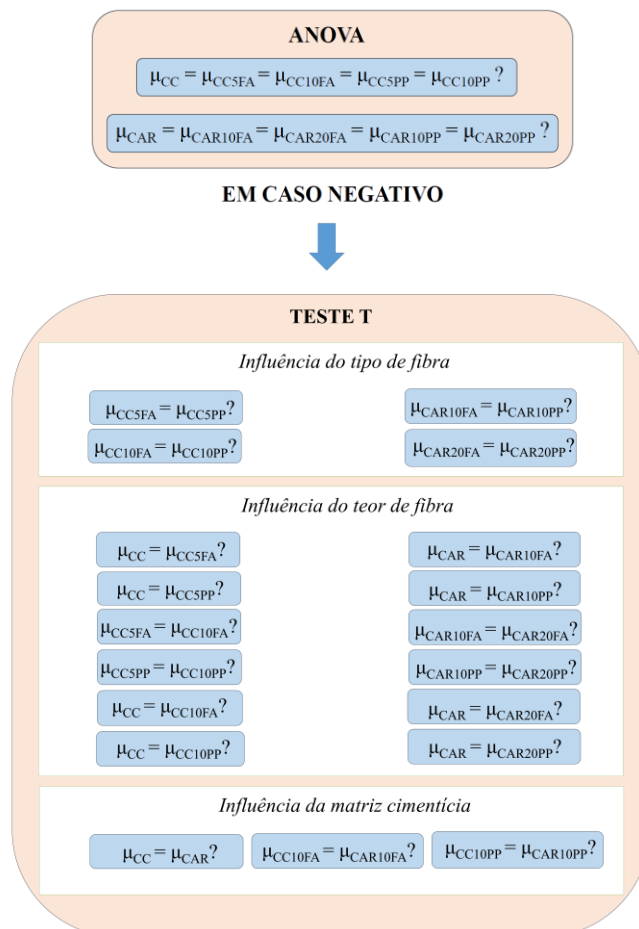
Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

3.5 Critérios de análise dos resultados

Na análise dos resultados experimentais inicialmente foi utilizado o critério de *Chauvenet* para decisão de descarte de valores duvidosos e para verificação da homogeneidade dos dados. Partindo do pressuposto de que os resultados são aleatoriamente distribuídos próximos de um valor médio, o critério de *Chauvenet* estabelece que, em uma sequência de n medições, caso a probabilidade de se obter um valor x seja menor do que $1/2n$, o referido valor deve ser rejeitado.

Para verificar a influência dos fatores que afetam as diversas propriedades do concreto, foram realizadas análise de variância (ANOVA) e testes t de *Student*. Todos os testes estatísticos foram realizados considerando um nível de confiança de 95%, sendo a ANOVA usada para avaliar a relevância da adição de diferentes tipos e teores de fibra nas propriedades do concreto e o teste t realizado para investigar quais os fatores responsáveis pelas alterações em tais propriedades, conforme esquematizado na Figura 45.

Figura 45 – Testes estatísticos realizados com as diversas misturas analisadas



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos na pesquisa e as respectivas análises e discussões. Inicialmente, são analisadas as propriedades do concreto no estado fresco (trabalhabilidade e massa específica) e, em seguida, as propriedades do concreto no estado endurecido (absorção de água, índice de vazios, massa específica, resistência à compressão, resistência à tração e tenacidade). Por fim, são estabelecidas espessuras de um piso industrial para cada tipo de concreto analisado em função do esforço atuante.

Os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais constituintes das misturas de concreto – cimento, sílica ativa, agregados miúdo e graúdo, e fibras – estão dispostos no Apêndice A. No Apêndice B é apresentado o resultado do ensaio de compatibilidade entre o cimento e o aditivo superplastificante utilizados na produção dos concretos.

Os resultados do ensaio da composição ideal das areias são apresentados no Apêndice C e indicam uma máxima massa unitária no estado compactado para a composição com 60% de areia média e 40% de areia fina, em massa, sendo esta a proporção utilizada na produção dos concretos.

No Apêndice D estão dispostos os resultados do ensaio para determinação do ponto de saturação do aditivo. Para o concreto convencional, o ponto de saturação do aditivo foi de 0,2%, enquanto que para o concreto de alta resistência foi de 1,0%.

4.1 Propriedades do concreto no estado fresco

As propriedades analisadas para o concreto no estado fresco foram a trabalhabilidade e a massa específica, cujas considerações são apresentadas adiante.

4.1.1 Trabalhabilidade

O valor do abatimento do tronco de cone para cada mistura de concreto, obtido segundo o procedimento prescrito pela NBR NM 67:1998 (ABNT, 1998), está disposto na Tabela 18. A primeira betonada se refere à concretagem dos corpos de prova cilíndricos, enquanto a segunda betonada se refere à concretagem dos prismas.

Tabela 18 – Resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone

<i>Tipo de concreto</i>	<i>1ª betonada</i>		<i>2ª betonada</i>		<i>Placas</i>	
	<i>Teor de aditivo (%)</i>	<i>Abatimento (cm)</i>	<i>Teor de aditivo (%)</i>	<i>Abatimento (cm)</i>	<i>Teor de aditivo (%)</i>	<i>Abatimento (cm)</i>
CCR	0,4	13	0,4	11,5	0,4	10
CC5FA	0,6	11	0,6	18	0,6	9,5
CC10FA	0,6	18	0,6	6,5	0,7	2,5
CC5PP	0,6	7	0,7	13,5	0,6	12,5
CC10PP	0,7	1	0,7	1	0,6	1
CARR	0,7	20	0,6	8	0,8	12
CAR10FA	0,95	18	1,0	7	1,1	17
CAR20FA	1,0	2,5	1,1	1	1,2	0
CAR10PP	1,0	16,5	0,95	11	1,1	9
CAR20PP	1,15	2	1,20	9	1,3	0

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

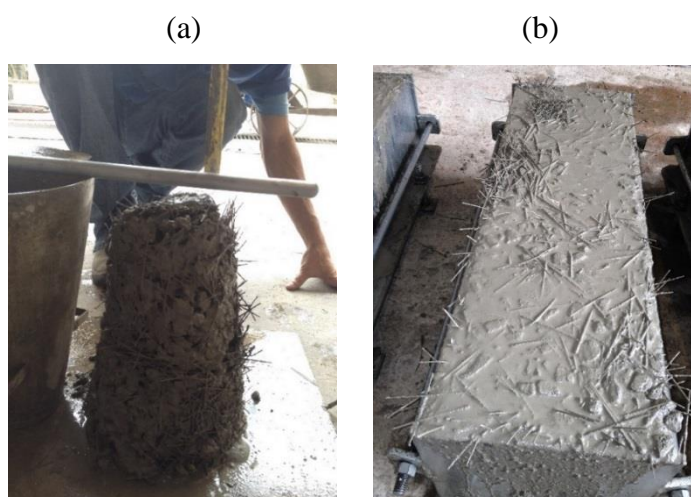
Na maioria dos concretos foi observado uma perda do abatimento com o aumento do teor de fibra. As fibras constituem uma barreira ao movimento dos agregados, reduzindo a mobilidade e afetando negativamente a trabalhabilidade do material (CECCATO, FIGUEIREDO, 2014).

Para teores iguais de fibra, algumas misturas contendo fibra de aço apresentaram um valor de superior em relação aos concretos com macrofibra polimérica, considerando quantidades similares de superplastificante. Isto pode estar relacionado à maior área superficial das macrofibras poliméricas, refletindo em uma maior área de molhagem do concreto e, conseqüentemente, interferindo na trabalhabilidade do concreto. No entanto, além das dimensões, o material constituinte das fibras também afeta a trabalhabilidade do material, com as fibras mais rígidas, como as de aço, dificultando em maior grau a mobilidade do concreto, conforme relatado por Figueiredo (2010). Desta forma, também foram observados na presente pesquisa casos em que o concreto com macrofibras poliméricas apresentou um valor de abatimento superior ao do concreto com fibra de aço.

Em algumas misturas com maiores teores de fibra, como nos casos do CC10PP, do CAR20FA e CAR20PP, não foi possível obter o abatimento desejado, mesmo com a adição de superplastificante (Figura 46(a)). Nestas misturas foi observado o início da ocorrência de exsudação e de segregação do concreto (Figura 46(b)), indicando a inviabilidade de se acrescentar uma maior quantidade de aditivo, já que a pasta estava fluida, mas a grande quantidade de fibras impedia a fluidez do concreto. Para evitar a perda total do material, limitou-se a adição de superplastificante ao se observar tais fenômenos. Na moldagem das placas de concreto de alta resistência com maiores teores de fibras foi necessário realizar o

adensamento na mesa vibratória, devido à consistência da mistura (Figura 47). Como foi utilizada a mesa vibratória no adensamento da maioria dos corpos de prova, não houve prejuízo da compactação do concreto, inclusive das misturas com baixa trabalhabilidade.

Figura 46 – Ensaio do abatimento do tronco de cone para o concreto CAR20PP (a) e início de exsudação e de segregação do concreto CAR20PP (b)



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Figura 47 – Adensamento das placas de CAR20PP



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Conforme constatado nesta pesquisa e diferente do que afirma Mendonza, Aire e Dávila (2011), nem sempre é possível melhorar a trabalhabilidade do concreto reforçado com fibra adicionando-se apenas aditivo superplastificante. Algumas vezes é necessário alterar o teor de argamassa do concreto para se alcançar uma boa trabalhabilidade, como aconteceu na mistura com teor de macrofibra polimérica de 1,0%, em que só foi possível se obter um valor de abatimento próximo do desejado ao utilizar um concreto de alta resistência (com maior teor de argamassa na sua composição). A influência do teor de argamassa na trabalhabilidade do concreto reforçado com fibra também foi constatada por Ceccato e Figueiredo (2014).

Além dos problemas relatados anteriormente, nas concretagens com maiores teores de fibras, principalmente de polipropileno, também foi observado a formação de aglomerados de fibras (ouriços) (Figura 48), o que acabou prejudicando a homogeneidade da mistura. Em uma das misturas do concreto CC10FA foi obtido um abatimento de 18 cm, mas o modo de abatimento do tronco de cone divergiu do que acontece com a maioria dos concretos. A massa de concreto rebaixou de modo desigual, conforme mostrado na Figura 49, indicando que este ensaio pode não ser o mais adequado para avaliar a trabalhabilidade de concretos com maiores teores de fibras. De acordo com Figueiredo e Ceccato (2015), em concretos mais rígidos, com elevados teores de fibra e abatimento menor que 10 cm, o ensaio Vebe é mais adequado para avaliar sua trabalhabilidade, visto que pelo ensaio de abatimento de tronco de cone torna-se inviável distinguir o comportamento destes concretos.

Figura 48 – Formação de aglomerados de fibras de polipropileno na concretagem do concreto CAR20PP



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Figura 49 – Abatimento do concreto CC10FA



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

4.1.2 Massa específica

Os valores de massa específica para cada mistura de concreto no estado fresco estão contidos na Tabela 19.

Tabela 19 – Valores de massa específica do concreto no estado fresco

<i>Tipo de concreto</i>	<i>Massa específica (g/cm²)</i>
CCR	2,49
CC5FA	2,50
CC10FA	2,56
CC5PP	2,45
CC10PP	2,51
CARR	2,47
CAR10FA	2,60
CAR20FA	2,66
CAR10PP	2,51
CAR20PP	2,55

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

A adição de fibras praticamente não alterou o valor da massa específica do concreto, visto que estas representam uma parcela pequena do volume do compósito (teor máximo de 2%). No entanto, é possível verificar um maior aumento da massa específica do concreto com a adição de fibras de aço do que com a adição de fibras de polipropileno, visto que a massa específica do aço é superior à do polipropileno.

4.2 Propriedades do concreto no estado endurecido

Para cada mistura de concreto no estado endurecido, foram analisadas as propriedades de absorção, índice de vazios, massa específica, resistência à compressão e tenacidade. A tenacidade foi avaliada em corpos de prova cilíndricos (ensaio Barcelona), em prismas e em placas. Os resultados e considerações a respeito destes ensaios estão dispostos adiante.

4.2.1 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

Os valores de absorção de água e índice de vazios para cada tipo de concreto estão contidos na Tabela 20. Os valores apresentados na Tabela 20 correspondem à média de três resultados individuais obtidos em cada ensaio, sendo estes resultados individuais apresentados nos Apêndices E e F deste trabalho.

Tabela 20 – Valores de absorção e índice de vazios de cada concreto

<i>Tipo de concreto</i>	<i>Absorção (%)</i>		<i>Índice de vazios (%)</i>	
	<i>Média</i>	<i>CV</i>	<i>Média</i>	<i>CV</i>
CCR	5,79	0,41	13,37	1,14
CC5FA	5,50	2,35	12,92	1,61
CC10FA	5,37	3,05	12,97	2,43
CC5PP	5,50	0,93	12,81	0,98
CC10PP	5,44	3,60	12,84	3,11
CARR	3,36	9,45	8,00	9,12
CAR10FA	2,50	6,19	6,21	6,26
CAR20FA	2,56	8,29	6,53	8,14
CAR10PP	3,05	12,37	7,32	11,17
CAR20PP	3,53	15,07	8,49	14,07

Nota: CV = coeficiente de variação, em %.

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

O concreto de alta resistência, por possuir uma matriz mais densa e menos porosa, apresentou valores de absorção de água e de índice de vazios menores do que o concreto convencional. O aumento do teor de fibra provocou uma pequena redução da absorção e praticamente não alterou o índice de vazios do concreto convencional, enquanto que no concreto de alta resistência houve um acréscimo tanto no valor da absorção quanto no índice de vazios. O comportamento foi semelhante para as misturas produzidas tanto com a fibra de aço quanto com a macrofibra polimérica. Vale destacar que o concreto CAR20PP apresentou absorção e índice de vazios superiores ao do concreto de referência CAR, o que pode estar relacionado à baixa trabalhabilidade da mistura, que acabou prejudicando o adensamento do material. No geral, houve pequena variação dos resultados, com CV inferior a 5% nos concretos convencionais e inferior a 15% nos concretos de alta resistência, indicando uma boa homogeneidade das misturas de acordo com o critério de *Chauvenet*.

De acordo com a análise de variância (ANOVA), a variação no valor da absorção de água do concreto com a adição de fibras, tanto para o concreto convencional quanto para o concreto de alta resistência, é considerada significativa. Os testes t indicaram que a influência do tipo de fibra na absorção do concreto é não significativa no concreto convencional, conforme também verificado por Monte (2015). Já o teor de fibra teve um impacto significativo no valor da absorção deste concreto, diferente do que foi observado por Monte (2015), em que a adição de diferentes teores de fibra, tanto de aço quanto polimérica, provocou variações não significativas da absorção de água de um concreto convencional.

No concreto de alta resistência, o tipo de fibra modificou o valor da absorção quando utilizado um elevado teor de fibra (2,0%). No entanto, a incorporação e o teor de fibras de polipropileno não alteraram tal propriedade. A variação da matriz cimentícia também modificou o valor da absorção do concreto. Detalhes dos testes estatísticos para a absorção de água no concreto estão dispostos no Apêndice E.

O valor do índice de vazios do concreto de alta resistência apresentou uma variação significativa com a adição de fibras, diferente do que ocorreu com a adição de fibras no concreto convencional, segundo a análise da variância. O impacto não significativo da adição de fibras no índice de vazios do concreto convencional também foi constatado por Monte (2015). De acordo com testes t de Student, o fator que causou uma variação significativa do índice de vazios no concreto de alta resistência foi o teor de fibra de aço. Além disso, a matriz cimentícia também teve uma influência significativa no índice de vazios dos concretos. Detalhes dos testes estatísticos para o índice de vazios no concreto estão dispostos no Apêndice F.

Já as massas específicas das amostras secas, saturadas e reais estão dispostas na Tabela 21. Os valores apresentados na Tabela 21 correspondem à média de três resultados individuais obtidos em cada ensaio, sendo estes resultados individuais apresentados nos Apêndices G, H e I deste trabalho.

Tabela 21 – Valores de massa específica das amostras secas, das amostras saturadas e das amostras reais de concreto

<i>Tipo de concreto</i>	<i>Massa específica da amostra seca (g/cm³)</i>		<i>Massa específica da amostra saturada (g/cm³)</i>		<i>Massa específica da amostra real (g/cm³)</i>	
	<i>Média</i>	<i>CV</i>	<i>Média</i>	<i>CV</i>	<i>Média</i>	<i>CV</i>
CCR	2,31	0,79	2,44	0,81	2,67	0,97
CC5FA	2,35	0,77	2,48	0,65	2,70	0,55
CC10FA	2,42	0,64	2,55	0,48	2,78	0,28
CC5PP	2,33	0,30	2,46	0,31	2,67	0,37
CC10PP	2,36	0,58	2,49	0,42	2,71	0,32
CARR	2,38	0,34	2,46	0,09	2,59	0,47
CAR10FA	2,48	0,33	2,54	0,39	2,64	0,59
CAR20FA	2,55	0,17	2,62	0,11	2,73	0,43
CAR10PP	2,40	1,24	2,47	0,92	2,59	0,59
CAR20PP	2,41	1,12	2,49	0,65	2,63	0,45

Nota: CV = coeficiente de variação, em %.

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tanto no concreto convencional quanto no concreto de alta resistência, a adição de fibras ocasionou variação significativa nos valores das massas específicas da amostra seca, da

amostra saturada e da amostra real. As massas específicas da amostra seca e da amostra real apresentaram variação significativa com o tipo e o teor de fibra presente no concreto, assim como com o tipo de matriz cimentícia adotada. Já a massa específica da amostra saturada teve uma influência significativa do tipo e do teor de fibra adicionado, tendo uma variação não significativa com o tipo de matriz cimentícia. Detalhes dos testes estatísticos para as massas específicas da amostra seca, da amostra saturada e da amostra real estão dispostos no Apêndices G, H e I, respectivamente.

As massas específicas da amostra seca, da amostra saturada e da amostra real apresentaram uma variação significativa com o tipo de fibra adotada quando utilizados teores de fibra iguais ou superiores a 1,0%. No concreto de alta resistência, a massa específica da amostra seca não foi afetada de modo significativo com o aumento do teor de macrofibra polimérica. Além disso, a mudança da matriz cimentícia provocou alterações não significativas nos valores da massa específica da amostra seca quando foram utilizadas macrofibras poliméricas.

4.2.2 Resistência à compressão

O valor de resistência média à compressão (f_{cm28}), aos 28 dias de idade, referente a cada mistura de concreto produzida, é apresentado na Tabela 22. Os valores apresentados na Tabela 22 correspondem à média de cinco resultados individuais obtidos em cada ensaio, sendo estes resultados individuais apresentados no Apêndice J deste trabalho.

Tabela 22 – Resultados do ensaio de resistência à compressão

<i>Tipo de concreto</i>	<i>f_{cm28} (MPa)</i>	
	<i>Média</i>	<i>CV</i>
CCR	41,66	1,42
CC5FA	46,17	0,94
CC10FA	42,63	4,65
CC5PP	46,61	2,69
CC10PP	44,08	3,73
CARR	70,24	3,64
CAR10FA	77,60	5,63
CAR20FA	84,14	1,06
CAR10PP	73,52	1,60
CAR20PP	65,16	3,72

Nota:

f_{cm28} = resistência média à compressão aos 28 dias.

CV = coeficiente de variação, em %.

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Com a adição de fibras, houve uma variação significativa no valor da resistência à compressão dos concretos, segundo a ANOVA. No concreto convencional, a adição de fibra ocasionou um aumento no valor da resistência à compressão, sendo o maior aumento registrado com baixos teores de fibra. A maior variação foi registrada no concreto CC5PP, que apresentou um valor de resistência 11,9% superior ao CCR, enquanto que a menor alteração ocorreu no concreto CC10FA, cuja resistência foi 2,3% superior em relação ao CCR. De acordo com o teste t, o tipo de fibra não influenciou o valor de tal resistência, sendo o teor de fibras o principal fator responsável pela variação da resistência do concreto convencional. Esta situação é diferente da que foi verificada por Monte (2015), cujo concreto convencional com macrofibra polimérica apresentou valor de resistência à compressão significativamente menor do que a mistura com fibra de aço, enquanto que o teor de fibra teve um impacto não significativo nessa propriedade.

No concreto de alta resistência, a utilização de teores de 1,0% e 2,0% de fibra de aço resultaram no aumento da resistência à compressão da ordem de, respectivamente, 10,5% e 19,8% em relação à mistura sem fibra. A adição de 1,0% de macrofibra polimérica ocasionou um pequeno aumento da resistência (4,7%), porém no teor de 2,0% ocorreu uma redução de 7,2% no valor da resistência. Segundo o teste t, além do teor de fibras, o tipo de fibra também modificou de modo significativo o valor da resistência quando adicionadas no teor de 2,0%. Isto pode indicar que em concretos com maiores teores de fibra, o tipo de fibra passa a influenciar no valor da resistência à compressão. A trabalhabilidade inadequada dos concretos com alto teor de fibra também pode ter influenciado tal resultado. O tipo de matriz cimentícia adotado também foi outro fator que modificou a resistência. Detalhes dos testes estatísticos para resistência à compressão do concreto estão dispostos no Apêndice J.

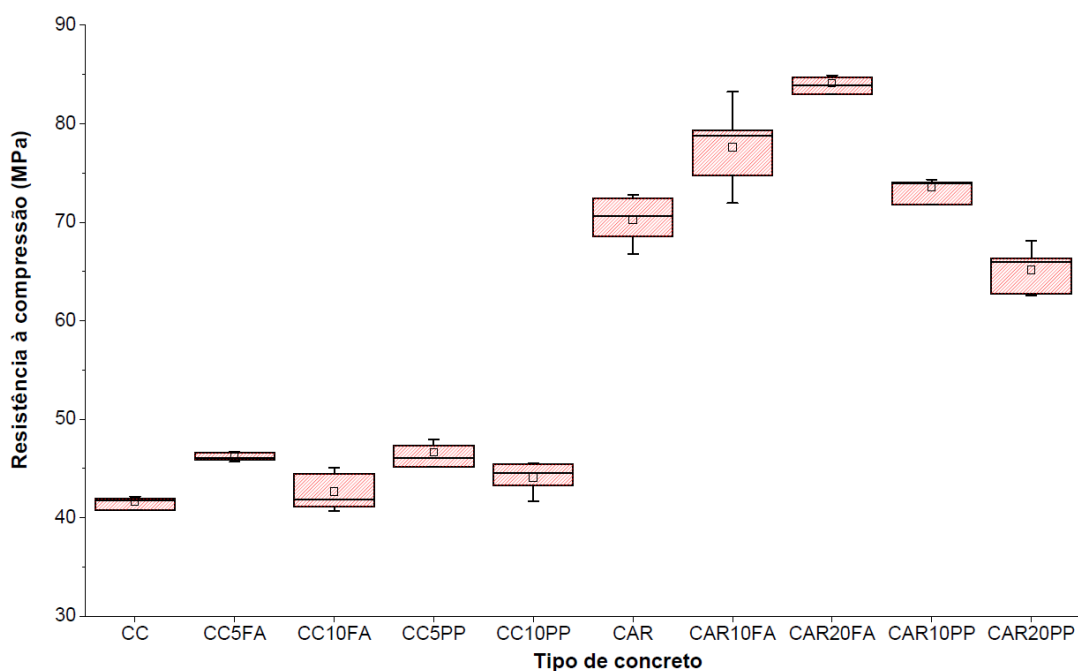
De acordo com Mehta e Monteiro (2014), a utilização de baixos e moderados teores de fibra deve exercer pequena influência no valor da resistência à compressão do concreto, com sua principal contribuição ocorrendo na tenacidade do compósito. No entanto, no concreto de resistência convencional da presente pesquisa, os maiores aumentos de resistência à compressão ocorreram com a adição de baixo teor de fibra. Já no concreto de alta resistência, a utilização de um alto teor de fibra de aço provocou um maior incremento no valor de tal resistência.

As misturas com fibra cujos valores de resistência foram superiores aos dos concretos de referência podem ter apresentado comportamento *hardening* após a ruptura da matriz, com aumento da capacidade resistente do compósito. Para confirmar esta hipótese, seria

necessária a curva carga *versus* deslocamento dos concretos sob compressão; no entanto, a máquina de ensaio utilizada não fornecia tal dado para análise.

O gráfico *boxplot* para a resistência à compressão, apresentado na Figura 50, indica que a maior variação dos resultados ocorreu nos concretos de alta resistência. O tipo e o teor de fibra tiveram influência significativa na variação da resistência à compressão do concreto de alta resistência.

Figura 50 – *Boxplot* para a resistência à compressão



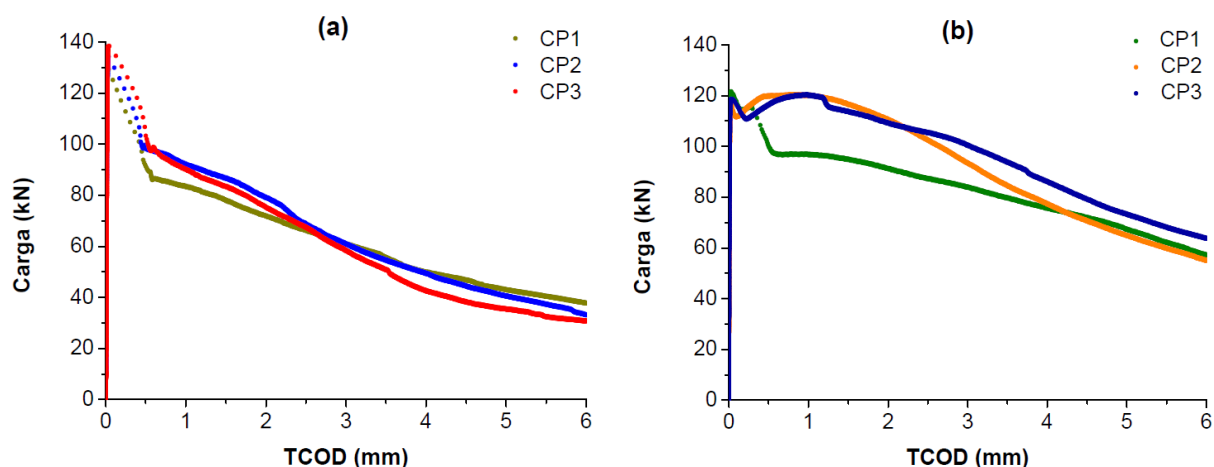
Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

4.2.3 Ensaio Barcelona

Os gráficos das curvas carga *versus* TCOB obtidos no ensaio Barcelona referentes às amostras de concreto convencional com fibra de aço e com macrofibra polimérica são apresentados nas Figura 51 e 52, respectivamente. No Apêndice K estão dispostas tais curvas de forma mais detalhadas para menores valores de TCOB.

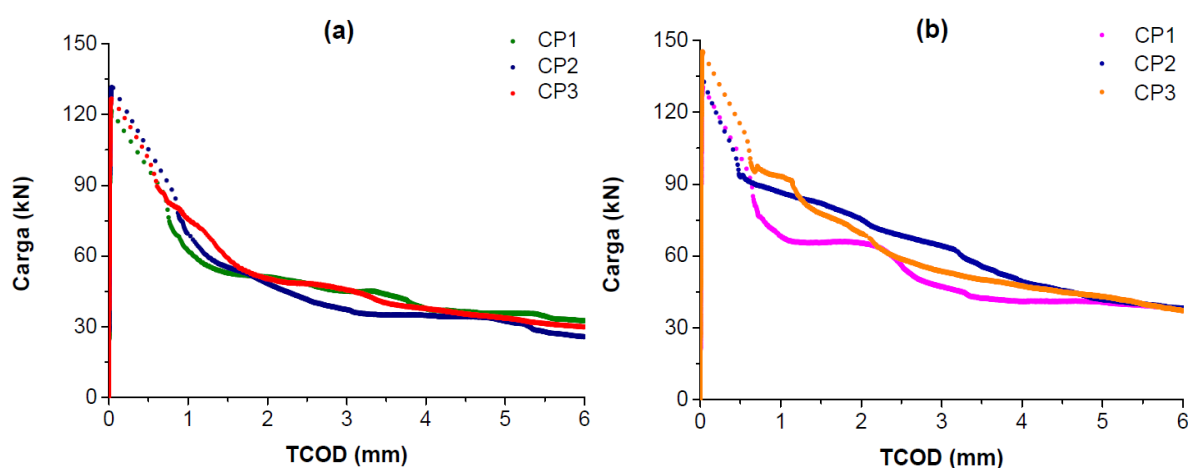
No concreto CC5FA (Figura 51 (a)) foi verificado uma queda da capacidade resistente após a ruptura da matriz, identificando um comportamento *softening* da mistura. Além disso, foi observada a ocorrência de instabilidade, perceptível pelo distanciamento entre os pontos da curva, até um TCOB de 0,5 mm. Já na mistura CC10FA (Figura 51 (b)), com maior teor de fibras de aço, a instabilidade foi praticamente inexistente. Em dois exemplares desta mistura a carga resistente se manteve aproximadamente constante até um TCOB de 1,5 mm, quando começou a apresentar comportamento *softening*.

Figura 51 – Curvas carga *versus* TCOB referentes às amostras de concreto de resistência convencional com teor de fibra de aço de (a) 0,5% e (b) 1,0%, em volume



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Figura 52 – Curvas carga *versus* TCOB referentes às amostras de concreto de resistência convencional com teor de macrofibra polimérica de (a) 0,5% e (b) 1,0%, em volume



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

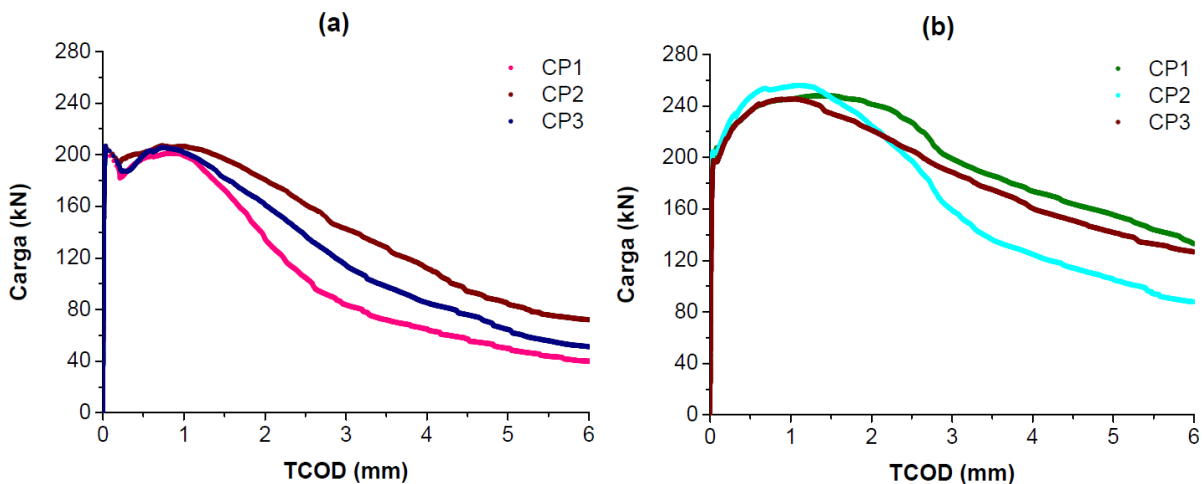
No concreto com macrofibra polimérica foi observado um comportamento de *softening* tanto para o teor de fibra de 0,5% (Figura 52 (a)) quanto de 1,0% (Figura 52 (b)). Enquanto que para o concreto CC5PP a instabilidade se estendeu até um TCOB próximo de 1 mm, na mistura CC10PP tal instabilidade cessou em um valor de TCOB menor, próximo de 0,5 mm.

Nas Figura 53 e 54 são exibidas as curvas resultantes das amostras de concreto de alta resistência com fibra de aço e com macrofibra polimérica, respectivamente. No Apêndice K estão dispostas tais curvas de forma mais detalhadas para menores valores de TCOB.

No concreto CAR10FA (Figura 53 (a)), a capacidade resistente se manteve constante e aproximadamente igual à carga de ruptura da matriz até um TCOB de 1 mm. Com

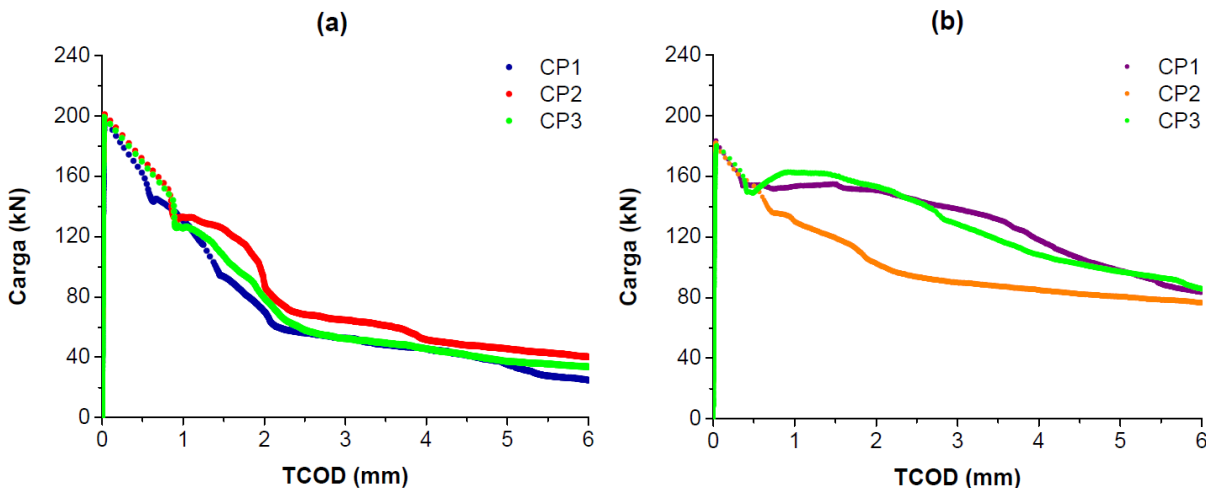
o aumento do TCOD, o compósito começou a apresentar redução da capacidade de suporte (*softening*). Além disto, foi observada uma pequena instabilidade no início da fissuração. Esta instabilidade foi inexistente na mistura CAR20FA (Figura 53 (b)), que apresentou aumento da carga resistente pós-fissuração, caracterizando o comportamento *hardening*. Para valores maiores de TCOD houve redução da capacidade resistente.

Figura 53 – Curvas carga *versus* TCOD referentes às amostras de concreto de alta resistência com teor de fibra de aço de (a) 1,0% e (b) 2,0%, em volume



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Figura 54 – Curvas carga *versus* TCOD referentes às amostras de concreto de alta resistência com teor de macrofibra polimérica de (a) 1,0% e (b) 2,0%, em volume



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Nas amostras de concreto com macrofibra polimérica verificou-se a ocorrência de instabilidade pós-pico e de comportamento *softening*, com redução da carga resistente pós-fissuração. A maior instabilidade aconteceu com a utilização de teores mais baixos de fibra. Tal

fenômeno se manifestou até um TCOB de 1,0 mm e de 0,5 mm nas misturas CAR10PP (Figura 54 (a)) e CAR20PP (Figura 54 (b)), respectivamente.

Os resultados do ensaio Barcelona para todas as misturas de concreto estão dispostos na Tabela 23. Além da resistência à tração (f_{ct}) e da tenacidade até um TCOB de 6 mm, também é apresentada a resistência residual referente ao TCOB de 1,5 mm ($f_{ct, TCOB=1,5}$) e de 6 mm ($f_{ct, TCOB=6}$), correspondentes ao Estado Limite de Serviço (ELS) e ao Estado Limite Último (ELU), respectivamente, conforme observado por Monte, Toaldo e Figueiredo (2014). Cabe ressaltar que os valores apresentados na Tabela 23 correspondem à média de três resultados individuais obtidos no ensaio, sendo estes resultados individuais apresentados nos Apêndices K a N deste trabalho.

Tabela 23 – Resultados do ensaio Barcelona

<i>Tipo de concreto</i>	<i>f_{ct} (MPa)</i>		<i>Tenacidade (J)</i>		<i>$f_{ct, TCOB=1,5}$ (MPa)</i>		<i>$f_{ct, TCOB=6}$ (MPa)</i>	
	<i>Média</i>	<i>CV</i>	<i>Média</i>	<i>CV</i>	<i>Média</i>	<i>CV</i>	<i>Média</i>	<i>CV</i>
CCR	2,88	3,87	-	-	-	-	-	-
CC5FA	3,37	3,23	387,59	2,36	2,08	5,36	0,85	10,30
CC10FA	3,04	0,50	542,75	7,17	2,73	10,74	1,47	7,59
CC5PP	3,19	3,89	308,33	2,76	1,40	5,88	0,74	12,15
CC10PP	3,46	5,46	375,45	7,44	1,89	11,35	0,95	1,33
CARR	4,29	4,7	-	-	-	-	-	-
CAR10FA	5,19	0,55	750,9	14,2	4,63	6,57	1,37	30
CAR20FA	6,29	2,18	1114,8	7,6	6,11	3,08	2,91	21
CAR10PP	5,03	0,47	467,9	8,5	2,73	14,59	0,83	23,61
CAR20PP	4,58	0,89	722,5	13,3	3,64	15,43	2,06	5,78

Nota:
CV = coeficiente de variação, em %.

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Análise da resistência à tração (f_{ct})

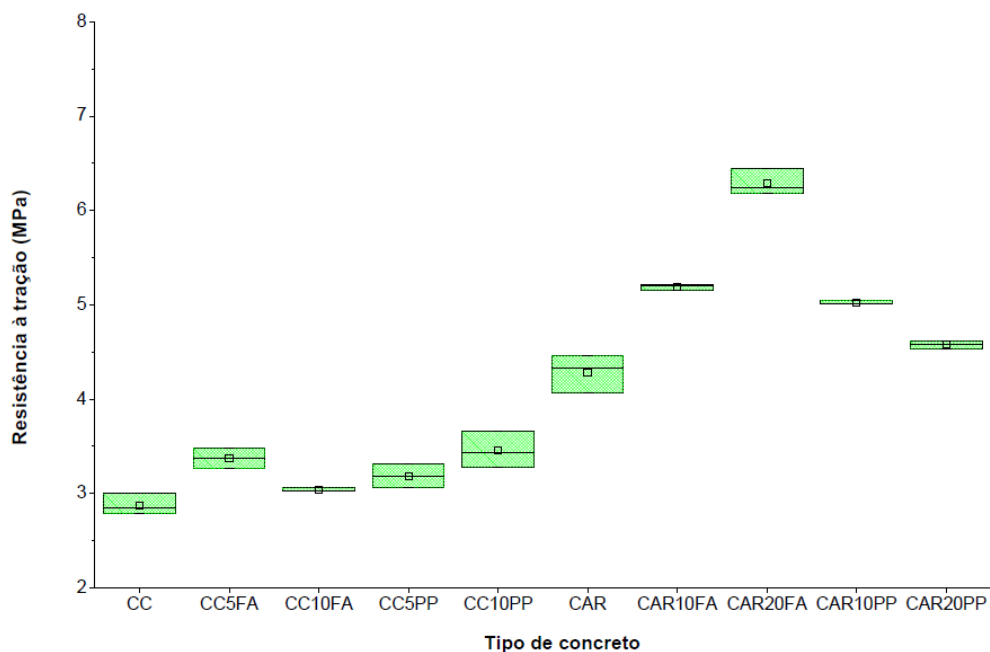
Por meio da análise de variância (ANOVA), foi constatado que a adição de fibras modificou significativamente a resistência à tração do concreto convencional e do concreto de alta resistência. Com relação ao concreto convencional, a mistura que apresentou um maior valor de resistência à tração foi a CC10PP. No entanto, como foi observado apenas comportamento de *softening* no concreto convencional, a maior resistência à tração apontada está relacionada ao desempenho da matriz cimentícia, sem contribuição das fibras neste aspecto. O teste t indica que houve uma influência significativa do teor e do tipo de fibra, quando utilizados maiores teores (1,0%), no valor da resistência à tração do concreto convencional.

Analisando o concreto de alta resistência, a resistência à tração da mistura CAR20FA foi a mais afetada pela adição de fibras, sendo observado um comportamento *hardening*, com uma carga de pico superior à carga de ruptura da matriz cimentícia. Neste caso, houve um aumento de quase 50% no valor do f_{ct} quando comparado ao desempenho do concreto CARR. De acordo com o teste t, tanto o tipo quanto o teor de fibra exerceram influência significativa no valor da resistência à tração do concreto de alta resistência.

Para a amostra sem fibra, o concreto de alta resistência apresentou um valor de resistência à tração 49% superior em relação ao concreto convencional. Para as misturas com fibra de aço e com macrofibra polimérica, o aumento foi de 70,7% e 45,4%, respectivamente, considerando as duas matrizes com o mesmo teor de fibra. A matriz cimentícia também teve uma influência significativa no valor da resistência à tração, conforme verificado pelo teste t. Maiores detalhes dos testes estatísticos para a resistência à tração do ensaio Barcelona são apresentados no Apêndice L.

O gráfico *boxplot* para a resistência à tração do ensaio Barcelona está disposto na Figura 55. As variações da resistência dos dois tipos de fibra ficaram próximas nas misturas com menores teores de fibra, tanto no concreto convencional quanto no concreto de alta resistência. Com o incremento no teor de fibra houve uma maior distinção da influência dos dois tipos de fibra sobre a resistência à tração.

Figura 55 – *Boxplot* para a resistência à tração (ensaio Barcelona)



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Análise da tenacidade

A análise de variância (ANOVA) indicou uma variação significativa no valor da tenacidade, tanto do concreto convencional quanto do concreto de alta resistência, com a adição de diferentes tipos e teores de fibra. No concreto convencional, foi verificado um aumento de tenacidade da ordem de 40% ao dobrar o teor de fibra de aço de 0,5% para 1,0%. Já nas misturas com macrofibra polimérica, o acréscimo de tenacidade ao dobrar o teor de fibra foi de apenas 21,8%. Ao comparar misturas com teores iguais de cada tipo de fibra, verifica-se que os concretos CC5PP e CC10PP apresentaram um valor de tenacidade da ordem de 79,6% e 69,2%, respectivamente, do valor obtido nas amostras com teor similar de fibra de aço. Tais resultados indicam que a macrofibra polimérica afeta em menor grau a tenacidade do concreto convencional em relação à fibra de aço. Tanto o tipo quanto o teor de fibra contribuíram de modo significativo para o valor da tenacidade do concreto convencional, segundo o teste t.

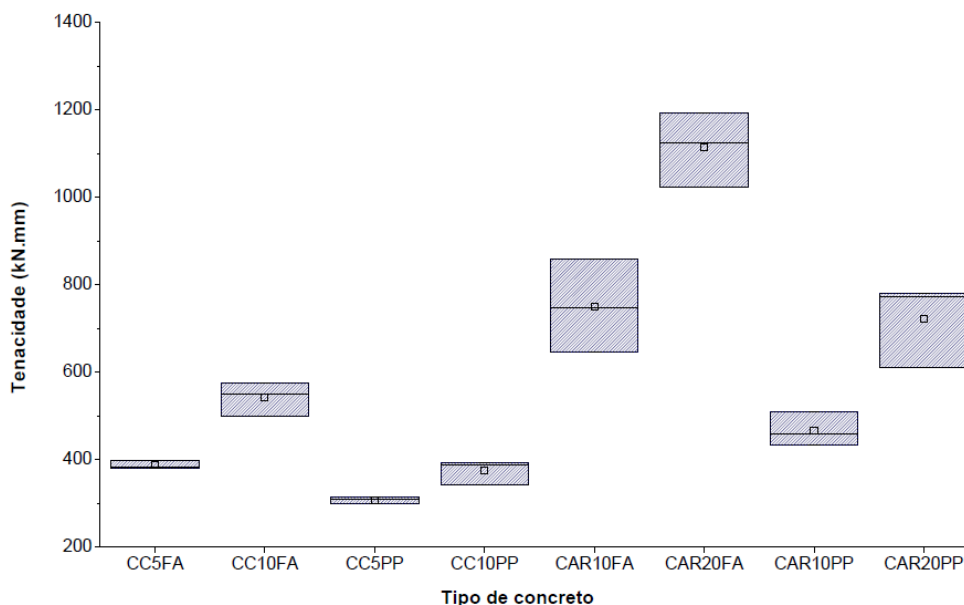
A adição de 2,0% de fibra de aço e de macrofibra polimérica resultou em um aumento de tenacidade da ordem de 48,5% e de 54,4%, respectivamente, em relação ao concreto de alta resistência com 1,0% de cada fibra. Os valores de tenacidade obtidos para as misturas CAR10FA e CAR20PP ficaram próximos, o que pode indicar uma proporção de equivalência de desempenho entre os dois tipos de fibras para esta propriedade. Quando são analisados teores iguais das duas fibras, o concreto de alta resistência com macrofibra polimérica apresentou 62,3% e 64,8% do valor da tenacidade do concreto com fibra de aço para os teores de 1,0% e 2,0%, respectivamente. O teste t indica que o tipo e o teor de fibra influenciaram de modo significativo a tenacidade do concreto de alta resistência.

Tanto no concreto com fibra de aço quanto no concreto com macrofibra polimérica foi verificado um acréscimo no valor da tenacidade com a mudança da matriz cimentícia. Este aumento ocorreu devido à melhor aderência entre a fibra e a matriz cimentícia que acontece nos concretos de maiores resistências, conforme destacado por Figueiredo (2011). Enquanto a macrofibra polimérica apresentou um aumento percentual de 24,6% no valor da tenacidade com a alteração da matriz cimentícia, a fibra de aço apresentou um aumento de 38,4%. De acordo com o teste t, a matriz cimentícia teve uma contribuição significativa para a tenacidade tanto do concreto com fibra de aço quanto do concreto com macrofibra polimérica. Maiores detalhes dos testes estatísticos para a tenacidade do ensaio Barcelona são apresentados no Apêndice M.

De acordo com o gráfico *boxplot* para a tenacidade do ensaio Barcelona, exibido na Figura 56, foram registradas maiores variações no concreto de alta resistência. Além disso, na

maioria das misturas, houve um aumento da variação da tenacidade com o incremento do teor de fibra.

Figura 56 – *Boxplot* para a tenacidade (ensaio Barcelona)



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Análise da resistência residual no ELS ($f_{ct, TCOD=1,5}$)

De acordo com a análise de variância (ANOVA), houve uma variação significativa no valor da resistência residual do concreto convencional e do concreto de alta resistência no ELS com a alteração do tipo e do teor de fibra. Para o concreto convencional foi verificado um acréscimo de 31,3% e 35% no valor de tal resistência ao dobrar o teor de fibra de aço e de macrofibra polimérica, respectivamente. O concreto com macrofibra polimérica apresentou um valor de $f_{ct, TCOD=1,5}$ correspondente a 67,3% e 69,2% do valor obtido no concreto com macrofibra polimérica para os teores de 0,5% e 1,0%, respectivamente. Com isso, no que se refere à resistência residual do concreto convencional no ELS, o desempenho da mistura com fibra de aço em relação à mistura com macrofibra polimérica tende a permanecer constante, independente do teor de fibra. O teste t indica que o tipo e o teor de fibra contribuíram de modo significativo para o valor de $f_{ct, TCOD=1,5}$ no concreto convencional.

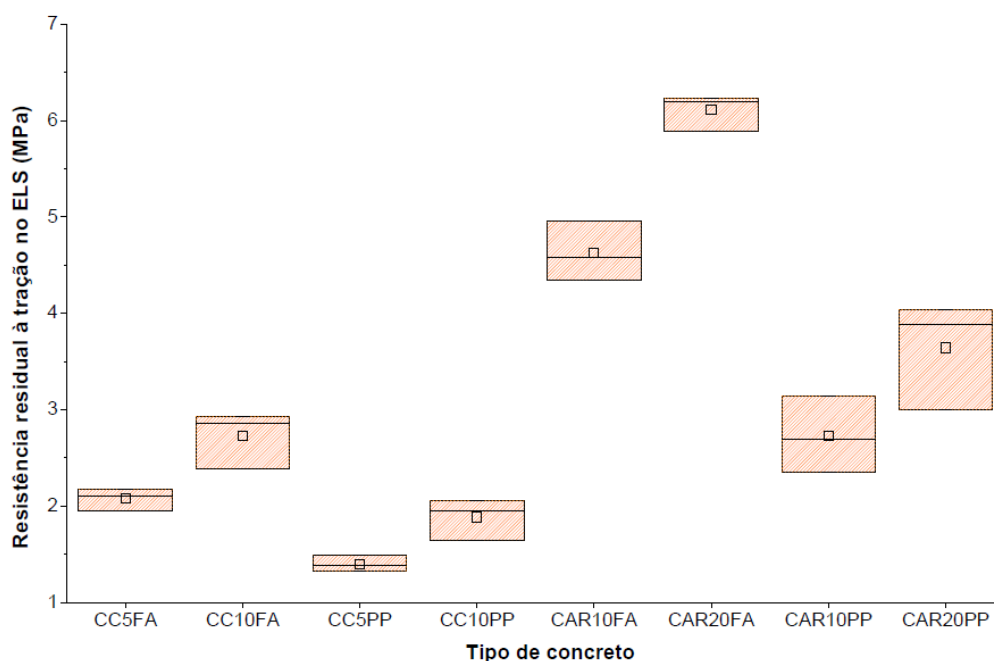
No concreto de alta resistência, foi verificado um aumento percentual de 32% e 33,3% no valor do $f_{ct, TCOD=1,5}$ com o acréscimo do teor de fibra de aço e de macrofibra polimérica, respectivamente. Apesar destes aumentos estarem próximos, o teor de fibra teve

um impacto significativo na resistência apenas do concreto com fibra de aço, de acordo com o teste t. O valor de $f_{ct, TCOD=1,5}$ para o concreto de alta resistência com macrofibra polimérica foi de 69,6% e 67,9% em relação ao concreto com fibra de aço, para o teor de fibra de 1,0% e de 2,0%, respectivamente. Assim como no concreto convencional, o comportamento da mistura com fibra de aço em relação à mistura com macrofibra polimérica tende a ficar próximo, independente do teor de fibra, no que se refere à resistência residual do concreto de alta resistência no ELS. O teste t indica que o tipo de fibra também afetou de modo significativo o valor de $f_{ct, TCOD=1,5}$.

Com alteração da matriz cimentícia houve um aumento no parâmetro $f_{ct, TCOD=1,5}$ de 69,6% para o concreto com fibra de aço e de 44,4% para o concreto com macrofibra polimérica. De acordo com o teste t, a variação na resistência residual do concreto no ELS devido à mudança da matriz cimentícia é considerada significativa para as misturas com fibra de aço e para as misturas com macrofibra polimérica. Detalhes dos testes estatísticos para a resistência residual no ELS do ensaio Barcelona estão dispostos no Apêndice N.

Na Figura 57 é apresentado o gráfico *boxplot* para resistência residual no ELS do ensaio Barcelona. Assim como para a tenacidade, houve uma maior variação de tal resistência nos concretos de alta resistência. O aumento do teor de fibra também ocasionou uma maior variação, exceto na mistura de concreto de alta resistência com fibra de aço.

Figura 57 – *Boxplot* para a resistência residual no ELS (ensaio Barcelona)



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Análise da resistência residual no ELU ($f_{ct, TCO D=6}$)

No concreto convencional e no concreto de alta resistência foram registradas variações significativas da resistência residual no ELU com a adição de diferentes tipos e teores de fibra, constatado pela análise de variância (ANOVA). A resistência residual no ELU, $f_{ct, TCO D=6}$, teve um aumento de 72,9% para a fibra de aço e de 28,4% para a macrofibra polimérica quando o teor de fibras passou de 0,5% para 1,0% no concreto convencional. Para os teores de fibra de 0,5% e 1,0%, o concreto convencional com macrofibra polimérica apresentou um valor de $f_{ct, TCO D=6}$ correspondente a 87,1% e 64,6%, respectivamente, do valor do $f_{ct, TCO D=6}$ do concreto com fibras de aço. Com isto, em concretos convencionais, a resistência residual oferecida pelas macrofibras poliméricas no ELU é próxima da resistência das fibras de aço quando utilizados baixos teores de fibra. De acordo com o teste t, o tipo de fibra exerceu uma influência significativa na resistência de concretos convencionais com maiores teores de fibra. O teor de fibra também alterou a resistência residual no ELU dos concretos convencionais.

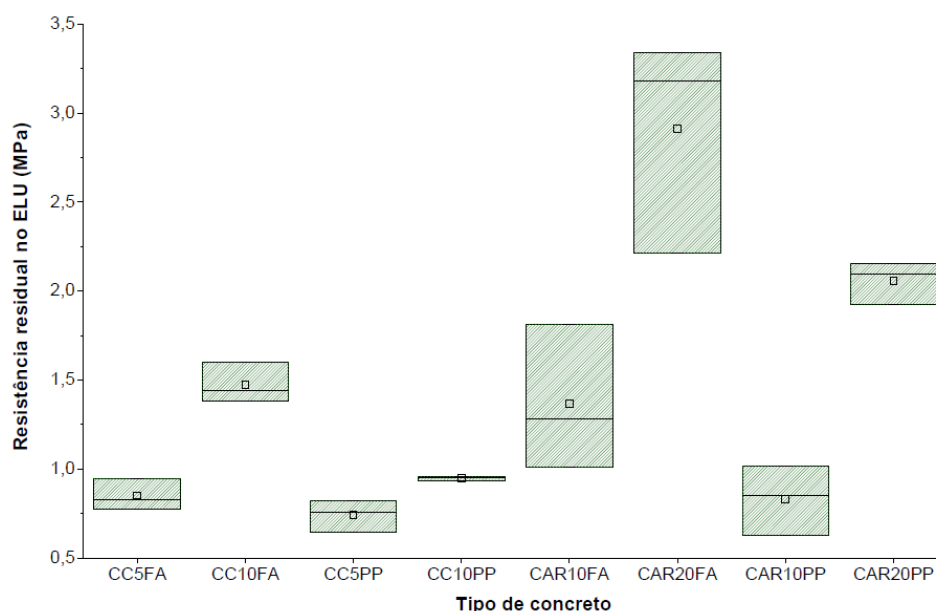
No concreto de alta resistência, houve um aumento da resistência residual $f_{ct, TCO D=6}$ da ordem de 112% para a fibra de aço e de 148% para a macrofibra polimérica quando dobrou-se o teor de fibras utilizado no concreto. Ao comparar resultados da $f_{ct, TCO D=6}$ referentes a teores iguais para as duas fibras, verificou-se que o concreto com macrofibra polimérica apresentou 60,6% e 70,8% do valor da resistência residual da amostra que possuía fibra de aço para os teores de 1,0% e 2,0%, respectivamente. Desta forma, para maiores teores de fibras, a resistência residual no ELU oferecida pela macrofibra polimérica se aproxima da resistência obtida com a fibra de aço em concretos de alta resistência. O teste t indica que o teor de fibra foi o principal fator responsável pela modificação da resistência residual do concreto de alta resistência no ELU.

Com a alteração da matriz cimentícia houve redução da resistência residual no ELU tanto para o concreto com fibra de aço quanto para o concreto com macrofibra polimérica, indicando uma queda mais brusca de resistência residual com o aumento de deformações no concreto de alta resistência. Segundo o teste t, a variação no valor do $f_{ct, TCO D=6}$ devido à mudança na matriz cimentícia foi não significativa. Detalhes dos testes estatísticos para a resistência residual no ELU do ensaio Barcelona estão dispostos no Apêndice O.

O gráfico *boxplot* para a resistência residual no ELU do ensaio Barcelona está disposto na Figura 58. É possível perceber que a maioria das misturas com macrofibra

polimérica apresentaram uma menor variação de tal resistência em relação aos concretos com fibra de aço. O concreto de alta resistência com fibra de aço apresentou a maior variação.

Figura 58 – *Boxplot* para a resistência residual no ELU (ensaio Barcelona)

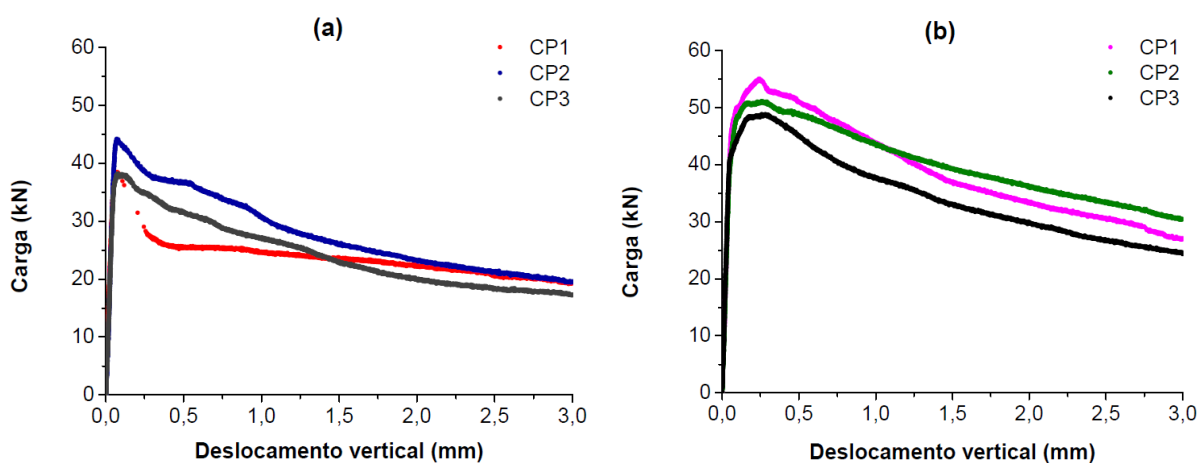


Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

4.2.4 Ensaio de tenacidade em prismas

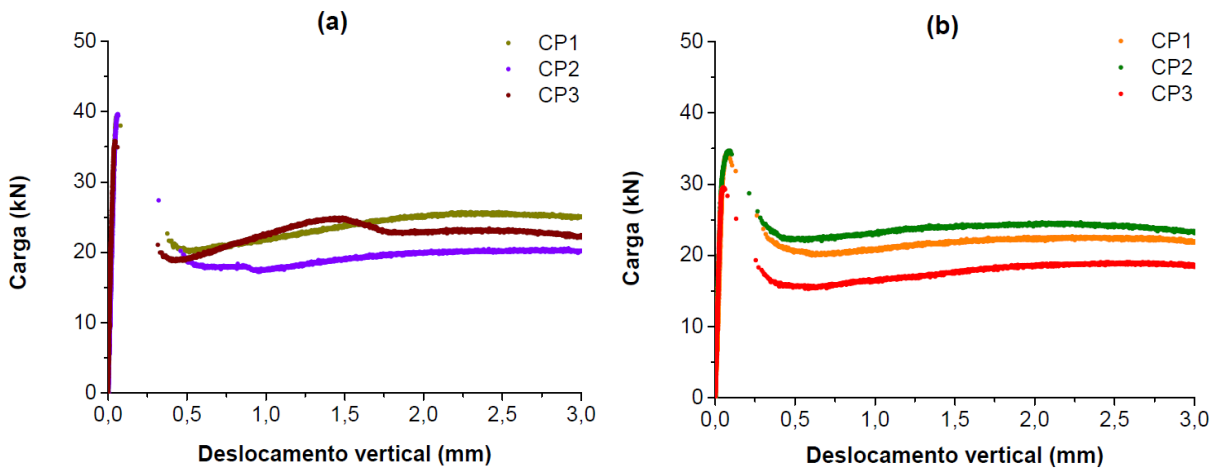
As Figuras 59 e 60 contêm as curvas carga *versus* deslocamento vertical resultantes do ensaio de tenacidade em prismas de concreto convencional com fibra de aço e com macrofibra polimérica, respectivamente.

Figura 59 – Curvas carga *versus* deslocamento vertical referentes às amostras de concreto de resistência convencional com teor de fibra de aço de (a) 0,5% e (b) 1,0%, em volume



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Figura 60 – Curvas carga *versus* deslocamento vertical referentes às amostras de concreto de resistência convencional com teor de macrofibra polimérica de (a) 0,5% e (b) 1,0%, em volume



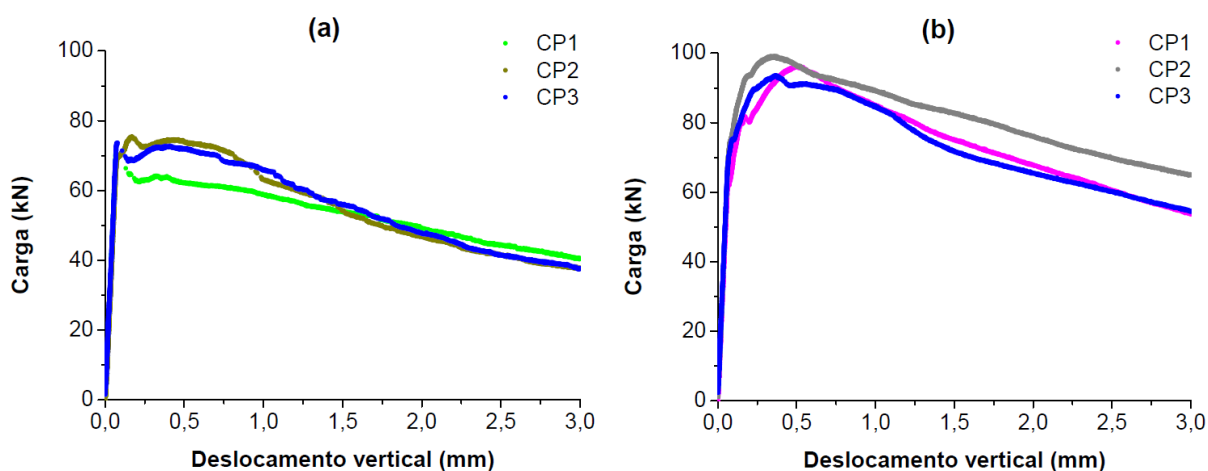
Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Nas amostras do concreto CC5FA (Figura 59 (a)), houve redução da capacidade resistente após a carga de pico ser atingida, caracterizando um comportamento *softening*. Em apenas uma destes corpos de prova, foi verificado instabilidade pós-pico até o deslocamento vertical de 0,25 mm. Já no concreto CC10FA (Figura 59 (b)) predominou-se o comportamento *hardening* até o deslocamento vertical de 0,25 mm, quando começou a apresentar queda da carga resistente.

Nas misturas de concreto convencional reforçado com macrofibra polimérica, foi verificado um comportamento inicial de *softening*. No concreto CC5PP (Figura 60 (a)), a instabilidade pós-pico se estendeu até um deslocamento vertical superior a 0,25 mm. Já no concreto CC10PP (Figura 60 (b)), tal instabilidade foi de menor magnitude, se limitando ao deslocamento de 0,25 mm. Após o fim da instabilidade pós-pico, estas amostras começaram a apresentar um ganho da capacidade resistente com o aumento do deslocamento (*slip-hardening*). Este resultado também foi obtido em concretos convencionais (com resistência à compressão inferior a 50 MPa) por Salvador e Figueiredo (2013) e Monte, Toaldo e Figueiredo (2014), os quais atribuíram este comportamento ao desfibrilamento das fibras.

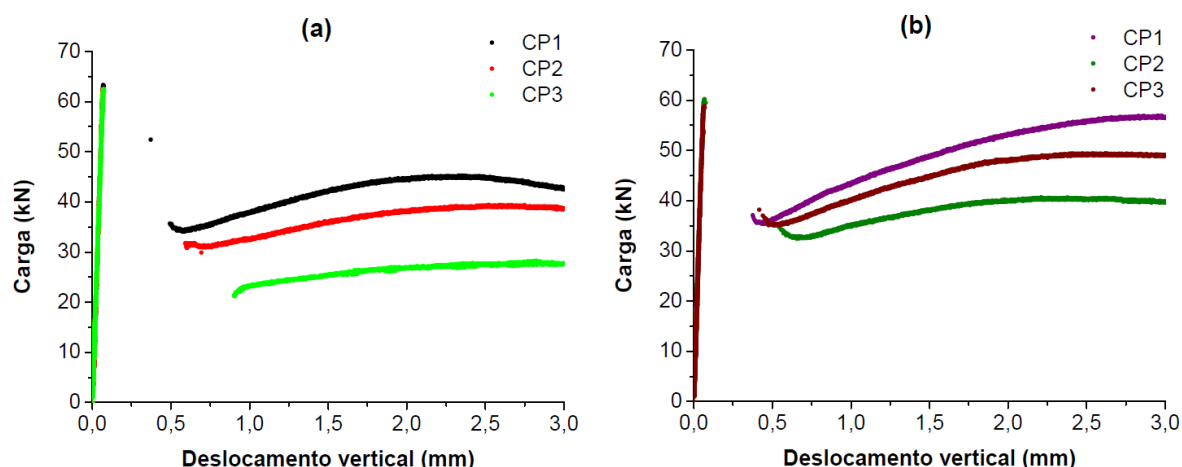
As curvas resultantes do ensaio de tenacidade em prismas de concreto de alta resistência reforçado com fibra de aço estão dispostas na Figura 61. Já as curvas referentes ao concreto de alta resistência reforçado com macrofibra polimérica estão na Figura 62.

Figura 61 – Curvas carga *versus* deslocamento vertical referentes às amostras de concreto de alta resistência com teor de fibra de aço de (a) 1,0% e (b) 2,0%, em volume



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Figura 62 – Curvas carga *versus* deslocamento vertical referentes às amostras de concreto de alta resistência com teor de macrofibra polimérica de (a) 1,0% e (b) 2,0%, em volume



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

As curvas referentes ao CAR10FA (Figura 61 (a)) apresentaram uma pequena instabilidade após a ruptura da matriz. Neste caso, a carga resistente pós-fissuração ficou aproximadamente constante e igual à carga de ruptura da matriz até o deslocamento vertical de 0,75 mm. Para valores de deslocamentos superiores, houve redução da carga resistente, indicando um comportamento *softening*. Já no caso do CAR20FA (Figura 61 (b)), a instabilidade foi inexistente e o compósito apresentou aumento da capacidade resistente (*hardening*) até um deslocamento vertical de 0,5 mm, a partir do qual começou a haver redução da carga resistente.

As amostras do CAR10PP (Figura 62 (a)) apresentaram a maior instabilidade pós-pico, a qual se estendeu até um deslocamento vertical de 1,0 mm em um dos prismas ensaiados. No concreto CAR20PP (Figura 62 (b)), o trecho de instabilidade foi encerrado no deslocamento de 0,5 mm. É interessante destacar que, após o fim da instabilidade, houve um aumento da carga resistente com o incremento de deslocamento (*slip-hardening*) nas duas misturas contendo macrofibra polimérica.

Apesar do número de macrofibras poliméricas (59.000 unidades/kg) existentes no concreto ser aproximadamente três vezes maior do que o número de fibras de aço (2.700 unidades/kg), o que indicaria uma maior dispersão nos resultados das misturas com fibra de aço, conforme ressaltado por Salvador (2013), o concreto com macrofibra polimérica analisado apresentou uma maior variabilidade dos resultados.

Os resultados do ensaio de tenacidade em prismas para cada tipo de concreto estão dispostos na Tabela 24. Tais resultados incluem resistência à tração na flexão ($f_{ct,f}$), fator de tenacidade ($\bar{\sigma}_b$) e resistência residual nos deslocamentos de 0,75 mm (σ_{600}^D) e de 3,00 mm (σ_{150}^D). Cabe ressaltar que os valores apresentados na Tabela 24 correspondem à média de três resultados individuais obtidos no ensaio, sendo estes resultados individuais apresentados nos Apêndices O a R deste trabalho.

Tabela 24 – Resultados do ensaio de tenacidade em prismas

Tipo de concreto	$f_{ct,f}$ (MPa)		$\bar{\sigma}_b$ (MPa)		σ_{600}^D (MPa)		σ_{150}^D (MPa)	
	Média	CV	Média	CV	Média	CV	Média	CV
CCR	5,07	1,34	-	-	-	-	-	-
CC5FA	5,37	8,35	3,37	8,52	3,92	14,93	2,50	7,02
CC10FA	6,89	6,05	5,01	7,72	5,97	8,26	3,64	11,17
CC5PP	5,10	5,58	3,03	8,09	2,66	8,54	3,00	10,97
CC10PP	4,37	8,66	2,87	14,39	2,59	16,87	2,82	11,70
CARR	7,97	2,49	-	-	-	-	-	-
CAR10FA	9,79	3,01	7,28	2,36	8,91	7,89	5,14	4,29
CAR20FA	12,85	2,85	10,09	5,75	12,06	1,49	7,69	10,93
CAR10PP	8,36	0,80	5,00	16,74	4,23	10,55	4,83	21,23
CAR20PP	7,82	2,83	5,89	10,05	4,91	9,82	6,46	17,31

Nota:

CV = coeficiente de variação, em %.

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Análise da resistência à tração ($f_{ct,f}$)

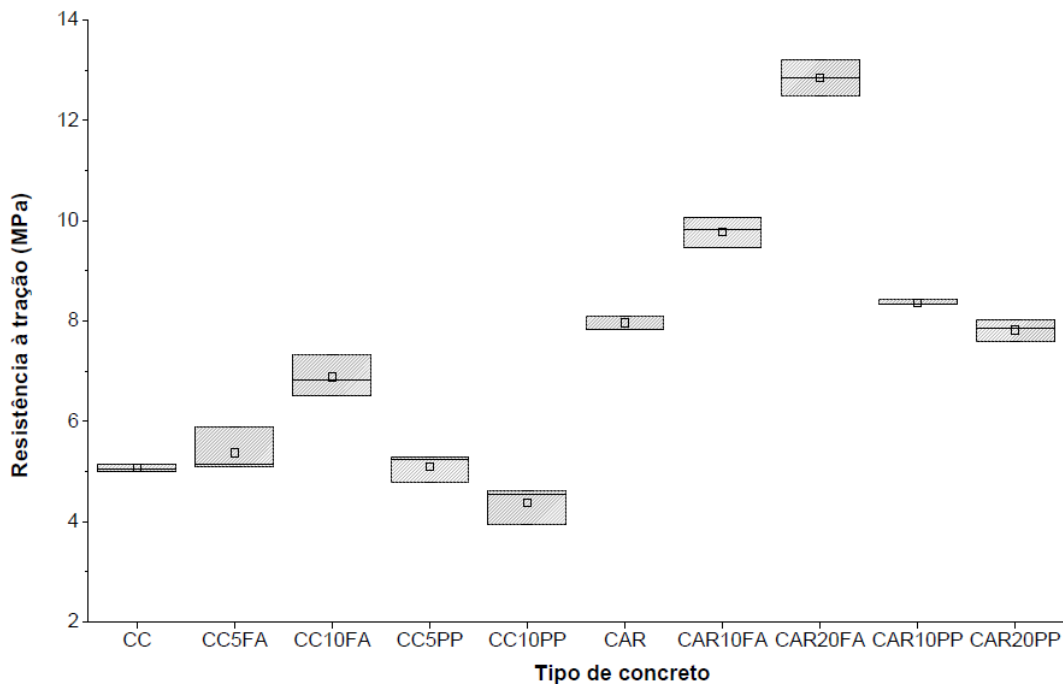
De acordo com a análise de variância (ANOVA), houve uma variação significativa no valor da resistência à tração do concreto com a adição de fibras. O concreto CC10FA apresentou um aumento de 35,9% no valor da resistência à tração em relação à amostra CCR, sendo considerada a maior variação entre os concretos convencionais com fibra. Isto ocorreu devido ao fato de se ter utilizado um volume de fibra superior ao volume crítico, provocando um comportamento de *hardening*. Para as demais misturas de concreto convencional com fibra, o valor de $f_{ct,f}$ ficou próximo ao do concreto CCR, com variação menor do que 15%, já que o comportamento predominante foi de *softening* nestes casos.

O valor da resistência à tração na flexão ficou praticamente inalterado com a adição de macrofibra polimérica ao concreto de alta resistência. Já nas amostras CAR10FA e CAR20FA foram obtidas resistências à tração superiores à resistência do concreto sem fibras (CARR). Devido ao comportamento *hardening* no início da fissuração, a amostra CAR20FA apresentou uma resistência aproximadamente 60% maior do que o concreto sem fibras.

O teste t indica que, para o teor de fibra de 0,5%, foi verificada uma alteração não significativa no valor da resistência à tração do concreto convencional de acordo com o tipo de fibra. Quando o teor de fibra aumentou para 1,0%, tal alteração se tornou significativa. Além disso, também houve uma variação significativa da resistência à tração do concreto convencional com o acréscimo do teor de cada tipo de fibra. No concreto de alta resistência, o tipo de fibra e o teor de fibra de aço exerceram influência no valor da resistência à tração.

Nas amostras sem fibra, o aumento percentual da resistência à tração (57,2%) ocorreu devido exclusivamente à alteração da matriz cimentícia. Como os concretos com macrofibra polimérica apresentaram comportamento de *softening*, a contribuição das fibras neste caso também pode ser desconsiderada. O menor aumento percentual no valor do $f_{ct,f}$, de 42,1%, foi obtido para o concreto com fibra de aço, já que o concreto convencional contendo este tipo de fibra manifestou comportamento *hardening*. Segundo o teste t, a matriz cimentícia alterou de modo significativo a resistência à tração tanto do concreto sem fibra quanto do concreto com fibra. Detalhes dos testes estatísticos para a resistência à tração do ensaio de tenacidade em prismas estão dispostos no Apêndice P.

O gráfico *boxplot* da resistência à tração do ensaio de tenacidade em prismas é exibido na Figura 63. Os concretos com fibra de aço apresentaram variações de resistência ligeiramente superiores em relação aos concretos com macrofibra polimérica. Houve pequena variação da resistência à tração com a alteração do teor de fibra.

Figura 63 – *Boxplot* para a resistência à tração (tenacidade em prismas)

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Análise do fator de tenacidade ($\bar{\sigma}_b$)

A alteração do tipo e do teor de fibra ocasionaram uma mudança significativa no valor do fator de tenacidade do concreto, segundo a análise de variância (ANOVA). No concreto convencional com fibra de aço, foi verificado um aumento de 48,7% no valor do fator de tenacidade ao dobrar o teor de fibra de 0,5% para 1,0%. Já para o concreto convencional com macrofibra polimérica houve uma redução de 5,3% com o incremento do teor de fibra, indicando a ineficiência quanto à tenacidade de se utilizar maiores teores de macrofibra polimérica neste tipo de concreto. Ao analisar concretos com teores iguais de cada tipo de fibra, verifica-se uma maior diferença de resultados com a utilização de elevados teores de fibra. Enquanto o concreto CC5PP apresentou um fator de tenacidade equivalente a 89,9% do valor apresentado pela mistura CC5FA, para o CC10PP tal proporção foi de 57,3% em relação ao CC10PP.

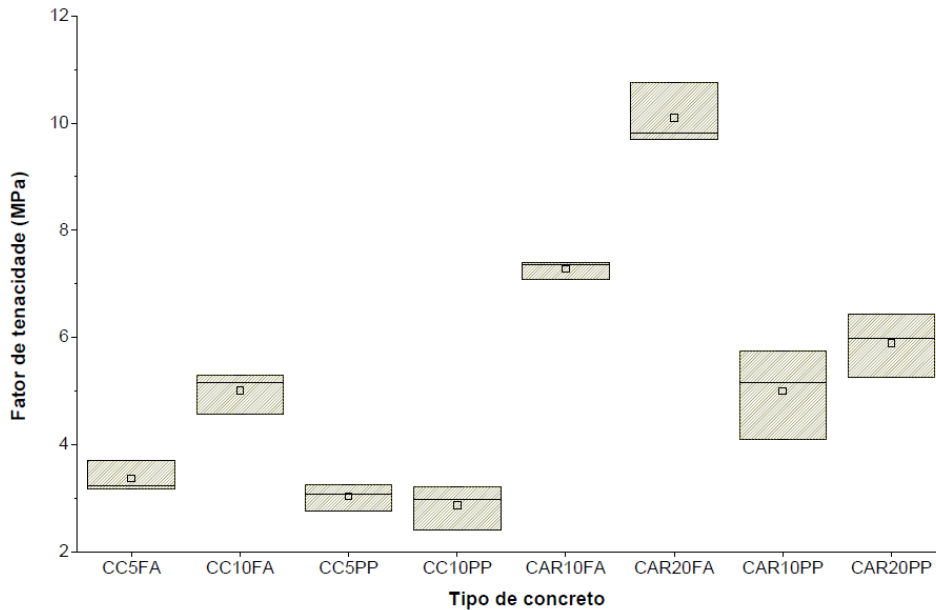
O teste t indica que o fator de tenacidade do concreto convencional não foi afetado de modo significativo pelo tipo de fibra, com a utilização de um teor de fibra de 0,5%. Ao aumentar o teor de fibra para 1,0%, o tipo de fibra começou a exercer uma influência significativa no valor desta resistência. A alteração do teor de fibra de aço também causou uma

variação significativa no valor do fator de tenacidade do concreto convencional. Já a adição de maiores teores de macrofibra polimérica foi indiferente para tal fator.

A adição do dobro de fibras ao concreto de alta resistência ocasionou um aumento do fator de tenacidade da ordem de 38,6% e de 17,8% para as fibras de aço e macrofibra polimérica, respectivamente, em relação ao resultado obtido com teor de 1,0% de fibras. Com isso, a utilização de um maior teor de fibras mostrou resultados mais eficazes quando o material adotado foi o aço. O concreto de alta resistência com macrofibra polimérica apresentou um fator de tenacidade equivalente a 68,7% e 58,4% do valor apresentado pela mistura de alta resistência com fibra de aço, considerando os teores de fibra de 1,0% e 2,0%, respectivamente, sugerindo a proximidade do desempenho dos dois tipos de fibra quanto à tenacidade com a utilização de baixos teores de fibra. O teste t indica que o tipo de fibra e o teor de fibra de aço provocaram alterações significativas no valor do fator de tenacidade do concreto de alta resistência, o qual não foi afetado de modo significativo pelo acréscimo no teor de macrofibra polimérica.

A alteração da matriz cimentícia teve um maior impacto na tenacidade do concreto com macrofibra polimérica do que na tenacidade do concreto com fibra de aço. Enquanto para a mistura com macrofibra polimérica foi registrado um aumento de 74,2% no fator de tenacidade, para a mistura com fibra de aço o acréscimo foi de 45,3%. Segundo o teste t, a variação da tenacidade devido à mudança da matriz cimentícia é considerada significativa tanto para o concreto com fibra de aço quanto para o concreto com macrofibra polimérica. Detalhes dos testes estatísticos para o fator de tenacidade do ensaio de tenacidade em prismas estão dispostos no Apêndice Q.

Na Figura 64 está disposto o gráfico *boxplot* referente ao fator de tenacidade do ensaio de tenacidade em prismas. A maioria dos concretos de alta resistência apresentaram variações do fator de tenacidade maiores do que o concreto convencional, sendo o concreto de alta resistência com macrofibra polimérica o que apresentou a maior variação.

Figura 64 – *Boxplot* para a resistência à tração (tenacidade em prismas)

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Análise da resistência residual no ELS (σ_{600}^P)

De acordo com a ANOVA, a alteração do tipo e do teor de fibra ocasionaram mudanças significativas no valor da resistência residual do concreto no ELS, que teve um acréscimo de 52,3% no concreto convencional com fibra de aço e uma redução de 2,6% no concreto convencional com macrofibra polimérica ao aumentar o teor de fibra de 0,5% para 1,0%. Para os teores de fibra de 0,5% e 1,0%, as misturas de concreto convencional com macrofibra polimérica apresentaram um valor de resistência da ordem de 67,9% e 43,4%, respectivamente, em relação ao concreto com fibra de aço. Isto pode indicar que a macrofibra polimérica e a fibra de aço tem desempenhos mais próximos quando utilizadas em baixos teores. O teste t indica que houve uma variação significativa no valor da resistência residual do concreto convencional no ELS com a alteração do tipo de fibra e do teor de fibra de aço, enquanto o aumento do teor de macrofibra polimérica ocasionou mudanças não significativas.

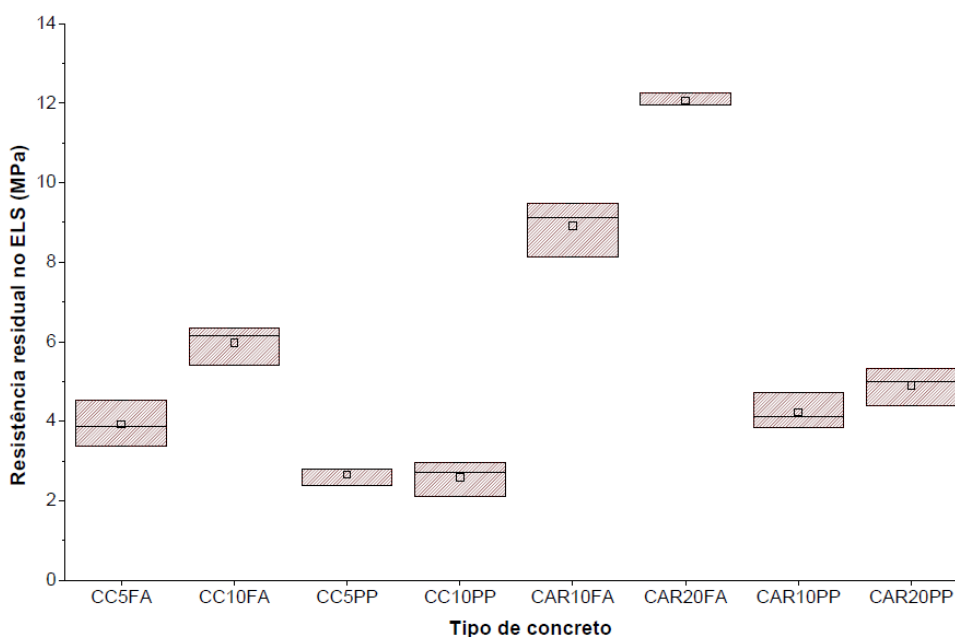
Com o aumento do teor de fibra de 1,0% para 2,0% no concreto de alta resistência, foram verificados aumentos percentuais de 35,4% e 16,1% na resistência residual no ELS para a mistura com fibra de aço e para a mistura com macrofibra polimérica, respectivamente. Analisando os concretos de alta resistência com teores iguais de cada tipo de fibra, foram obtidos valores de resistência da mistura com macrofibra polimérica equivalentes a 47,5% e 40,7% do valor apresentado pelo concreto com fibra de aço para os teores de fibra de 1,0% e

2,0%, respectivamente. De acordo com o teste t, a variação no valor da resistência residual no ELS do concreto de alta resistência com a alteração do tipo de fibra e do teor de fibra de aço foi significativa. A alteração de tal resistência foi não significativa com o aumento do teor da macrofibra polimérica.

Assim como o fator de tenacidade, a resistência residual no ELS teve uma maior variação no concreto com macrofibra polimérica em relação ao concreto com fibra de aço com a mudança da matriz cimentícia. O teste t mostra que a mudança da matriz cimentícia também exerceu uma influência significativa no valor da resistência residual do concreto no ELS. Detalhes dos testes estatísticos para a resistência residual no ELS do ensaio de tenacidade em prismas estão dispostos no Apêndice R.

O gráfico *boxplot* da resistência residual no ELS do ensaio de tenacidade em prismas está disposto na Figura 65. Analisando tal gráfico, é possível perceber que a variação do valor da resistência independe do tipo e do teor de fibra. No geral, as variações foram pequenas e próximas.

Figura 65 – *Boxplot* para a resistência residual no ELS (tenacidade em prismas)



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Análise da resistência residual no ELU (σ_{150}^D)

De acordo com a análise de variância (ANOVA), houve uma alteração significativa no valor da resistência residual do concreto no ELU com as mudanças do tipo e do teor de fibra.

O aumento do teor de fibra ocasionou um acréscimo de 45,6% no valor da resistência residual no ELU do concreto convencional com fibra de aço. Já para o concreto convencional com macrofibra polimérica, foi verificado uma redução de 6,0%. Analisando as misturas com iguais teores de cada tipo de fibra, constatou-se que o concreto CC5FA apresentou uma resistência equivalente a 83,3% do valor apresentado pelo CC5PP, enquanto que para o CC10PP houve uma equivalência de 77,5% em relação ao CC10FA. Como o concreto com macrofibra polimérica manifestou comportamento *slip-hardening*, sua resistência residual em grandes deslocamentos se aproximou da resistência oferecida pelo concreto com fibra de aço, chegando a ultrapassá-la quando utilizado baixos teores de fibra.

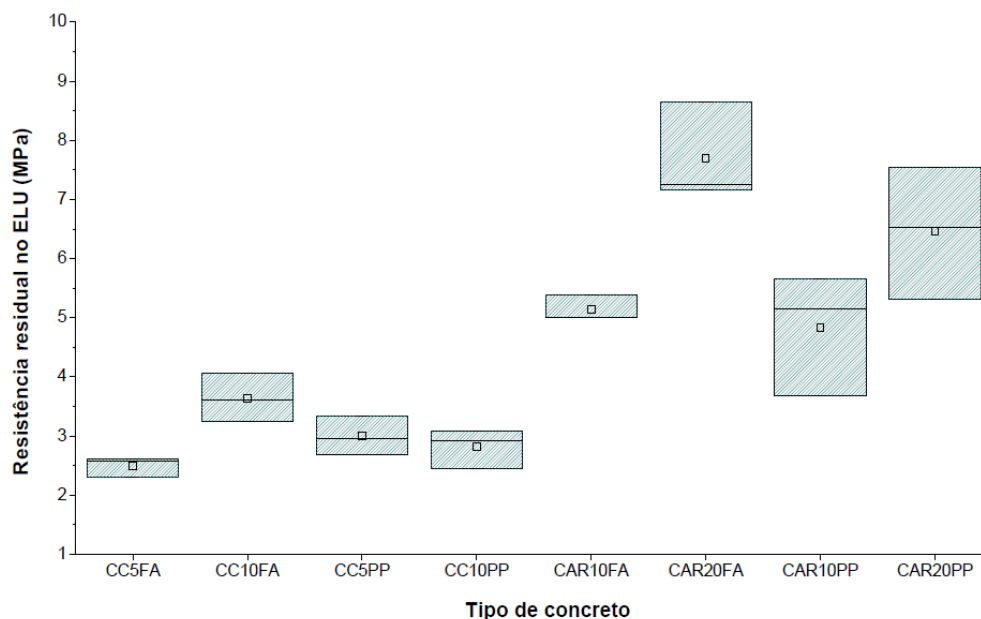
No concreto de alta resistência foram verificados aumentos percentuais de 49,6% e 33,7% na resistência residual no ELU para a mistura com fibra de aço e para a mistura com macrofibra polimérica, respectivamente, quando o teor de fibra passou de 1,0% para 2,0%. O concreto com macrofibra polimérica apresentou resistência residual no ELU equivalente a 94% e 84% do valor apresentado pelo concreto com fibra de aço, considerando teores de fibra de 1,0% e 2,0%, respectivamente. Com um menor teor de fibra, houve uma maior aproximação do desempenho entre os dois tipos de fibra quanto à resistência residual do concreto de alta resistência no ELU.

O teste t indica que, no concreto convencional e no concreto de alta resistência, o tipo de fibra e o teor de macrofibra polimérica tiveram uma influência não significativa no valor da resistência residual no ELU, sendo o teor de fibra de aço o fator de impacto significativo para tal resistência.

Com a alteração da matriz cimentícia de concreto convencional para concreto de alta resistência, a resistência residual no ELU teve aumento percentual superior a 60% para a mistura com macrofibra polimérica, enquanto que com a adição de fibra de aço tal acréscimo foi inferior a 50%. O teste t indica que a alteração da matriz cimentícia ocasionou uma mudança significativa na resistência residual no ELU tanto do concreto com fibra de aço quanto do concreto com macrofibra polimérica. Detalhes dos testes estatísticos para a resistência residual no ELU do ensaio de tenacidade em prismas estão dispostos no Apêndice S.

O gráfico *boxplot* da resistência residual no ELU do ensaio de tenacidade em prismas, mostrado na Figura 66, indica que os concretos de alta resistência apresentaram variações superiores aos concretos convencionais. O concreto de alta resistência com macrofibra polimérica teve a maior variação da resistência residual, enquanto que o teor de fibra teve pequena influência, com exceção do concreto de alta resistência com fibra de aço.

Figura 66 – *Boxplot* para a resistência residual no ELU (tenacidade em prismas)

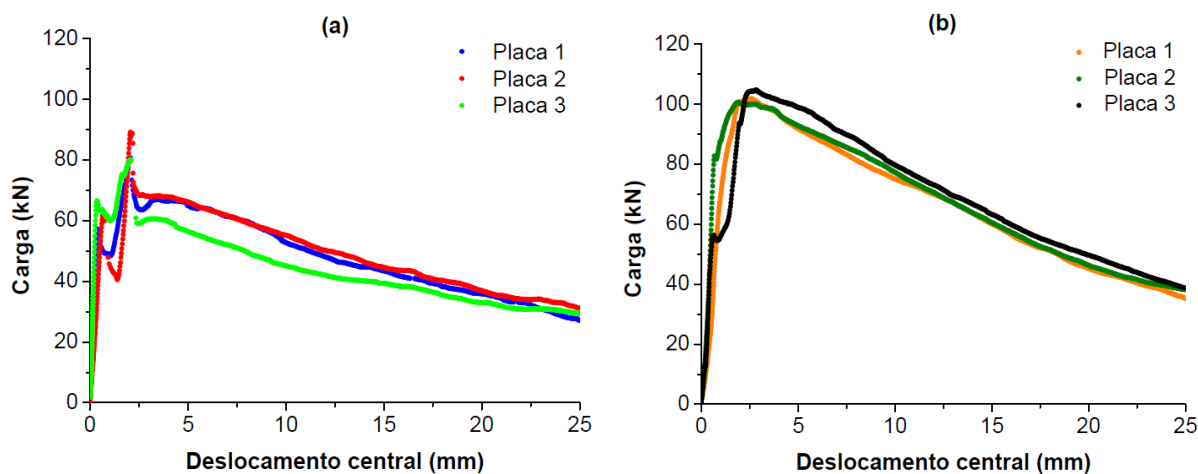


Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

4.2.5 Ensaio de tenacidade em placas

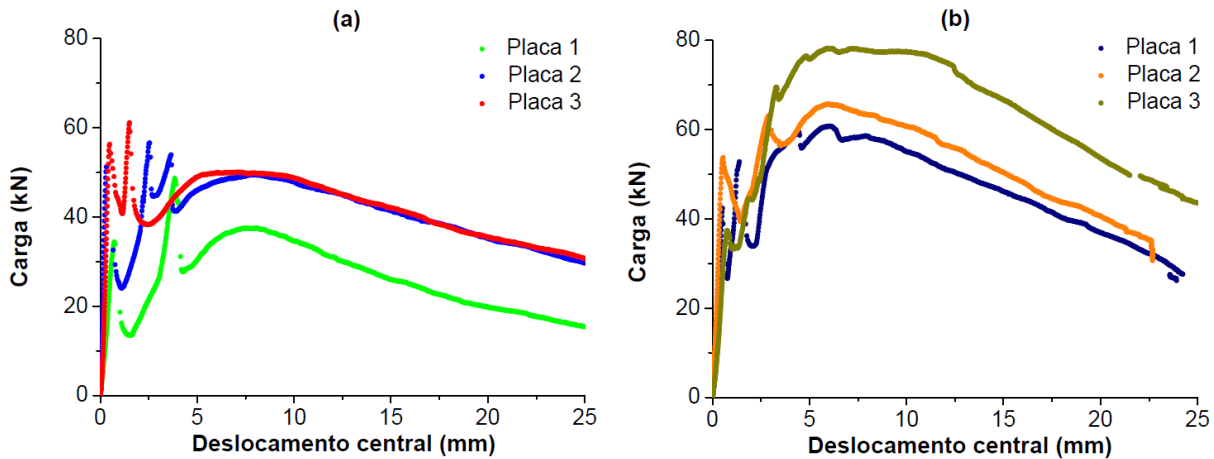
Na Figura 67 são apresentadas as curvas carga *versus* deslocamento central obtidas no ensaio de tenacidade em placas de concreto convencional reforçado com fibras de aço. Já a Figura 68 contém as curvas resultantes para concreto convencional reforçado com macrofibra polimérica.

Figura 67 – Curvas carga *versus* deslocamento central referentes às amostras de concreto de resistência convencional com teor de fibra de aço de (a) 0,5% e (b) 1,0%, em volume



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Figura 68 – Curvas carga *versus* deslocamento central referentes às amostras de concreto de resistência convencional com teor de macrofibra polimérica de (a) 0,5% e (b) 1,0%, em volume

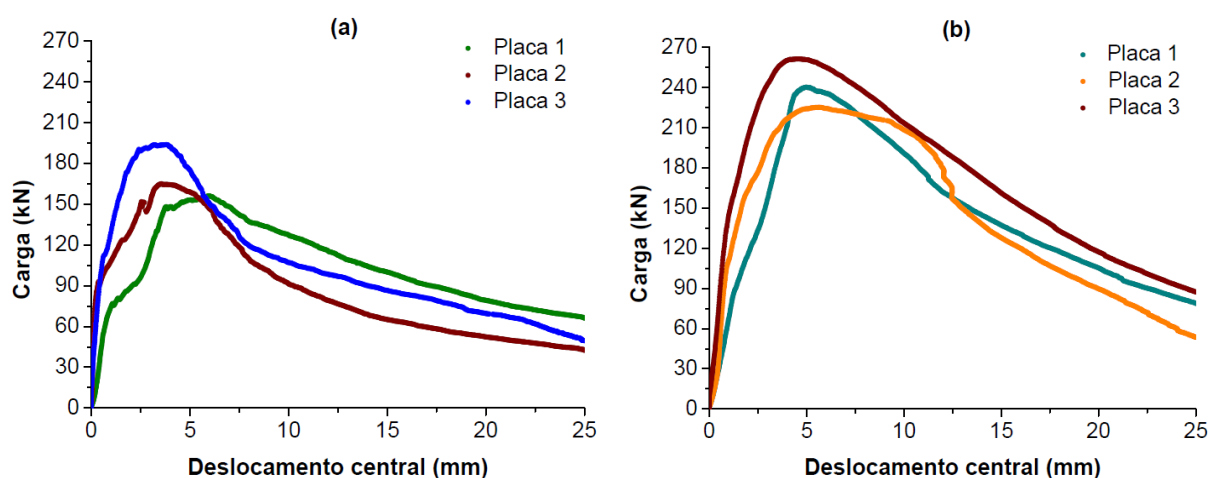


Nas amostras de concreto convencional com fibra de aço foi observado um aumento da capacidade resistente após a ruptura da matriz. Tanto para o concreto CC5FA (Figura 67 (a)) quanto para o concreto CC10FA (Figura 67 (b)) houve um aumento da carga resistente até o deslocamento central de 2,5 mm. Para deslocamentos superiores a este, foi observado uma redução da carga. O comportamento de *hardening* foi de maior relevância para a mistura CC10FA, em que a carga máxima ultrapassou 100 kN. O fenômeno de instabilidade foi pouco perceptível em tais concretos.

O comportamento de *slip-hardening* foi predominante para as amostras de concreto convencional com macrofibra polimérica. Foram verificadas sucessivas quedas e incrementos da capacidade resistente até o deslocamento central de 7,5 mm, a partir do qual iniciou-se uma redução da carga. Em uma das amostras do concreto CC10PP (Figura 68 (b)) foi verificada instabilidade pós-pico, enquanto que em todas as amostras do concreto CC5PP (Figura 68 (a)) tal fenômeno foi recorrente.

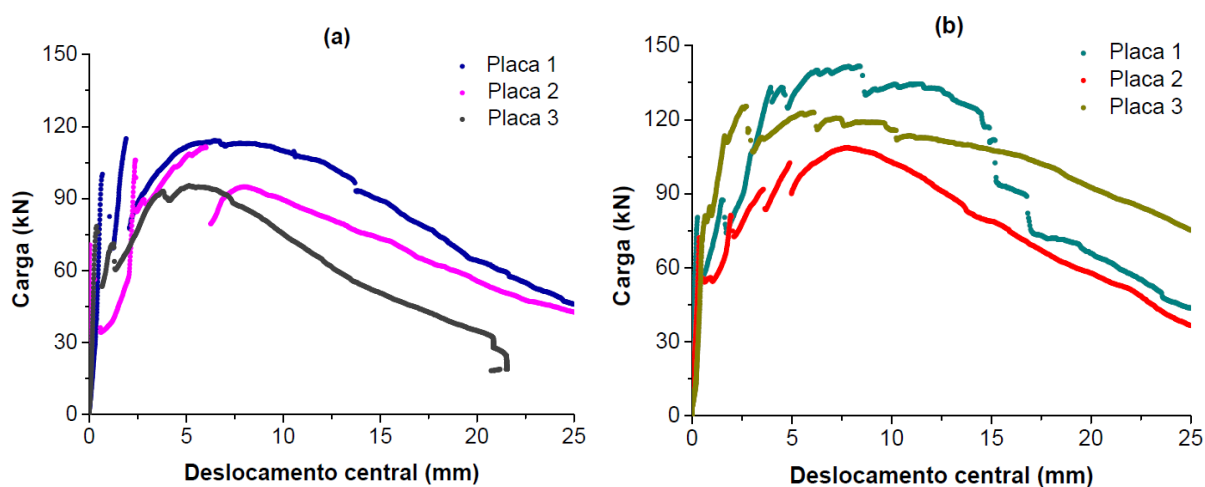
Na Figura 69 são exibidas as curvas resultantes do ensaio de tenacidade em placas de concreto de alta resistência reforçado com fibra de aço. As curvas correspondentes ao concreto de alta resistência reforçado com macrofibra polimérica são apresentadas na Figura 70.

Figura 69 – Curvas carga *versus* deslocamento central referentes às amostras de concreto de alta resistência com teor de fibra de aço de (a) 1,0% e (b) 2,0%, em volume



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Figura 70 – Curvas carga *versus* deslocamento central referentes às amostras de concreto de alta resistência com teor de macrofibra polimérica de (a) 1,0% e (b) 2,0%, em volume



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Para o concreto de alta resistência com fibra de aço foi verificado o comportamento de *hardening* para ambos os teores de fibra, com aumento da carga resistente até o deslocamento central de aproximadamente 5 mm. Após atingir a carga máxima, houve redução da capacidade resistente até o deslocamento final. As amostras do concreto CAR10FA (Figura 69 (a)) tiveram uma carga de pico variando entre 150 kN e 200 kN, enquanto que para o CAR20FA (Figura 69 (b)) a carga máxima ultrapassou 200 kN. A instabilidade pós-pico foi inexistente nestes concretos.

O concreto de alta resistência com macrofibra polimérica apresentou oscilações no valor da carga resistente após a ruptura da matriz cimentícia, sendo predominante o comportamento de *slip-hardening*. Figueiredo (2011) atribui estas oscilações à formação de múltiplas fissuras que ocorre em pequenos deslocamentos e cuja quantidade se estabiliza em determinado momento. Neste concreto, a carga máxima foi atingida com o deslocamento central de aproximadamente 7,5 mm. O fenômeno da instabilidade foi observado tanto na mistura do CAR10PP (Figura 70 (a)) quando na mistura do CAR20PP (Figura 70 (b)).

Os resultados do ensaio de tenacidade em placas para cada tipo de concreto, incluindo a carga máxima e a tenacidade até o deslocamento central de 25 mm, estão dispostos na Tabela 25. Os valores apresentados na Tabela 25 correspondem à média de três resultados individuais obtidos no ensaio, sendo estes resultados individuais apresentados nos Apêndices S e T deste trabalho.

Tabela 25 – Resultados do ensaio de tenacidade em placas

<i>Tipo de concreto</i>	<i>Carga máxima (kN)</i>		<i>Tenacidade (J)</i>	
	<i>Média</i>	<i>CV</i>	<i>Média</i>	<i>CV</i>
CCR	46,32	25,75	-	-
CC5FA	83,30	6,07	1176,26	5,38
CC10FA	102,37	2,11	1679,83	2,59
CC5PP	55,47	11,35	907,63	23,89
CC10PP	68,27	13,13	1277,61	18,72
CARR	83,17	8,42	-	-
CAR10FA	171,66	11,48	2481,19	9,95
CAR20FA	242,29	7,50	3864,71	10,50
CAR10PP	107,23	9,77	1795,41	21,98
CAR20PP	125,24	13,13	2332,12	15,19

Nota:
CV = coeficiente de variação, em %.

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Análise da carga máxima

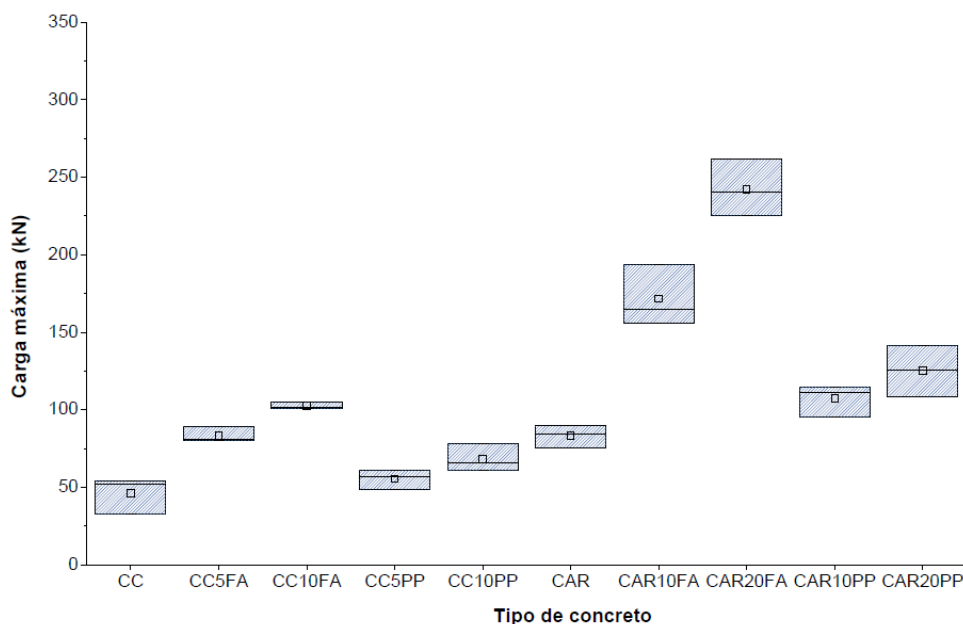
De acordo com a análise de variância (ANOVA), houve uma variação significativa no valor da carga máxima do concreto com a adição de fibra. A adição de fibra de aço nos teores de 0,5% e 1,0% provocaram um acréscimo da carga máxima de 79,8% e 121%, respectivamente, no concreto de resistência convencional em relação à amostra de referência CCR. Com a utilização de 0,5% e 1,0% de macrofibra polimérica, o aumento da carga máxima

foi de 19,8% e 47,4%, respectivamente, para o concreto convencional. O concreto convencional com macrofibra polimérica apresentou valores de carga máxima correspondentes a 66,6% e 66,7% do valor apresentado pelo concreto com fibra de aço, para os teores de fibra de 0,5% e 1,0%, respectivamente. Isto pode indicar que há uma equivalência constante de carga máxima entre concretos convencionais contendo cada tipo de fibra, independente do teor de fibra. Segundo o teste t, o tipo de fibra e o teor de fibra de aço adicionada provocaram variações significativas no valor da carga máxima resistente. Já o aumento no teor de macrofibra polimérica foi considerado não significativo para a carga máxima do material.

No concreto de alta resistência foram verificados os aumentos percentuais de 106,4% e 191,3% no valor da carga máxima com a adição de fibra de aço nos teores de 1,0% e 2,0%, respectivamente, em relação à amostra sem fibra (CARR). Já com a adição de macrofibra polimérica nos teores de 1,0% e 2,0%, os acréscimos percentuais no valor da carga máxima foram de 28,8% e 50,6%, respectivamente. Comparando concretos de alta resistência contendo teores iguais de cada tipo de fibra, foram obtidos valores de cargas máximas para a mistura com macrofibra polimérica equivalentes à 62,5% e 51,7% dos valores apresentados pela mistura com fibra de aço, para os teores de fibra de 1,0% e 2,0%, respectivamente. Neste caso, a macrofibra polimérica apresentou um desempenho mais próximo da fibra de aço ao utilizar um menor teor de fibra. O teste t indica que o tipo e o teor de fibra ocasionaram alterações significativas no valor da carga máxima resistente do concreto de alta resistência.

A alteração da matriz cimentícia de um concreto convencional para um concreto de alta resistência ocasionou um aumento percentual de 79,6% no valor da carga máxima. O efeito de *hardening* foi mais significativo no concreto CC10FA do que no concreto CAR10FA, refletindo na redução do aumento percentual da carga máxima em comparação com a mistura sem fibra. Situação semelhante ocorreu no concreto contendo macrofibra polimérica. De acordo com o teste t, houve uma variação significativa da carga máxima do concreto com a mudança da matriz cimentícia. Maiores detalhes dos testes estatísticos para a carga máxima do concreto no ensaio de tenacidade em placas estão dispostos no Apêndice T.

A Figura 71 contém o gráfico *boxplot* para a carga máxima registrada no ensaio de tenacidade em placas. As maiores variações da carga máxima ocorreram nos concretos de alta resistência. O tipo e o teor de fibra exerceram pequena influência em tal variação.

Figura 71 – *Boxplot* para a carga máxima (tenacidade em placas)

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Análise da tenacidade

O valor da tenacidade teve uma variação significativa com a alteração do tipo e do teor de fibra, segundo a análise de variância (ANOVA). Ao dobrar o teor de fibra de aço de 0,5% para 1,0% no concreto convencional, houve um acréscimo de 42,8% no valor da tenacidade. Já com o aumento do teor de macrofibra polimérica tal acréscimo foi de 40,8%. O concreto convencional com macrofibra polimérica apresentou uma tenacidade equivalente a 77,2% e 76,1% do valor obtido para a mistura com fibra de aço, considerando teor de fibra de 0,5% e 1,0%, respectivamente. Isto pode indicar que, independente do teor de fibra, há uma proporção constante de desempenho quanto a tenacidade entre o concreto com fibra de aço e o concreto com macrofibra polimérica, ambos de resistência convencional. O teste t indica que o tipo de fibra, quando utilizado um baixo teor de fibra (0,5%), e o teor de macrofibra polimérica exerceram uma influência não significativa no valor da tenacidade do concreto convencional. Já o acréscimo no teor de fibra de aço provocou uma alteração significativa na tenacidade do concreto convencional.

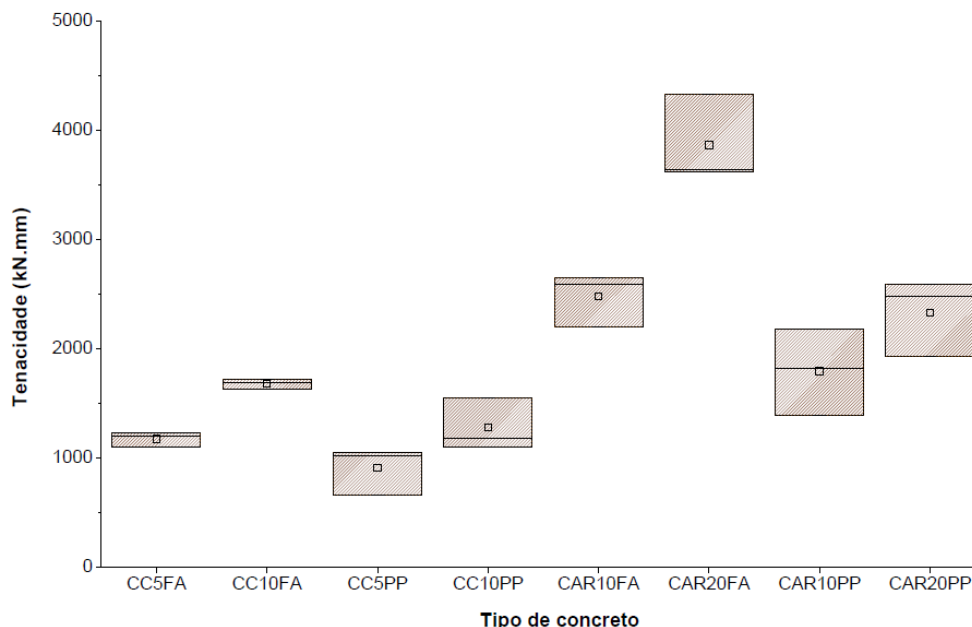
No concreto de alta resistência foram verificados aumentos percentuais de 55,8% e 29,9% no valor da tenacidade para as misturas com fibra de aço e com macrofibra polimérica, respectivamente, quando o teor de fibra passou de 1,0% para 2,0%. Com isso, torna-se mais viável utilizar maiores teores de fibra de aço do que de macrofibra polimérica neste tipo de

concreto quando a finalidade é o ganho de tenacidade. Para os teores de fibra de 1,0% e 2,0%, o concreto de alta resistência com macrofibra polimérica apresentou tenacidade correspondente a 72,4% e 60,3% do valor apresentado pela mistura com fibra de aço, indicando uma maior aproximação do desempenho dos dois tipos de fibra quanto à tenacidade com a utilização de menores teores de fibra. Segundo o teste t, foi registrada uma variação significativa no valor da tenacidade do concreto de alta resistência de acordo com o tipo de fibra ao utilizar um maior teor de fibra (2,0%). Isto pode estar relacionado à perda de trabalhabilidade da mistura com alto teor de fibras, que acabou prejudicando a homogeneidade do concreto e afetando seu desempenho quanto à tenacidade. Além disso, a tenacidade de tal concreto também teve uma mudança significativa com o aumento do teor de fibra de aço.

O aumento percentual da tenacidade devido à mudança da matriz cimentícia foi mais relevante para o concreto com fibra de aço do que para o concreto com macrofibra polimérica. De acordo com o teste t, a alteração da matriz cimentícia teve uma influência significativa no valor da tenacidade apenas para o caso do concreto com fibra de aço. Maiores detalhes dos testes estatísticos para a tenacidade do concreto no ensaio de tenacidade em placas estão dispostos no Apêndice U.

De acordo com a classificação do concreto quanto à tenacidade, proposta pela EFNARC (1996), todas as misturas com fibras se enquadram na categoria C, com tenacidade superior a 1000 J, exceto o concreto CC5PP, que pertence à categoria B.

O gráfico *boxplot* para a tenacidade das placas é mostrado na Figura 72 e indica uma maior variação dos resultados nos concretos de alta resistência. Além disso, as misturas com macrofibra polimérica apresentaram uma variação de tenacidade superior em relação aos concretos com fibra de aço.

Figura 72 – *Boxplot* para a tenacidade (tenacidade em placas)

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

4.3 Síntese dos resultados dos testes estatísticos

A síntese dos resultados dos testes estatísticos para avaliar a influência do tipo de fibra nas diferentes propriedades dos concretos está disposta na Tabela 26. Já a síntese dos resultados referentes à influência do teor de fibra e do tipo de matriz cimentícia está contida nas Tabelas 27 e 28, respectivamente.

De acordo com a Tabela 26, é observada uma variação não significativa na maioria das propriedades do concreto convencional com 0,5% de fibra devido a alteração do tipo de fibra. Já as misturas com maiores teores de fibra, tanto referente ao concreto convencional quanto ao concreto de alta resistência, apresentaram o maior número de propriedades afetadas significativamente com a alteração do tipo de fibra.

O aumento do teor de fibra de aço provocou alterações significativas em praticamente todas as propriedades analisadas do concreto convencional e do concreto de alta resistência, conforme disposto na Tabela 27. Já o acréscimo do teor de macrofibra polimérica não ocasionou alterações significativas em diversas propriedades: índice de vazios, fator de tenacidade, resistência residual no ELS e no ELU (prismas) e tenacidade das placas.

A alteração da matriz cimentícia teve uma influência significativa na maioria das propriedades, exceto na massa específica da amostra saturada e na resistência residual no ELU (Barcelona), como mostrado na Tabela 28. No caso do concreto com macrofibra polimérica também não houve variação significativa da massa específica da amostra seca e da tenacidade (placas).

Tabela 26 – Síntese dos resultados dos testes estatísticos para avaliar a influência do tipo de fibra nas diferentes propriedades dos concretos

Parâmetro avaliado			
Tipo de fibra	CCR	0,5	
		1,0	
CARR	1,0		
	2,0		
Tipo de matriz			
Teor de fibra (%)			
Absorção de água			
Índice de vazios			
Massa específica da amostra seca			
Massa específica da amostra saturada			
Massa específica da amostra real			
Resistência à compressão			
Resistência à tração (Ensaio Barcelona)			
Tenacidade (Ensaio Barcelona)			
Resistência residual no ELS (Ensaio Barcelona)			
Resistência residual no ELU (Ensaio Barcelona)			
Resistência à tração (Prismas)			
Fator de tenacidade (Prismas)			
Resistência residual no ELS (Prismas)			
Resistência residual no ELU (Prismas)			
Carga máxima (Placas)			
Tenacidade (Placas)			


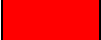
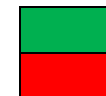
Legenda:
 Diferença significativa
 Diferença não significativa

Tabela 27 – Síntese dos resultados dos testes estatísticos para avaliar a influência do teor de fibra nas diferentes propriedades dos concretos



Parâmetro avaliado			
Teor de fibra	CCR	FA	
		PP	
CARR	FA		
	PP		
Tipo de matriz			
Tipo de fibra			
Absorção de água			
Índice de vazios			
Massa específica da amostra seca			
Massa específica da amostra saturada			
Massa específica da amostra real			
Resistência à compressão			
Resistência à tração (Ensaio Barcelona)			
Tenacidade (Ensaio Barcelona)			
Resistência residual no ELS (Ensaio Barcelona)			
Resistência residual no ELU (Ensaio Barcelona)			
Resistência à tração (Prismas)			
Fator de tenacidade (Prismas)			
Resistência residual no ELS (Prismas)			
Resistência residual no ELU (Prismas)			
Carga máxima (Placas)			
Tenacidade (Placas)			

Legenda:

Diferença significativa
Diferença não significativa

Tabela 28 – Síntese dos resultados dos testes estatísticos para avaliar a influência do tipo de matriz nas diferentes propriedades dos concretos

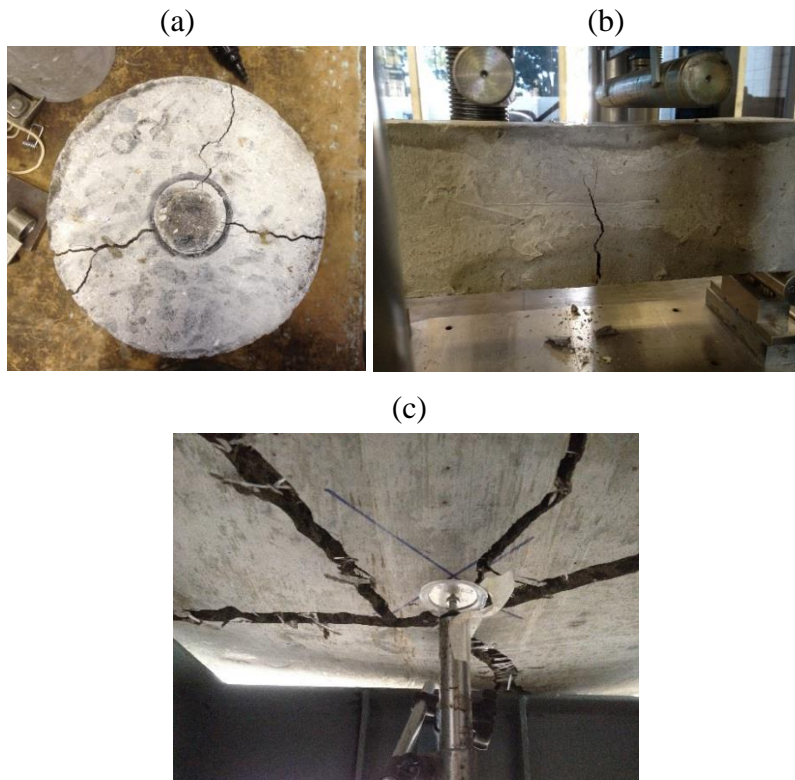
Parâmetro avaliado		Tipo de matriz		
Tipo de fibra		Sem fibra	FA	PP
Absorção de água		Significativa	Significativa	Significativa
Índice de vazios		Significativa	Significativa	Significativa
Massa específica da amostra seca		Significativa	Significativa	Significativa
Massa específica da amostra saturada		Significativa	Significativa	Significativa
Massa específica da amostra real		Significativa	Significativa	Significativa
Resistência à compressão		Significativa	Significativa	Significativa
Resistência à tração (Ensaio Barcelona)		Significativa	Significativa	Significativa
Tenacidade (Ensaio Barcelona)		-	-	-
Resistência residual no ELS (Ensaio Barcelona)		Significativa	Significativa	Significativa
Resistência residual no ELU (Ensaio Barcelona)		Significativa	Significativa	Significativa
Resistência à tração (Prismas)		Significativa	Significativa	Significativa
Fator de tenacidade (Prismas)		-	-	-
Resistência residual no ELS (Prismas)		Significativa	Significativa	Significativa
Resistência residual no ELU (Prismas)		Significativa	Significativa	Significativa
Carga máxima (Placas)		Significativa	Significativa	Significativa
Tenacidade (Placas)		-	-	-

Legenda:
 Diferença significativa
 Diferença não significativa

4.4 Análise comparativa entre os ensaios de tenacidade

Os ensaios de tenacidade apresentaram diferentes padrões de fissuração, conforme exibido na Figura 73. Enquanto nos prismas predominou a formação de apenas uma fissura, nos cilindros e nas placas houve a formação de múltiplas fissuras.

Figura 73 – Padrão de fissuração no corpo de prova (a) cilíndrico, (b) prismático e na (c) placa



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

As amostras de concreto sem fibra se separaram em várias partes após a ruptura do material. A Figura 74 ilustra tal situação em cada um dos ensaios de tenacidade realizados.

Figura 74 – Corpo de prova (a) cilíndrico, (b) prismático e (c) placa após a ruptura do concreto sem fibra



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

A instabilidade observada em algumas amostras, tanto no ensaio Barcelona quanto no ensaio de tenacidade à flexão, ocorreu devido à utilização de uma máquina de ensaio com sistema aberto de controle de velocidade de carregamento. Quando são utilizados baixos teores de fibras ou fibras de menor rigidez, essa instabilidade é mais pronunciada (MONTE; TOALDO; FIGUEIREDO, 2014). Ao comparar os três métodos de ensaio, observa-se que a instabilidade ocorreu de modo mais pronunciado no ensaio de flexão em prismas, sendo perceptível pelo maior distanciamento entre os pontos da curva carga *versus* deslocamento central. Tal constatação também foi verificada por Monte (2015).

É importante ressaltar que uma mesma mistura de concreto pode apresentar comportamentos distintos dependendo do ensaio realizado, como disposto na Tabela 29. As misturas contendo macrofibra polimérica, por exemplo, apresentaram apenas comportamento *softening* no ensaio Barcelona, enquanto no ensaio de tenacidade em prismas e em placas desenvolveram comportamento *slip-hardening*. Cada ensaio possui uma distribuição de deformações específica, o que influencia no desempenho do material (DI PRISCO; PLIZZARI; VANDEWALLE, 2009).

Tabela 29 – Comportamento dos concretos em cada tipo de ensaio

Tipo de concreto	Ensaio Barcelona	Tenacidade em prismas	Tenacidade em placas
CC5FA	<i>softening</i>	<i>softening</i>	<i>hardening</i>
CC10FA	<i>softening</i>	<i>hardening</i>	<i>hardening</i>
CC5PP	<i>softening</i>	<i>slip-hardening</i>	<i>slip-hardening</i>
CC10PP	<i>softening</i>	<i>slip-hardening</i>	<i>slip-hardening</i>
CAR10FA	<i>softening</i>	<i>softening</i>	<i>hardening</i>
CAR20FA	<i>hardening</i>	<i>hardening</i>	<i>hardening</i>
CAR10PP	<i>softening</i>	<i>slip-hardening</i>	<i>slip-hardening</i>
CAR20PP	<i>softening</i>	<i>slip-hardening</i>	<i>slip-hardening</i>

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

De acordo com o *fib Model Code 2010* (FIB, 2010), há a formação de múltiplas fissuras quando o material manifesta comportamento *hardening*. No entanto, a maioria dos prismas com comportamento *hardening* apresentaram a formação de apenas uma fissura na região central (Figura 75 (a)). Apenas em um dos prismas de CAR20FA houve a formação de múltiplas fissuras, como exibido na Figura 75 (b).

Figura 75 – Padrão de fissuração dos prismas com comportamento hardening (a) e formação de múltiplas fissuras em prisma de concreto CAR20FA



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Mesmo utilizando um menor teor de fibra de aço no concreto convencional e no concreto de alta resistência, foi obtida uma tenacidade superior ou próxima ao da mistura com maior quantidade de macrofibra polimérica. Tal situação sugere uma possível correlação de desempenho entre os dois tipos de fibra para esta propriedade. Os testes t , presentes no Apêndice V, confirmam esta hipótese, indicando que, na maioria das misturas, os valores de tenacidade do concreto com menor teor de fibra de aço e da mistura com maior teor de macrofibra polimérica são estatisticamente equivalentes. Tal observação não é válida somente para a tenacidade dos prismas de concreto de alta resistência. Monte (2015) também observou esta equivalência de desempenho entre a fibra de aço e a macrofibra polimérica para a tenacidade e a resistência residual no ensaio Barcelona e de flexão em prismas. Vale ressaltar que as fibras utilizadas nesta pesquisa são diferentes das utilizadas em estudos anteriores, como o de Monte (2015), colaborando para reforçar algumas constatações pertinentes, como é o caso da equivalência de desempenho das fibras.

O concreto com menor teor de fibra de aço também apresentou valores de resistência residual no ELS superiores aos do concreto com maior teor de macrofibra polimérica, tanto no ensaio Barcelona quanto no ensaio de tenacidade em prismas. Os testes t (Apêndice X) indicam que apenas para o ensaio Barcelona os resultados são estatisticamente equivalentes. Para a resistência residual no ELU tal observação não é válida, já que as macrofibras poliméricas apresentam comportamento distinto das fibras de aço em maiores deslocamentos, com ganho ou menor perda de capacidade resistente. Figueiredo *et al.* (2012)

identificaram uma equivalência de desempenho entre as fibras, quanto à resistência residual, para a proporção de 1:2 de teor de fibra de aço para teor de macrofibra polimérica.

Além das observações já colocadas, é possível perceber que as amostras que apresentaram maiores valores de tenacidade não necessariamente possuíram maiores resistências residuais no ELU. Os concretos CAR10FA e CAR20FA, por exemplo, apresentaram valores de tenacidade superiores aos concretos CAR10PP e CAR20PP, respectivamente, apesar de possuírem menores resistências residuais no ELU. Tal situação pode ser observada tanto no ensaio Barcelona quanto no ensaio de tenacidade em prismas. Como a tenacidade inclui toda a área sob a curva carga *versus* TCOD (ensaio Barcelona) ou carga *versus* deslocamento vertical (ensaio de tenacidade em prismas), uma parcela significativa do seu valor é referente ao comportamento do compósito imediatamente após o início da fissuração. A maior contribuição das fibras de aço ocorre neste estágio e, à medida que a fissuração aumenta, estas fibras começam a escorregar e sua capacidade resistente diminui. Já as macrofibras poliméricas geralmente oferecem uma carga resistente superior às fibras de aço em maiores deformações, devido à sua menor rigidez (SALVADOR; FIGUEIREDO, 2014).

Apesar de envolver um maior volume de concreto, as placas apresentaram dispersões de resultados superiores às amostras do ensaio Barcelona, diferente do que foi apresentado por Di Prisco, Plizzari e Vandewalle (2009). Isto pode estar relacionado ao fato de as placas estarem mais sujeitas às interferências, como as imperfeições do apoio, e ao mecanismo de fratura predominante em cada método. Enquanto no ensaio Barcelona ocorre o deslizamento da cunha que se forma com a aplicação da carga, com mobilidade da matriz, no ensaio de placas há a deformação devido à carga de punção, com a formação de múltiplas fissuras. Com relação aos gráficos *boxplot*, foi observado um padrão comportamental uniforme para a maioria das propriedades, com ganho do concreto de alta resistência em relação ao concreto convencional, inclusive nas amostras com macrofibra polimérica.

4.5 Dimensionamento do piso industrial

Rearranjando os termos da Equação 17 e utilizando os resultados do ensaio de tenacidade em prismas foi possível se obter uma relação entre a espessura do piso industrial e o momento resistente da placa. Tal relação está disposta na Tabela 30 para cada mistura de concreto analisada. O termo Y deve ser multiplicado pela raiz quadrada do momento resistente, em kN.m, para se obter o valor da espessura do piso, em cm.

Tabela 30 – Resultados do dimensionamento do piso industrial

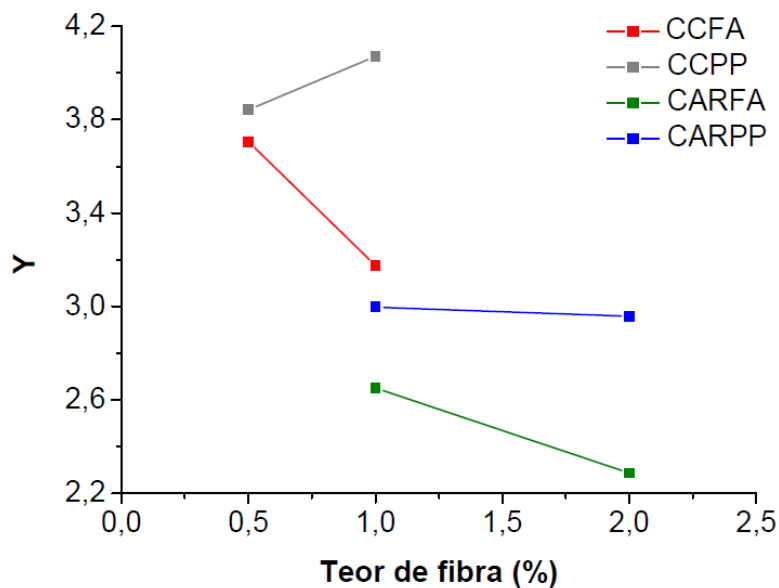
<i>Tipo de concreto</i>	$f_{ct,f}$ (MPa)	$R_{e,3}$ (%)	Y
CC5FA	5,37	62,76	3,71
CC10FA	6,89	72,71	3,18
CC5PP	5,10	59,41	3,84
CC10PP	4,37	65,68	4,07
CAR10FA	9,79	74,36	2,65
CAR20FA	12,85	78,52	2,29
CAR10PP	8,36	59,81	3,00
CAR20PP	7,82	75,32	2,96

Nota: $h = Y \sqrt{M_R}$, h em cm e M_R em kN.m

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Na Figura 76 é apresentado o gráfico do fator Y em função do teor de fibra em cada tipo de concreto. Considerando o momento resistente constante, a maior espessura do piso é obtida para a mistura de concreto convencional com 1,0% de macrofibra polimérica, enquanto que menor espessura é alcançada com o concreto de alta resistência com 2,0% de fibra de aço. Com a redução da resistência à tração na flexão do concreto CC10PP em relação ao CC5PP, foi verificado um aumento da espessura do piso. Nos demais casos, houve redução da espessura do piso com o aumento do teor de fibra.

Figura 76 – Resultados do dimensionamento do piso industrial



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

No concreto de alta resistência, o aumento do teor de macrofibra polimérica teve um impacto pequeno no valor da espessura do piso, sendo considerada a menor alteração de espessura com o acréscimo do teor de fibra dentre as misturas analisadas. Já o concreto CC10PP apresentou uma espessura de piso 77,7% superior ao valor apresentado pela mistura CAR20FA, ou seja, quase o dobro de espessura, sendo a maior variação de espessura entre os concretos analisados.

Pela Tabela 30 e pela Figura 76, é possível concluir que a macrofibra polimérica tem uma eficiência menor do que a fibra de aço quanto à aplicação em pisos. O acréscimo do teor de macrofibra polimérica é inviável, já que resultou em um aumento ou em uma pequena redução no valor da espessura do piso.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Conclusões

Nesta pesquisa foram analisadas as principais propriedades do concreto reforçado com macrofibra polimérica por meio da comparação com o concreto reforçado com fibra de aço. Utilizando diferentes teores de fibra e duas matrizes cimentícias (convencional e de alta resistência), analisou-se a trabalhabilidade e a massa específica de cada mistura no estado fresco, enquanto que no estado endurecido foram realizados ensaios de índice de vazios, absorção de água, massa específica, resistência à compressão, Barcelona, flexão em prismas e punção em placas.

A trabalhabilidade do concreto foi afetada pelo tipo e teor de fibra e pela matriz cimentícia. O aumento do teor de fibra ocasionou perda de trabalhabilidade da mistura, assim como a utilização de macrofibra polimérica ao invés de fibra de aço. A alteração da matriz cimentícia de concreto convencional para concreto de alta resistência proporcionou uma melhoria da trabalhabilidade da mistura, sendo possível alcançar maiores abatimentos. Em concretos com elevados teores de fibra não foi possível se obter a consistência desejada, apesar da adição de maiores teores de superplastificante.

A massa específica do concreto no estado fresco teve variação de 2,45 g/cm³ a 2,66 g/cm³. Pelo fato de as fibras representarem uma parcela relativamente baixa do volume, houve pequena variação da massa específica com o tipo e o teor de fibra adicionada.

A macrofibra polimérica apresentou comportamento significativamente diferente da fibra de aço em diversas propriedades do concreto no estado endurecido: absorção de água e resistência à compressão do concreto de alta resistência com 2,0% de fibra; massa específica, resistência à tração (Barcelona e prismas) e fator de tenacidade dos concretos com teor de fibra igual ou superior a 1,0%; resistência residual no ELU (Barcelona) do concreto convencional com 1,0% de fibra; tenacidade (placas) do concreto convencional com 1,0% de fibra e do concreto de alta resistência com 2,0% de fibra; tenacidade (Barcelona), resistência residual no ELS (Barcelona e prismas) e carga máxima (placas), independente do teor de fibra e da matriz cimentícia.

De acordo com os resultados dos testes estatísticos, o aumento do teor de macrofibra polimérica no concreto convencional ocasionou alterações significativas da absorção de água, massa específica, resistência à compressão, resistência à tração (Barcelona e flexão), tenacidade (Barcelona), resistência residual no ELS e no ELU (Barcelona). Para o concreto de alta

resistência, o aumento do teor de macrofibra polimérica provocou alterações significativas da massa específica, resistência à compressão, resistência à tração (Barcelona e prismas), tenacidade (Barcelona), resistência residual no ELU (Barcelona) e carga máxima (placas).

A alteração da matriz cimentícia do concreto com macrofibra polimérica teve uma influência significativa na absorção de água, índice de vazios, massa específica da amostra real, resistência à compressão, resistência à tração (Barcelona e prismas), tenacidade (Barcelona), resistência residual no ELS (Barcelona e prismas), resistência residual no ELU (prismas) e carga máxima (placas).

Os concretos analisados apresentaram comportamentos distintos de acordo com o ensaio de tenacidade realizado. Enquanto no ensaio Barcelona o comportamento de *softening* foi predominante, no ensaio de tenacidade em prismas e em placas as misturas exibiram comportamento de *hardening* ou *slip-hardening*.

Os valores de tenacidade, com exceção dos prismas de concreto de alta resistência, indicaram uma equivalência de desempenho entre os concretos com fibra de aço e os concretos com teor de macrofibra polimérica igual ao dobro do teor de fibra de aço. Os valores da resistência residual no ELS do ensaio Barcelona também apresentam esta equivalência de desempenho entre as fibras. Tal situação aconteceu tanto no concreto convencional quanto no concreto de alta resistência.

O dimensionamento do piso industrial pelo critério de tenacidade indicou uma menor eficiência da macrofibra polimérica em relação à fibra de aço. Além disso, o aumento do teor de macrofibra polimérica foi considerado inviável, visto que provocou pequenas alterações na espessura do piso industrial.

Sugestões para pesquisas futuras

Para pesquisas futuras, são feitas as seguintes sugestões:

1) Analisar o desempenho do concreto com três ou mais teores de fibra, de modo a se obter uma melhor visão da influência do teor de fibra nas diversas propriedades do concreto. Ademais, isto também torna possível a formulação de equações que correlacionem as propriedades do concreto com o teor de fibra;

2) Determinar correlações entre o nível de fissuração da amostra no ensaio de tenacidade em placas e nos demais ensaios de tenacidade, visto que já existe na literatura uma

correlação entre os níveis de fissuração da amostra no ensaio Barcelona e da amostra no ensaio de flexão em prismas;

3) Avaliar o desempenho de fibras de diferentes comprimentos nas propriedades de concretos de variadas resistências;

4) Verificar o desempenho de misturas de concreto híbridas, principalmente de alta resistência, com diferentes teores das duas fibras utilizadas na presente pesquisa, visto que a fibra de aço oferece maior resistência residual em pequenas deformações, enquanto que a macrofibra polimérica pode apresentar um ganho de resistência com o incremento das deformações;

5) Refazer os ensaios de tenacidade em prismas adotando um sistema fechado de controle de velocidade de deslocamento, de modo a minimizar ou eliminar a região de instabilidade pós-pico em alguns concretos, e proceder com as respectivas análises.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABC POLYMER INDUSTRIES. **Fiberforce 100**. Disponível em: <<http://abcpolymerindustries.com/fibers/fiberforce-100>>. Acesso em: 16 out. 2017.

AÏTCIN, P. C. **Binders for Durable and Sustainable Concrete**. Abingdon: Taylor & Francis, 2008. 500 p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI 363R-92**: State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete. Farmington Hills, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C1399**: Standard Test Method for Obtaining Average Residual-Strength of Fiber-Reinforced Concrete. Pennsylvania, 2015. 6p.

_____. **ASTM C1550**: Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel). Pennsylvania, 2012b. 13p.

_____. **ASTM C1609**: Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading). Pennsylvania, 2012a. 9p.

ANDRADE, M. F. **Comparativa de la Tenacidad entre Hormigón convencional, Hormigón reforzado con Fibras de Acero y Hormigón Reforzado con Fibras de Polipropileno**. 2013. 66 f. Thesis (Máster en Ingeniería de las estructuras, cimentaciones y materiales) - Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2013.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (AENOR). **UNE 83515**: Hormigones con fibras - Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción – Método Barcelona. Barcelona, 2010. 8 p.

_____. **UNE-EN 14651**: Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual). Madrid, 2007. 17p.

_____. **UNE-EN 14889-2**: Fibras para hormigón Parte 2: Fibras poliméricas Definiciones, especificaciones y conformidad. Madrid, 2008. 21p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007b. 9p.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009a. 9p.

_____. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015a. 3p.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009d. 4p.

_____. **NBR 9833**: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008. 7p.

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

_____. **NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015b. 11p.

_____. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001. 5p.

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009b. 6p.

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009c. 8p.

_____. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998. 8p.

_____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6p.

BANTHIA, N.; TROTTIER, J. Test Methods for Flexural Toughness Characterization of Fiber Reinforced Concrete: Some Concerns and a Proposition. **Aci Materials Journal**, Michigan, v.92, n.6, p. 48-57, 1995.

BARREDA, M.; IAIANI, C.; SOTA, J. D. Hormigon reforzado com fibras de polipropileno: tramo experimental de um pavimento de hormigon. *In*: IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga, 2000, Neuquén. **Anais...** Viena: International Atomic Energy Agency (IAEA), 2000. p. 1145-1150.

BENTUR, A.; MINDESS S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. 2nd ed. Abingdon: Taylor & Francis, 2007. 601 p.

BERGAMO, L. R. Construção mercado. **Concreto reforçado**. Disponível em: <<http://construcaomercado17.pini.com.br/negocios-incorporacao-construcao/132/concreto-reforçado-uso-de-fibras-para-concreto-se-firma-282650-1.aspx>>. Acesso em: 16 out. 2017.

BLANCO, A. **Characterization and modelling of SFRC elements**. 2013. 241 f. Thesis (Doctorado en Enginyeria de la Construcció) - Departament d'Enginyeria de la Construcció, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2013.

BLANCO, A. *et al.* Application of constitutive models in European codes to RC–FRC. **Construction and Building Materials**, Amsterdã, v. 40, p. 246–259, mar. 2013.

BLANCO, A. *et al.* Application of FRC constitutive models to modelling of slabs. **Materials and Structures**, Netherlands, v. 48, n. 9, p. 2943–2959, set. 2015.

- BLANCO, A. *et al.* Constitutive model for fibre reinforced concrete based on the Barcelona test. **Cement and Concrete Composites**, Amsterdã, v. 53, p. 327-340, out. 2014.
- BURATTI, N.; MAZZOTTI, C.; SAVOIA, M. Post-cracking behaviour of steel and macro-synthetic fibre-reinforced concretes. **Construction and Building Materials**, Amsterdã, v. 25, n. 5, p. 2713-2722, 2011.
- BURJ KHALIFA. In: **Wikipédia: a enciclopédia livre**. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/E-Tower>> Acesso em: 16 out. 2017.
- CACERES, A. R. E. **Caracterização geométrica e mecânica de macrofibras poliméricas**. 2016. 80 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 705 p.
- CARRILLO, J; APERADOR, W.; GONZALEZ, G. Correlaciones entre las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de acero. **Ingeniería Investigación y Tecnología**, Cidade do México, v. XIV, n. 3, p. 435-450, jul./set. 2013.
- CARVALHO, J. D. N. Sobre as origens e desenvolvimento do concreto. **Revista Tecnológica**, Maringá, v. 17, n. 3, p. 19-28, 2008.
- CHENG, T. *et al.* Abrasion Properties of Steel Fiber Reinforced Silica Fume Concrete According to Los Angeles and Water Abrasion Tests. **Materials Science (Medžiagotyra)**, New York, v. 20, n. 4, p. 498-502, 2014.
- CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE (CNR). **CNR-DT 204: Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Fibrorinforzato**. Roma, 2006. 60 p.
- DAL MOLIN, D. C. C. Adições Mineralis. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Ibracon, v.1, 2011. p. 261-309.
- DEUTSCHER BETON-UND BAUTECHNIK-VEREIN E.V.. **DBV Merkblatt Stahlfaserbeton**. Berlin, 2001.
- DE LARRARD, F. *et al.* The AFREM method for the mix-design of high performance concrete. **Materials and Structures**, Netherlands, v. 30, n. 7, p. 439-446, ago. 1997.
- DI PRISCO, M.; PLIZZARI, G.; VANDEWALLE, L. Fibre reinforced concrete: new design perspectives. **Materials and Structures**, Netherlands, v.42, n.9, p.1261-1281, nov. 2009.
- DINIZ, J. Z. F. Personalidade entrevistada. **Concreto & Construções: Concreto: material construtivo mais utilizado no mundo**, São Paulo, v. 53, p. 8-13, 2009.
- DOWLING, N. E. **Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue**. 3rd ed. New Jersey: Pearson, 2006. 912 p.

E-TOWER. In: **Wikipédia: a enciclopédia livre**. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/E-Tower>> Acesso em: 16 out. 2017.

EUROPEAN FEDERATION OF PRODUCERS AND APPLICATORS OF SPECIALIST PRODUCTS FOR STRUCTURES (EFNARC). **European Specification for Sprayed Concrete**. Farnham, UK, 1996. 30 p.

_____. **EFNARC Three Point Bending Test on Square Panel with Notch**. Farnham, UK, 2011. 12 p.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras de aço**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Departamento de Engenharia de Construção Civil, 2000. 69 p. Boletim Técnico (BT/PCC/260).

_____. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. 248 p. Tese (Livre-Docência) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

_____. O concreto com reforço de macrofibras poliméricas. **Concreto & Construções**, São Paulo, Ano XXXVIII, v. 59, p. 39-43, jul./ago./set. 2010.

FIGUEIREDO, A. D.; CECCATO, M. R. Workability Analysis of Steel Fiber Reinforced Concrete Using Slump and Ve-Be Test. *Materials Research*, São Carlos, v. 18, n. 6, p. 1284-1290, 2015.

FIGUEIREDO, A. D. *et al.* Fibras Plásticas Como Reforço de Tubos de Concreto. Parte 1: Caracterização Tecnológica. In: 54º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2012, Maceió. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2012.

GOPALARATNAM, V. S.; GETTU, R. On the Characterization of Flexural Toughness in Fiber Reinforced Concretes. **Cement and Concrete Composites**, Amsterdã, v. 17, n. 3, p. 239-254, 1995.

GROSSI, B. F. **Uma contribuição para a modelagem numérica do concreto com fibras curtas de aço**. 2006. 227 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

GUIMARAES, A. E. P. **Análise de pilares de concreto de alta resistência com adição de fibras metálicas submetidos à compressão centrada**. 1999. 145 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

HANAI, J. B. Comportamento resistente, ductilidade e confinamento. In: ISAIA, G. C. **Concreto: ensino, pesquisas e realizações**. São Paulo: Ibracon, v.1, 2005. p. 165-200.

HANNANT, D. J. Fibre-reinforced concrete. In: NEWMAN, J; CHOO, B. S. **Advanced Concrete Technology**. Oxford: Elsevier, 2003. Cap. 6, p. 146-163.

HARTMANN, C. *et al.* Aditivos químicos para concretos e cimentos. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Ibracon, v.1, 2011. p. 347-380.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI; Brasília: SENAI, 1992. 349 p.

HORSZCZARUK, E. K. Hydro-abrasive erosion of high performance fiber-reinforced concrete. **Wear**. Amsterdã, v. 267, n. 1-4, p. 110-115, jun. 2009.

INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE (FIB). **Model Code 2010: First complete draft – Bulletin 55**. Germany: Document Competence Center Siegmund Kästl e.K., 2010. 292 p.

INTERNATIONAL UNION OF LABORATORIES AND EXPERTS IN CONSTRUCTION MATERIALS, SYSTEMS AND STRUCTURES (RILEM). RILEM TC 162-TDF: 'Test and design methods for steel fibre reinforced concrete' σ - ϵ -design method - Final Recommendation. **Materials and Structures**, Netherlands, v. 36, n.8, p. 560-567, out. 2003.

KALMAN, D. **Use of steel fiber reinforced concrete for blast resistant design**. 2010. 46 f. Report (Master of science) - Department of Architectural Engineering and Construction Science College of Engineering, Kansas State University, Manhattan, 2010.

KANTRO, D. L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste – A miniature slump test. **Cement, Concrete and Aggregates**, Pennsylvania, v.2, n.2, p.95-102, Winter 1980.

MALATESTA, S. C.; DE CEA, A. A.; BORRELL, C. M. Generalization of the Barcelona test for the toughness control of FRC. **Materials and Structures**, Netherlands, v. 45, n.7, p.1053-1069, jul. 2012.

MALATESTA, S. C.; CONTRERAS, M. C. Comportamiento al corte de hormigones reforzado con fibras de acero. **Revista Ingeniería de Construcción**, Santiago, v.24, n.1, p.79-94, abr. 2009.

MALATESTA, S. C. *et al.* Control de la tenacidad de los hormigones reforzados con fibras usando el ensayo de doble punzonamiento (ensayo barcelona). **Revista Ingeniería de Construcción**, Santiago, v. 24, n.2, p.119-140, ago. 2009.

MATCON SUPPLY. **Fibras de aço**. Disponível em: <<http://matconsupply.com.br/fibras-de-aco>>. Acesso em: 16 out. 2017.

MEDEIROS, A. **Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras**. 2012. 201 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro Técnico Científico, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2012.

MEHTA, K.; MONTEIRO P. J. M. **Concreto. Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 4ª ed. São Paulo: Ibracon, 2014. 751 p.

MENDOZA, C. J.; AIRE, C.; DAVILA, P. Influencia de las fibras de polipropileno en las propiedades del concreto en estados plástico y endurecido. **Concreto y cemento. Investigación y desarrollo**, Cidade do México, v.2, n.2, p.5-47, jan./jun. 2011.

MIAO, B.; CHERN, J.; YANG, C. Influences of fiber content on properties of self-compacting steel fiber reinforced concrete. **Journal of the Chinese Institute of Engineers**, Taipei, v.26, n.4, p.523-530, mar. 2003.

MINISTERIO DE FOMENTO ESPAÑOL (MFE). **EHE-08**: Code on Structural Concrete. Madrid, 2010.

MONTAIGNAC, R. *et al.* Desing of SFRC structural elements:post-cracking tensile strength measurement. **Materials and Structures**, Netherlands, v.45, n.4, p.609-622, abr.2012.

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

NAKAMURA, J. Infraestrutura urbana. **Concreto projetado para túneis**. Disponível em: <<http://infraestruturaurbana17.pini.com.br/solucoes-tecnicas/32/artigo300033-1.aspx>>. Acesso em: 16 out. 2017.

PAPWORTH, F. Design Guidelines for the Use of Fiber-Reinforced Shotcrete in Ground Support. **Shotcrete Magazine**, Michigan, v.1, p.16-21, Spring 2002.

PUJADAS, P. *et al.* New analytical model to generalize the barcelona test using axial displacement. **Journal of Civil Engineering and Management**, Abingdon, v.19, n.2, p. 259-271, abr. 2013.

PUJADAS, P. *et al.* Plastic fibres as the only reinforcement for flat suspended slabs: Experimental investigation and numerical simulation. **Construction and Building Materials**, Amsterdã, v.57, p. 92-104, abr. 2014a.

PUJADAS, P. *et al.* Plastic fibres as the only reinforcement for flat suspended slabs: Parametric study and design considerations. **Construction and Building Materials**, Amsterdã, v.70, p. 88-96, nov. 2014b.

RAHMANI, T. *et al.* Application of different fibers to reduce plastic shrinkage cracking of concrete. In: SCARPAS, A. *et al.* **7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements: Mechanisms, Modeling, Testing, Detection and Prevention Case Histories**. Netherlands: Springer, 2012. p. 635-642.

REDAÇÃO DO SITE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. Inovação tecnológica. **Concreto flexível é capaz de se autoconsertar sem intervenção humana**. Disponível em: <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=concreto-flexivel-e-capaz-de-se-autoconsertar>>. Acesso em: 28 set. 2016.

RESENDE, F. M. **Influência das fibras de aço, polipropileno e sisal no amortecimento de concretos de resistência normal e de alto desempenho**. 2003. 98 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

RODRIGUES, P. P. F. **Manual de pisos industriais: Fibras de aço e protendido**. São Paulo: PINI, 2010. 143 p.

RODRIGUES, P. P. F. Pisos industriais de concreto. *In: ISAIA, G. C. Concreto: Ciência e Tecnologia*. São Paulo: Ibracon, v.2, 2011. p. 1495-1529.

RODRIGUES, P. P. F.; FARIA, B. M.; SILVA, J. B. R. **Novos critérios para pavimentos industriais de concreto armado**. São Paulo: Ibts, 2015. 120 p.

ROSA, E. **Análise de Resistência Mecânica: Mecânica da Fratura e Fadiga**. Santa Catarina, 2002. 399 p.

SALVADOR, R. P. **Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras**. 2013. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SALVADOR, R. P.; FIGUEIREDO, A. D. Análise comparativa de comportamento mecânico de concreto reforçado com macrofibra polimérica e com fibra de aço. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v.18, n.2, p. 1273-1285, 2013.

SHIMOSAKA, T. J. **Influência do teor de diferentes tipos de fibras de aço em concretos autoadensáveis**. 2017. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2017.

SIVAKUMAR, A.; SOUNTHARARAJAN, V. M. Toughness characterization of steel fibre reinforced concrete – A review on various international standards. **Journal of Civil Engineering and Construction Technology**. Lagos, v. 4, n. 3, p. 65-69, mar. 2013.

SONG, P.S; HAWANG, S. Mechanical properties of high-strength steel fibre-reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, Amsterdã, v.18, n.9, p. 669-673, 2004.

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

THE CONCRETE SOCIETY. **Guidance on the use of Macro-synthetic-fibre-reinforced Concrete**. Trowbridge: Cromwell Press, 2007. 76 p.

THE JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (JSCE). **JSCE-SF2: Method of making specimens for strength and toughness tests of steel fiber reinforced concrete**. Concrete library of JSCE. Part III-2 Method of tests for steel fiber reinforced concrete. Tokyo, 1984. N. 3, p. 49-55.

_____. **JSCE-SF4: Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete**. Concrete library of JSCE. Part III-2 Method of tests for steel fiber reinforced concrete. Tokyo, 1984. N. 3, p. 58-61.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. *In: ISAIA, G. C. Concreto: Ciência e Tecnologia*. São Paulo: Ibracon, v.1, 2011. p. 1283-1325.

VARONA, A. M. Análisis del comportamiento del hormigón reforzado con fibras para el ensayo Barcelona y de flexotracción. 2011. 204 p. Tesina (Especialidad en Tecnología de Estructuras) - Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2011.

VILLARES, A. M. O. Influência da largura do corpo de prova na medida da tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço. 2001. 128 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

APÊNDICE A - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Na Tabela A1 estão dispostos os resultados do ensaio de caracterização do cimento CII Z 32 e da sílica ativa utilizados na pesquisa. Já os resultados dos ensaios físicos dos agregados estão contidos na Tabela A2. A curva granulométrica do agregado graúdo e as curvas granulométricas dos agregados miúdos são apresentadas nas Figuras A1 e A2, respectivamente.

Tabela A1 – Propriedades físicas do cimento e da sílica ativa

Propriedade	Cimento	Sílica ativa
Massa específica (g/cm ³)	3,05	2,21
Área superficial específica - Blaine (cm ² /g)	3960	17900

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A2 – Propriedades físicas dos agregados

Propriedade	Areia	Areia	Agregado
	Média	Fina	graúdo
Massa específica aparente do agregado seco (g/cm ³)	2,58	2,57	2,82
Massa específica aparente do agregado saturado superfície seca (g/cm ³)	2,58	2,57	2,87
Massa específica (g/cm ³)	2,58	2,57	2,96
Dimensão Máxima Característica (mm)	2,36	0,6	19
Absorção (%)	0,63	0,15	1,64
Módulo de Finura	2,00	1,44	6,73

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Figura A1 – Curva granulométrica do agregado graúdo

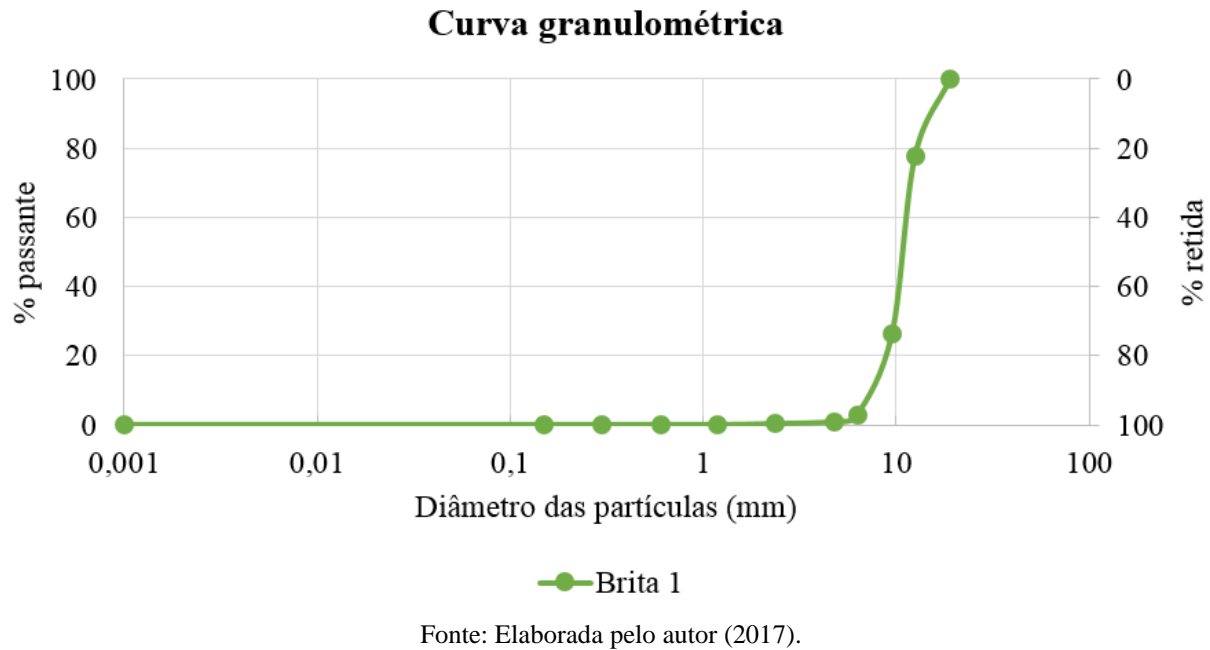
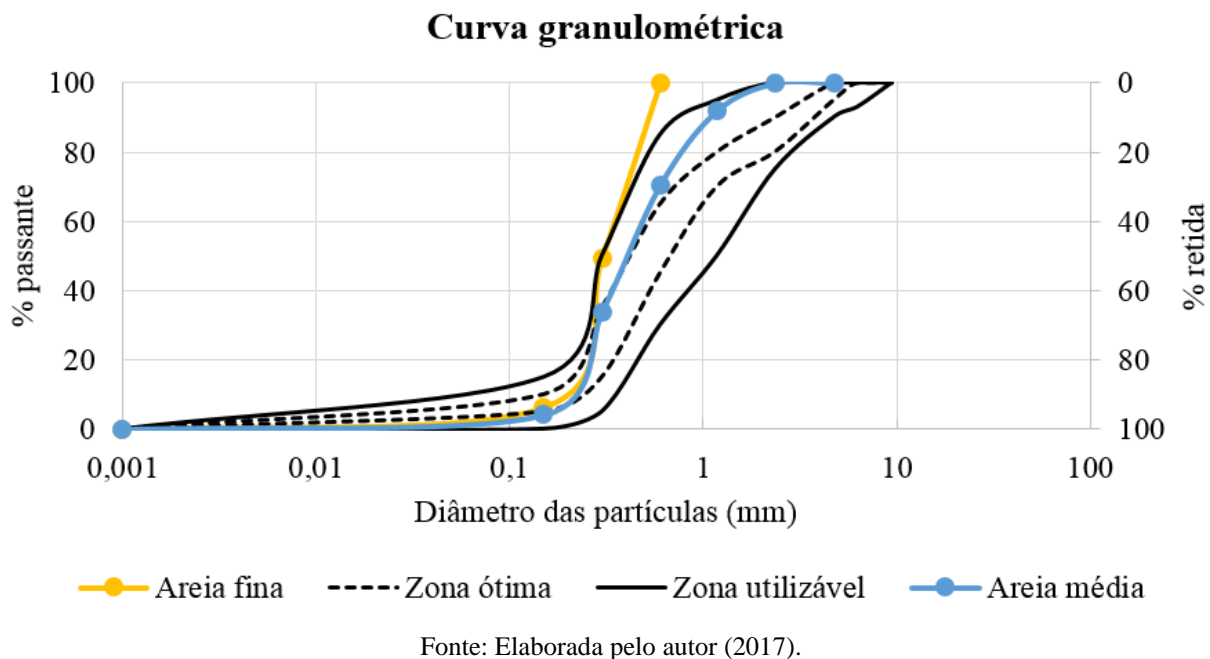


Figura A2 – Curvas granulométricas dos agregados miúdos



Na Tabela A3 são apresentados os resultados do ensaio de caracterização geométrica da fibra de aço. Os parâmetros obtidos ficaram próximos dos valores fornecidos pelos fabricantes (comprimento e fator de forma iguais a 50 mm e 45, respectivamente) e apresentaram baixos coeficientes de variação, indicando baixa variabilidade das características geométricas das fibras.

Tabela A3 – Resultados do ensaio de caracterização geométrica da fibra de aço

Nº	Comprimento (mm)	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Diâmetro médio (mm)	Fator de forma	
1	50,89	1,06	1,06	1,06	48,01	
2	50,45	1,06	1,06	1,06	47,59	
3	50,04	1,06	1,06	1,06	47,21	
4	50,36	1,06	1,06	1,06	47,51	
5	49,68	1,04	1,05	1,045	47,54	
6	49,86	1,05	1,05	1,05	47,49	
7	50,24	1,06	1,06	1,06	47,40	
8	48,89	1,04	1,04	1,04	47,01	
9	49,42	1,04	1,05	1,045	47,29	
10	50,82	1,06	1,06	1,06	47,94	
11	49,53	1,05	1,05	1,05	47,17	
12	49,55	1,06	1,06	1,06	46,75	
13	49,73	1,05	1,05	1,05	47,36	
14	50,77	1,05	1,05	1,05	48,35	
15	49,29	1,06	1,06	1,06	46,50	
Determinação	<i>Média</i>	<i>49,97</i>	<i>1,05</i>	<i>1,05</i>	<i>1,05</i>	<i>47,41</i>
	<i>Desvio-padrão</i>	<i>0,60</i>	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>	<i>0,47</i>
	<i>CV</i>	<i>1%</i>	<i>1%</i>	<i>1%</i>	<i>1%</i>	<i>1%</i>

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Na Tabela A4 estão dispostos os resultados do ensaio de caracterização geométrica da macrofibra polimérica. O comprimento médio ficou próximo do valor fornecido pelo fabricante, enquanto o fator de forma apresentou um menor valor em relação ao catalogado (comprimento e fator de forma iguais a 50 mm e 75, respectivamente). No geral, os coeficientes de variação dos parâmetros medidos foram baixos, entretanto maiores do que os coeficientes de variação da fibra de aço. Como a macrofibra é composta por um material flexível, as medidas ficam mais dependentes da sensibilidade do operador, sendo as menores medidas ainda mais afetadas por esta sensibilidade, influenciando na determinação do fator de forma.

Tabela A4 – Resultados do ensaio de caracterização geométrica da macrofibra polimérica

Nº	Comprimento (mm)	e (menor dimensão) (mm)	w (maior dimensão) (mm)	Diâmetro equivalente (mm)	Fator de forma	
1	49,79	0,48	1,16	0,84	59,13	
2	50,2	0,44	0,97	0,74	68,10	
3	49,94	0,47	1,13	0,82	60,73	
4	49,68	0,45	1,15	0,81	61,20	
5	50,32	0,5	1,26	0,90	56,18	
6	49,8	0,49	1,19	0,86	57,80	
7	50,01	0,47	1,1	0,81	61,64	
8	49,94	0,49	1,05	0,81	61,70	
9	49,85	0,49	1,1	0,83	60,17	
10	49,81	0,49	1,13	0,84	59,32	
11	49,95	0,49	1,23	0,88	57,02	
12	50,06	0,47	1,12	0,82	61,15	
13	50,01	0,47	1,11	0,82	61,36	
14	50,02	0,48	1,15	0,84	59,66	
15	50,21	0,44	1,01	0,75	66,75	
Determinação	<i>Média</i>	<i>49,97</i>	<i>0,47</i>	<i>1,12</i>	<i>0,82</i>	<i>60,79</i>
	<i>Desvio-padrão</i>	<i>0,18</i>	<i>0,02</i>	<i>0,08</i>	<i>0,04</i>	<i>3,19</i>
	<i>CV</i>	<i>0%</i>	<i>4%</i>	<i>7%</i>	<i>5%</i>	<i>5%</i>

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

APÊNDICE B - AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE ENTRE O CIMENTO E O ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE

Usando um minitronco de cone (ensaio de Kantro), foram medidas as áreas de espalhamento de uma pasta com relação água/cimento de 0,45 e um teor de superplastificante de 0,18% após 10, 30 e 60 minutos do contato entre a água e o aglomerante. A seguir, são detalhadas as etapas do processo de mistura da pasta na argamassadeira.

- 1) Inicialmente, o cimento e a água foram misturados na argamassadeira em velocidade baixa por 1 minuto e 30 segundos;
- 2) Em seguida, a mistura foi mantida em repouso por 30 segundos, enquanto procedeu-se a limpeza e a raspagem das bordas;
- 3) A pasta foi novamente misturada em velocidade baixa por 1 minuto e 30 segundos;
- 4) Após isto, a pasta foi misturada em alta velocidade por 1 minuto;
- 5) A mistura foi posta em repouso novamente por 30 segundos, momento em que ocorreu o acréscimo do aditivo superplastificante;
- 6) A pasta foi então misturada em velocidade alta por 5 minutos.

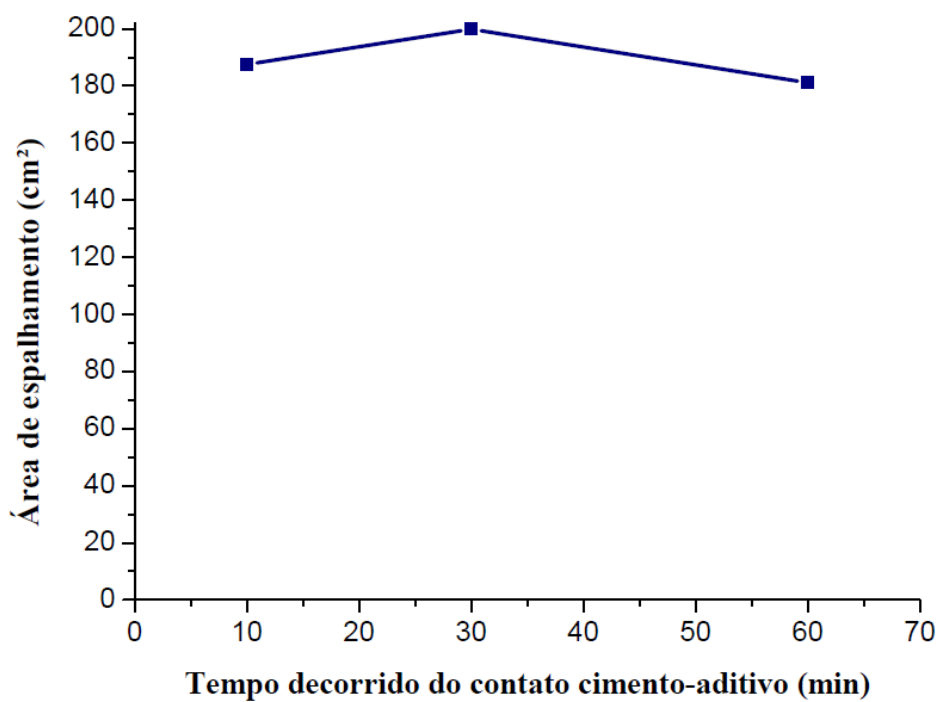
Após a determinação da área de espalhamento referente a cada tempo decorrido do início do contato entre a água e o cimento, a pasta era posta novamente na argamassadeira e coberta por um pano úmido, de modo a evitar perda de água da mistura. Os resultados do ensaio de compatibilidade entre o cimento e o superplastificante estão dispostos na Tabela A5 e mostrados na Figura A3. Como as áreas de espalhamento das três medições ficaram próximas, ou seja, não se observou perda significativa da área de espalhamento no período, conclui-se que o cimento e o aditivo são compatíveis.

Tabela A5 – Resultado do ensaio de compatibilidade entre o cimento e o superplastificante

Tempo decorrido do contato cimento-aditivo	Diâmetro 1 (cm)	Diâmetro 2 (cm)	Diâmetro médio (cm)	Área de espalhamento (cm²)
10 min	16,65	14,25	15,45	187,42
30 min	15,85	16,05	15,95	199,86
60 min	15,48	14,89	15,18	181,07

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Figura A3 – Resultado do ensaio de compatibilidade entre cimento e superplastificante



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

APÊNDICE C – COMPOSIÇÃO IDEAL DAS AREIAS

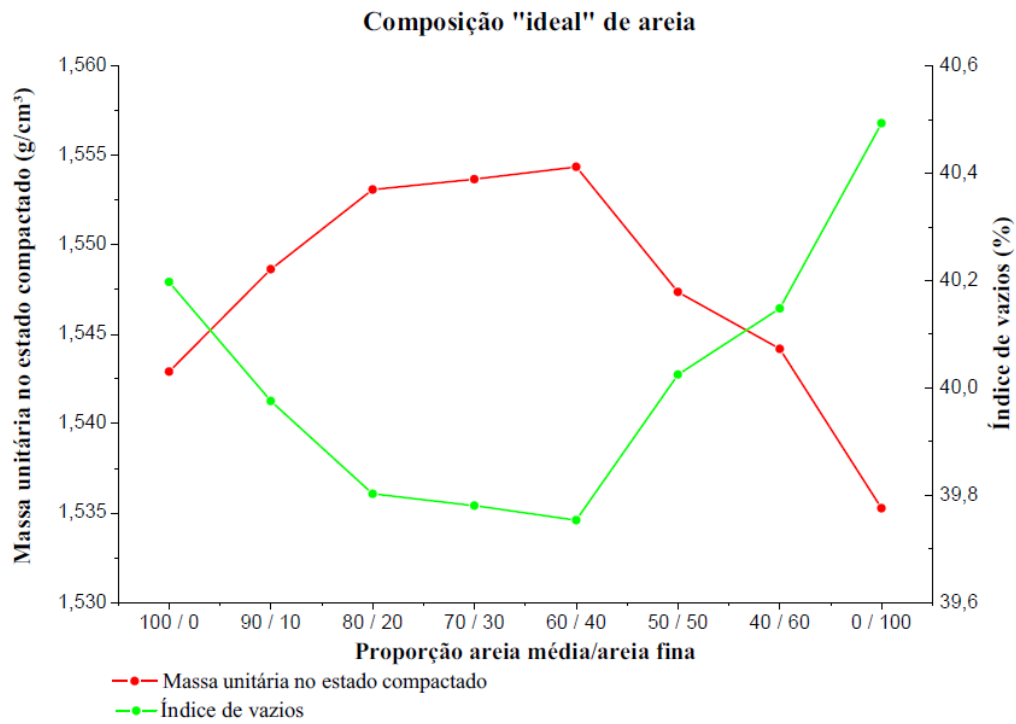
A composição ideal das areias foi determinada por meio do método da máxima massa unitária no estado compactado, descrito por Helene e Terzian (1992). Este método é fundamentado no melhor empacotamento das partículas e consiste em se determinar a massa unitária no estado compactado de misturas com diferentes frações de agregados. A mistura que possuir maior massa unitária e, conseqüentemente, menor índice de vazios, é considerada a mistura com composição ideal. O ensaio da massa unitária no estado compactado é realizado de acordo com a NBR NM 45:2006 (ABNT, 2006). Apesar desta norma recomendar o uso de um recipiente com capacidade superior a 10 dm³ para agregados com DMC inferior a 37,5 mm, no ensaio realizado com as areias foi utilizado a forma de um corpo de prova cilíndrico 10x20 cm, com volume de 1,57 dm³. Os resultados são apresentados na Tabela A6 e ilustrados da Figura A4, indicando uma máxima massa unitária no estado compactado para a composição com 60% de areia média e 40% de areia fina, em massa, sendo esta a proporção utilizada na produção dos concretos.

Tabela A6 – Resultados do ensaio para composição ideal das areias

Composição areia média-areia fina (%)	Quantidade de areia média (g)	Quantidade de areia fina (g)	Massa total da composição (g)	Massa unitária no estado compactado (g/cm³)	Índice de vazios (%)
100 / 0	2423,6	0	2423,6	1,543	40,20
90 / 10	2423,6	269,29	2432,6	1,549	39,98
80 / 20	2423,6	605,9	2439,6	1,553	39,80
70 / 30	2423,6	1038,69	2440,5	1,554	39,78
60 / 40	2423,6	1615,73	2441,6	1,554	39,75
50 / 50	2423,6	2423,6	2430,6	1,547	40,02
40 / 60	2423,6	3635,4	2425,6	1,544	40,15
0 / 100	0	2411,6	2411,6	1,535	40,49

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Figura A4 – Resultados do ensaio para composição ideal das areias

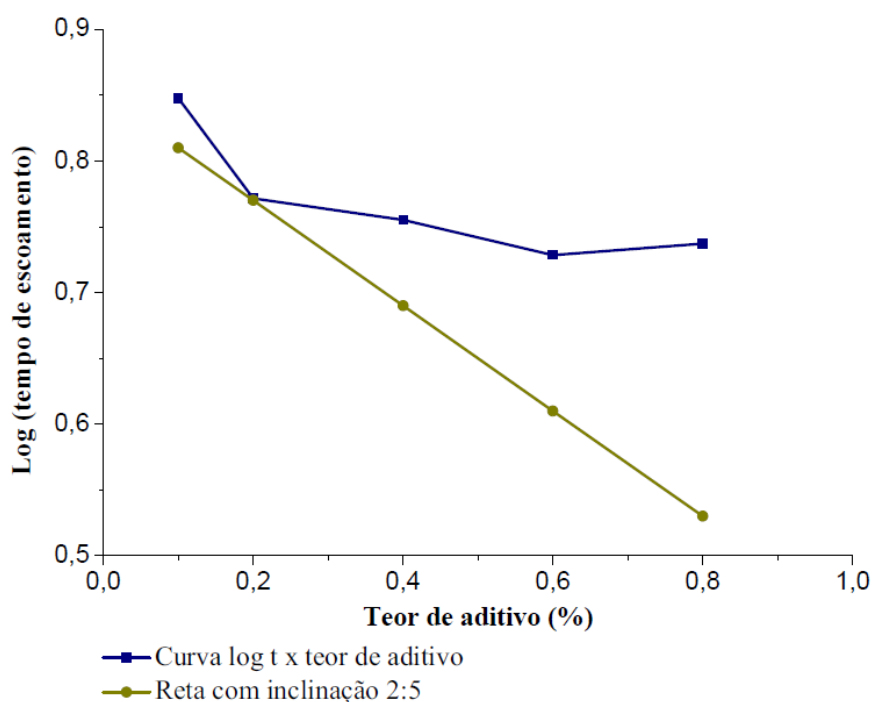


Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

APÊNDICE D – PONTO DE SATURAÇÃO DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE

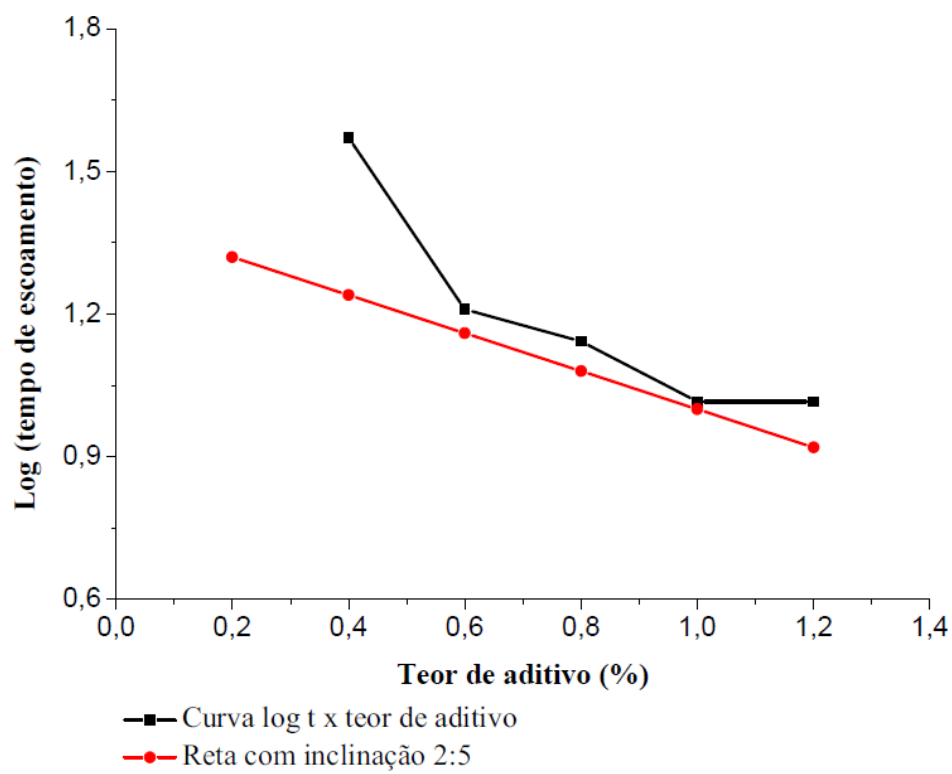
O ponto de saturação do aditivo foi determinado de acordo com o método AFREM (DE LARRARD *et al.*, 1997). Este método consiste em medir o tempo de escoamento de 500 ml de pasta de um cone com abertura inferior igual a 12,5 mm e, a partir de misturas com diferentes teores de aditivo, é elaborado um gráfico do logaritmo do tempo de escoamento em função do teor de aditivo. O ponto da curva que tangencia uma reta com inclinação 2:5 corresponde ao ponto de saturação do aditivo. A Figura A5 apresenta a curva da pasta do concreto de convencional, enquanto que a Figura A6 contém a curva da pasta do concreto de alta resistência.

Figura A5 – Ponto de saturação da pasta do concreto convencional



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Figura A6 – Ponto de saturação da pasta do concreto de alta resistência



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

APÊNDICE E – TESTES ESTATÍSTICOS PARA ABSORÇÃO DE ÁGUA DO CONCRETO

A Tabela A7 contém os resultados individuais, as medidas estatísticas e os resultados do critério de *Chauvenet* para a absorção de água de cada concreto analisado, comprovando a homogeneidade dos dados. Como foram realizadas três medidas desta propriedade em cada concreto, o valor limite da variação dos dados em relação ao desvio padrão deve ser de 1,38 para que o resultado seja considerado não duvidoso de acordo com o critério de *Chauvenet*.

Tabela A7 – Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a absorção de água do concreto

	<i>Amostra</i>	<i>Valor (%)</i>	<i>Média</i>	<i>DP</i>	<i>Variância</i>	<i>CV (%)</i>	<i>Critério de Chauvenet</i>	<i>Homogeneidade?</i>
CCR	1	5,81	5,79	0,024	0,001	0,41	0,83	Sim
	2	5,76					1,11	Sim
	3	5,80					0,28	Sim
CC5FA	1	5,39	5,50	0,129	0,017	2,35	0,85	Sim
	2	5,64					1,10	Sim
	3	5,46					0,26	Sim
CC10FA	1	5,43	5,37	0,164	0,027	3,05	0,42	Sim
	2	5,48					0,72	Sim
	3	5,18					1,14	Sim
CC5PP	1	5,51	5,50	0,051	0,003	0,93	0,34	Sim
	2	5,44					1,13	Sim
	3	5,54					0,78	Sim
CC10PP	1	5,22	5,44	0,196	0,038	3,60	1,13	Sim
	2	5,59					0,76	Sim
	3	5,51					0,37	Sim
CARR	1	3,02	3,36	0,317	0,101	9,45	1,07	Sim
	2	3,41					0,17	Sim
	3	3,64					0,91	Sim
CAR10FA	1	2,40	2,50	0,155	0,024	6,19	0,67	Sim
	2	2,68					1,15	Sim
	3	2,43					0,48	Sim
CAR20FA	1	2,47	2,56	0,212	0,045	8,29	0,40	Sim
	2	2,80					1,14	Sim
	3	2,40					0,74	Sim

(continua)

Tabela A7 – Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a absorção de água do concreto (conclusão)

	<i>Amostra</i>	<i>Valor (%)</i>	<i>Média</i>	<i>DP</i>	<i>Variância</i>	<i>CV (%)</i>	<i>Critério de Chauvenet</i>	<i>Homogeneidade?</i>
CAR10PP	1	3,47	3,05	0,377	0,142	12,37	1,11	Sim
	2	2,74					0,83	Sim
	3	2,95					0,28	Sim
CAR20PP	1	3,68	3,53	0,532	0,283	15,07	0,28	Sim
	2	2,94					1,11	Sim
	3	3,97					0,83	Sim

Nota:

DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação, em %.

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Nas Tabelas A8 e A9 são apresentados os resultados da ANOVA para a absorção de água de cada concreto. Já nas Tabelas A10 a A18 há os detalhes do teste t para a absorção de água de cada concreto.

Tabela A8 – Análise de variância para a absorção de água do concreto convencional

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma de quadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Quadrado médio</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Adição de fibras	0,00003109	4	0,000007772	4,57791854	0,023276	Sim
Erro	0,00001698	10	0,000001698			
Total	0,00004807	14				

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A9 – Análise de variância para a absorção de água do concreto de alta resistência

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma de quadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Quadrado médio</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Adição de fibras	0,000254388	4	0,000063597	5,34932572	0,014445	Sim
Erro	0,000118888	10	0,000011889			
Total	0,000373276	14				

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A10 – Teste t para avaliar a influência do tipo de fibra na absorção de água do concreto convencional

<i>Teor de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
0,5%	4	0,00478	0,9964	2,7764	Não
1,0%	4	-0,50178	0,6422	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A11 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na absorção de água do concreto convencional (Comparação entre amostra sem fibra e com 0,5% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	3,8693	0,0180	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	9,0516	0,0008	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A12 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na absorção de água do concreto convencional (Comparação entre amostra com 0,5% de fibra e com 1,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	1,0804	0,3408	2,7764	Não
Macrofibra polimérica	4	0,4767	0,6585	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A13 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na absorção de água do concreto convencional (Comparação entre amostra sem fibra e com 1,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	4,4327	0,0114	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	3,0665	0,0374	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A14 – Teste t para avaliar a influência do tipo de fibra na absorção de água do concreto de alta resistência

<i>Teor de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
1,0%	4	-2,3278	0,0804	2,7764	Não
2,0%	4	-2,9259	0,0430	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A15 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na absorção de água do concreto de alta resistência (Comparação entre amostra sem fibra e com 1,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	4,1897	0,0138	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	1,0741	0,3433	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A16 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na absorção de água do concreto de alta resistência (Comparação entre amostra com 1,0% de fibra e com 2,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-0,3757	0,7262	2,7764	Não
Macrofibra polimérica	4	-1,2640	0,2749	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A17 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na absorção de água do concreto de alta resistência (Comparação entre amostra sem fibra e com 2,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	3,6169	0,0224	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-0,4759	0,6590	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A18 – Teste t para avaliar a influência do tipo de matriz na absorção de água do concreto

<i>Adição de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Sem fibras	4	13,2471	0,0001	2,7764	Sim
1,0% de fibras de aço	4	22,0136	0,0001	2,7764	Sim
1,0% de macrofibra polimérica	4	9,7345	0,0001	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

APÊNDICE F – TESTES ESTATÍSTICOS PARA O ÍNDICE DE VAZIOS DO CONCRETO

A Tabela A19 contém os resultados individuais, as medidas estatísticas e os resultados do critério de *Chauvenet* para o índice de vazios de cada concreto analisado, comprovando a homogeneidade dos dados. Como foram realizadas três medidas desta propriedade em cada concreto, o valor limite da variação dos dados em relação ao desvio padrão deve ser de 1,38 para que o resultado seja considerado não duvidoso de acordo com o critério de *Chauvenet*.

Tabela A19 – Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para o índice de vazios do concreto

	<i>Amostra</i>	<i>Valor (%)</i>	<i>Média</i>	<i>DP</i>	<i>Variância</i>	<i>CV (%)</i>	<i>Critério de Chauvenet</i>	<i>Homogeneidade?</i>
CCR	1	13,54	13,37	0,152	0,023	1,14	1,10	Sim
	2	13,24					0,85	Sim
	3	13,34					0,25	Sim
CC5FA	1	12,73	12,92	0,208	0,043	1,61	0,93	Sim
	2	13,14					1,05	Sim
	3	12,90					0,12	Sim
CC10FA	1	13,10	12,97	0,315	0,099	2,43	0,39	Sim
	2	13,21					0,74	Sim
	3	12,61					1,14	Sim
CC5PP	1	12,81	12,81	0,125	0,016	0,98	0,02	Sim
	2	12,69					0,99	Sim
	3	12,94					1,01	Sim
CC10PP	1	12,38	12,84	0,399	0,159	3,11	1,15	Sim
	2	13,11					0,68	Sim
	3	13,02					0,47	Sim
CARR	1	7,21	8,00	0,730	0,532	9,12	1,08	Sim
	2	8,13					0,18	Sim
	3	8,65					0,90	Sim
CAR10FA	1	5,93	6,21	0,389	0,151	6,26	0,72	Sim
	2	6,65					1,14	Sim
	3	6,04					0,43	Sim
CAR20FA	1	6,33	6,53	0,531	0,282	8,14	0,39	Sim
	2	7,14					1,14	Sim
	3	6,13					0,75	Sim

(continua)

Tabela A19 – Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para o índice de vazios do concreto (conclusão)

	<i>Amostra</i>	<i>Valor (%)</i>	<i>Média</i>	<i>DP</i>	<i>Variância</i>	<i>CV (%)</i>	<i>Critério de Chauvenet</i>	<i>Homogeneidade?</i>
CAR10PP	1	8,21	7,32	0,817	0,668	11,17	1,09	Sim
	2	6,61					0,87	Sim
	3	7,14					0,22	Sim
CAR20PP	1	8,86	8,49	1,194	1,426	14,07	0,31	Sim
	2	7,15					1,12	Sim
	3	9,45					0,81	Sim

Nota:

DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação, em %.

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Nas Tabelas A20 e A21 são apresentados os resultados da ANOVA para o índice de vazios de cada concreto. Já nas Tabelas A22 a A26 há os detalhes do teste t para o índice de vazios apenas do concreto de alta resistência, já que, de acordo com a ANOVA, a adição de fibras provocou mudanças não significativas no índice de vazios do concreto convencional.

Tabela A20 – Análise de variância para o índice de vazios do concreto convencional

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma de quadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Quadrado médio</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Adição de fibras	0,000062104	4	0,000015526	2,28147783	0,1322958	Não
Erro	0,000068053	10	0,000006805			
Total	0,000130157	14				

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A21 – Análise de variância para o índice de vazios do concreto de alta resistência

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma de quadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Quadrado médio</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Adição de fibras	0,001104762	4	0,00027619	4,513322554	0,024275	Sim
Erro	0,000611945	10	0,0000612			
Total	0,001716707	14				

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A22 – Teste t para avaliar a influência do tipo de fibra no índice de vazios do concreto de alta resistência

<i>Teor de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
1,0%	4	-2,1269	0,1006	2,7764	Não
2,0%	4	-2,5926	0,0605	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A23 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra no índice de vazios do concreto de alta resistência (Comparação entre amostra sem fibra e com 1,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	3,7499	0,0199	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	1,0731	0,3437	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A24 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra no índice de vazios do concreto de alta resistência (Comparação entre amostra com 1,0% de fibra e com 2,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-0,8551	0,4407	2,7764	Não
Macrofibra polimérica	4	-1,4005	0,2340	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A25 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra no índice de vazios do concreto de alta resistência (Comparação entre amostra sem fibra e com 2,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	2,8111	0,0483	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-0,6080	0,5760	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A26 – Teste t para avaliar a influência do tipo de matriz no índice de vazios do concreto

<i>Adição de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Sem fibras	4	12,4939	0,0002	2,7764	Sim
1,0% de fibras de aço	4	23,4234	0,0001	2,7764	Sim
1,0% de macrofibra polimérica	4	10,5078	0,0004	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

**APÊNDICE G – TESTES ESTATÍSTICOS PARA A MASSA ESPECÍFICA DA
AMOSTRA SECA DE CONCRETO**

A Tabela A27 contém os resultados individuais, as medidas estatísticas e os resultados do critério de *Chauvenet* para a massa específica da amostra seca de cada concreto analisado, comprovando a homogeneidade dos dados. Como foram realizadas três medidas desta propriedade em cada concreto, o valor limite da variação dos dados em relação ao desvio padrão deve ser de 1,38 para que o resultado seja considerado não duvidoso de acordo com o critério de *Chauvenet*.

Tabela A27 – Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a massa específica da amostra seca do concreto

	<i>Amostra</i>	<i>Valor (g/cm³)</i>	<i>Média</i>	<i>DP</i>	<i>Variância</i>	<i>CV (%)</i>	<i>Critério de Chauvenet</i>	<i>Homogeneidade?</i>
CCR	1	2,33	2,31	0,018	0,000	0,79	1,15	Sim
	2	2,30					0,65	Sim
	3	2,30					0,50	Sim
CC5FA	1	2,36	2,35	0,018	0,000	0,77	0,63	Sim
	2	2,33					1,15	Sim
	3	2,36					0,52	Sim
CC10FA	1	2,41	2,42	0,015	0,000	0,64	0,54	Sim
	2	2,41					0,62	Sim
	3	2,44					1,15	Sim
CC5PP	1	2,32	2,33	0,007	0,000	0,30	0,02	Sim
	2	2,33					0,99	Sim
	3	2,34					1,01	Sim
CC10PP	1	2,37	2,36	0,014	0,000	0,58	0,89	Sim
	2	2,35					1,08	Sim
	3	2,36					0,19	Sim
CARR	1	2,39	2,38	0,008	0,000	0,34	0,92	Sim
	2	2,38					0,14	Sim
	3	2,37					1,06	Sim
CAR10FA	1	2,47	2,48	0,008	0,000	0,33	1,06	Sim
	2	2,48					0,14	Sim
	3	2,49					0,92	Sim
CAR20FA	1	2,56	2,55	0,004	0,000	0,17	0,90	Sim
	2	2,55					1,08	Sim
	3	2,55					0,18	Sim

(continua)

Tabela A27 – Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a massa específica da amostra seca do concreto (conclusão)

	<i>Amostra</i>	<i>Valor (g/cm³)</i>	<i>Média</i>	<i>DP</i>	<i>Variância</i>	<i>CV (%)</i>	<i>Critério de Chauvenet</i>	<i>Homogeneidade?</i>
CAR10PP	1	2,37	2,40	0,030	0,001	1,24	1,15	Sim
	2	2,41					0,46	Sim
	3	2,42					0,69	Sim
CAR20PP	1	2,41	2,41	0,027	0,001	1,12	0,08	Sim
	2	2,44					0,96	Sim
	3	2,38					1,04	Sim

Nota:

DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação, em %.

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Nas Tabelas A28 e A29 são apresentados os resultados da ANOVA para a massa específica da amostra seca de cada concreto. Já nas Tabelas A30 a A38 há os detalhes do teste t para a massa especificada amostra seca de cada concreto.

Tabela A28 – Análise de variância para a massa específica da amostra seca do concreto convencional

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma de quadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Quadrado médio</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Adição de fibras	0,019540661	4	0,004885165	21,478133	0,0000675	Sim
Erro	0,002274483	10	0,000227448			
Total	0,021815144	14				

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A29 – Análise de variância para a massa específica da amostra seca do concreto de alta resistência

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma de quadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Quadrado médio</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Adição de fibras	0,059139198	4	0,014784799	41,780006	0,00000328	Sim
Erro	0,003538726	10	0,000353873			
Total	0,062677924	14				

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A30 – Teste t para avaliar a influência do tipo de fibra na massa específica da amostra seca do concreto convencional

<i>Teor de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
0,5%	4	1,7620	0,1529	2,7764	Não
1,0%	4	4,8552	0,0083	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A31 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na massa específica da amostra seca do concreto convencional (Comparação entre amostra sem fibra e com 0,5% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-2,7726	0,0502	2,7764	Não
Macrofibra polimérica	4	-1,8917	0,1315	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A32 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na massa específica da amostra seca do concreto convencional (Comparação entre amostra com 0,5% de fibra e com 1,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-4,8285	0,0085	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-3,1845	0,0334	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A33 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na massa específica da amostra seca do concreto convencional (Comparação entre amostra sem fibra e com 1,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-7,7646	0,0015	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-3,7686	0,0196	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A34 – Teste t para avaliar a influência do tipo de fibra na massa específica da amostra seca do concreto de alta resistência

<i>Teor de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
1,0%	4	4,4322	0,0114	2,7764	Sim
2,0%	4	9,0072	0,0008	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A35 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na massa específica da amostra seca do concreto de alta resistência (Comparação entre amostra sem fibra e com 1,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-14,6121	0,0001	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-1,0084	0,3703	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A36 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na massa específica da amostra seca do concreto de alta resistência (Comparação entre amostra com 1,0% de fibra e com 2,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-13,6279	0,0002	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-0,3659	0,7330	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A37 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na massa específica da amostra seca do concreto de alta resistência (Comparação entre amostra sem fibra e com 2,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-31,7534	0,0001	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-1,6218	0,1802	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A38 – Teste t para avaliar a influência do tipo de matriz na massa específica da amostra seca do concreto

<i>Adição de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Sem fibras	4	-6,2844	0,0033	2,7764	Sim
1,0% de fibras de aço	4	-6,1791	0,0035	2,7764	Sim
1,0% de macrofibra polimérica	4	-2,1717	0,0956	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

APÊNDICE H – TESTES ESTATÍSTICOS PARA A MASSA ESPECÍFICA DA AMOSTRA SATURADA DE CONCRETO

A Tabela A39 contém os resultados individuais, as medidas estatísticas e os resultados do critério de *Chauvenet* para a massa específica da amostra saturada de cada concreto analisado, comprovando a homogeneidade dos dados. Como foram realizadas três medidas desta propriedade em cada concreto, o valor limite da variação dos dados em relação ao desvio padrão deve ser de 1,38 para que o resultado seja considerado não duvidoso de acordo com o critério de *Chauvenet*.

Tabela A39 – Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a massa específica da amostra saturada do concreto

	<i>Amostra</i>	<i>Valor (g/cm³)</i>	<i>Média</i>	<i>DP</i>	<i>Variância</i>	<i>CV (%)</i>	<i>Critério de Chauvenet</i>	<i>Homogeneidade?</i>
CCR	1	2,47	2,44	0,020	0,000	0,81	1,15	Sim
	2	2,43					0,67	Sim
	3	2,43					0,48	Sim
CC5FA	1	2,49	2,48	0,016	0,000	0,65	0,59	Sim
	2	2,46					1,15	Sim
	3	2,49					0,57	Sim
CC10FA	1	2,54	2,55	0,012	0,000	0,48	0,57	Sim
	2	2,54					0,58	Sim
	3	2,56					1,15	Sim
CC5PP	1	2,45	2,46	0,008	0,000	0,31	1,04	Sim
	2	2,46					0,08	Sim
	3	2,47					0,96	Sim
CC10PP	1	2,50	2,49	0,011	0,000	0,42	0,72	Sim
	2	2,48					1,14	Sim
	3	2,49					0,42	Sim
CARR	1	2,46	2,46	0,002	0,000	0,09	0,15	Sim
	2	2,47					1,07	Sim
	3	2,46					0,92	Sim
CAR10FA	1	2,53	2,54	0,010	0,000	0,39	1,15	Sim
	2	2,55					0,57	Sim
	3	2,55					0,59	Sim
CAR20FA	1	2,62	2,62	0,003	0,000	0,11	0,65	Sim
	2	2,62					0,50	Sim
	3	2,61					1,15	Sim

(continua)

Tabela A39 – Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a massa específica da amostra saturada do concreto (conclusão)

	<i>Amostra</i>	<i>Valor (g/cm³)</i>	<i>Média</i>	<i>DP</i>	<i>Variância</i>	<i>CV (%)</i>	<i>Critério de Chauvenet</i>	<i>Homogeneidade?</i>
CAR10PP	1	2,45					1,11	Sim
	2	2,48	2,47	0,023	0,001	0,92	0,29	Sim
	3	2,49					0,83	Sim
CAR20PP	1	2,50					0,36	Sim
	2	2,51	2,49	0,016	0,000	0,65	0,77	Sim
	3	2,48					1,13	Sim

Nota:

DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação, em %.

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Nas Tabelas A40 e A41 são apresentados os resultados da ANOVA para a massa específica da amostra saturada de cada concreto. Já nas Tabelas A42 a A50 há os detalhes do teste t para a massa especificada amostra saturada de cada concreto.

Tabela A40 – Análise de variância para a massa específica da amostra saturada do concreto convencional.

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma de quadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Quadrado médio</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Adição de fibras	0,018715	4	0,00467884	24,015464	0,00004119	Sim
Erro	0,001948	10	0,00019483			
Total	0,020664	14				

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A41 – Análise de variância para a massa específica da amostra saturada do concreto de alta resistência.

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma de quadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Quadrado médio</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Adição de fibras	0,047849036	4	0,011962259	67,14585	0,000000347	Sim
Erro	0,001781534	10	0,000178153			
Total	0,04963057	14				

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A42 – Teste t para avaliar a influência do tipo de fibra na massa específica da amostra saturada do concreto convencional.

<i>Teor de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
0,5%	4	2,0225	0,1132	2,7764	Não
1,0%	4	6,3073	0,0032	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A43 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na massa específica da amostra saturada do concreto convencional (Comparação entre amostra sem fibra e com 0,5% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-2,4853	0,0678	2,7764	Não
Macrofibra polimérica	4	-1,2950	0,2650	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A44 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na massa específica da amostra saturada do concreto convencional (Comparação entre amostra com 0,5% de fibra e com 1,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-5,6907	0,0047	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-3,7999	0,0191	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A45 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na massa específica da amostra saturada do concreto convencional (Comparação entre amostra sem fibra e com 1,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-7,6749	0,0015	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-3,4203	0,0268	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A46 – Teste t para avaliar a influência do tipo de fibra na massa específica da amostra saturada do concreto de alta resistência.

<i>Teor de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
1,0%	4	4,7515	0,0090	2,7764	Sim
2,0%	4	12,8637	0,0002	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A47 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na massa específica da amostra saturada do concreto de alta resistência (Comparação entre amostra sem fibra e com 1,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-13,5096	0,0002	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-0,8499	0,4432	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A48 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na massa específica da amostra saturada do concreto de alta resistência (Comparação entre amostra com 1,0% de fibra e com 2,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-12,7329	0,0002	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-1,2524	0,2786	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A49 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na massa específica da amostra saturada do concreto de alta resistência (Comparação entre amostra sem fibra e com 2,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-73,8014	0,0001	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-3,2976	0,0300	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A50 – Teste t para avaliar a influência do tipo de matriz na massa específica da amostra saturada do concreto.

<i>Adição de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Sem fibras	4	-1,6513	0,1740	2,7764	Não
1,0% de fibras de aço	4	0,5942	0,5843	2,7764	Não
1,0% de macrofibra polimérica	4	0,9784	0,3833	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

APÊNDICE I – TESTES ESTATÍSTICOS PARA A MASSA ESPECÍFICA DA AMOSTRA REAL DE CONCRETO

A Tabela A51 contém os resultados individuais, as medidas estatísticas e os resultados do critério de *Chauvenet* para a massa específica da amostra real de cada concreto analisado, comprovando a homogeneidade dos dados. Como foram realizadas três medidas desta propriedade em cada concreto, o valor limite da variação dos dados em relação ao desvio padrão deve ser de 1,38 para que o resultado seja considerado não duvidoso de acordo com o critério de *Chauvenet*.

Tabela A51 – Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a massa específica da amostra real do concreto

	<i>Amostra</i>	<i>Valor (g/cm³)</i>	<i>Média</i>	<i>DP</i>	<i>Variância</i>	<i>CV (%)</i>	<i>Critério de Chauvenet</i>	<i>Homogeneidade?</i>
CCR	1	2,70	2,67	0,026	0,001	0,97	1,15	Sim
	2	2,65					0,69	Sim
	3	2,66					0,45	Sim
CC5FA	1	2,71	2,70	0,015	0,000	0,55	0,47	Sim
	2	2,68					1,15	Sim
	3	2,71					0,67	Sim
CC10FA	1	2,77	2,78	0,008	0,000	0,28	0,71	Sim
	2	2,77					0,44	Sim
	3	2,79					1,14	Sim
CC5PP	1	2,67	2,67	0,010	0,000	0,37	0,90	Sim
	2	2,67					0,17	Sim
	3	2,69					1,07	Sim
CC10PP	1	2,71	2,71	0,009	0,000	0,32	0,03	Sim
	2	2,70					0,98	Sim
	3	2,72					1,02	Sim
CARR	1	2,58	2,59	0,012	0,000	0,47	1,14	Sim
	2	2,60					0,40	Sim
	3	2,60					0,74	Sim
CAR10FA	1	2,63	2,64	0,016	0,000	0,59	1,09	Sim
	2	2,66					0,88	Sim
	3	2,65					0,21	Sim
CAR20FA	1	2,73	2,73	0,012	0,000	0,43	0,16	Sim
	2	2,74					1,07	Sim
	3	2,72					0,91	Sim

(continua)

Tabela A51 – Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a massa específica real do concreto (conclusão)

	<i>Amostra</i>	<i>Valor</i> (g/cm ³)	<i>Média</i>	<i>DP</i>	<i>Variância</i>	<i>CV</i> (%)	<i>Critério de</i> <i>Chauvenet</i>	<i>Homogeneidade?</i>
CAR10PP	1	2,58	2,59	0,015	0,001	0,59	0,79	Sim
	2	2,59					0,34	Sim
	3	2,61					1,13	Sim
CAR20PP	1	2,65	2,63	0,012	0,000	0,45	1,10	Sim
	2	2,62					0,84	Sim
	3	2,63					0,26	Sim

Nota:

DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação, em %.

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Nas Tabelas A52 e A53 são apresentados os resultados da ANOVA para a massa específica da amostra real de cada concreto. Já nas Tabelas A54 a A62 há os detalhes do teste t para a massa específica da amostra real de cada concreto.

Tabela A52 – Análise de variância para a massa específica da amostra real do concreto convencional

<i>Fonte da</i> <i>variação</i>	<i>Soma de</i> <i>quadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Quadrado</i> <i>médio</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>Diferença</i> <i>significativa?</i>
Adição de fibras	0,02324526	4	0,005811315	25,8100523	0,000029850	Sim
Erro	0,00225157	10	0,000225157			
Total	0,02549683	14				

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A53 – Análise de variância para a massa específica da amostra real do concreto de alta resistência

<i>Fonte da</i> <i>variação</i>	<i>Soma de</i> <i>quadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Quadrado</i> <i>médio</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>Diferença</i> <i>significativa?</i>
Adição de fibras	0,039408623	4	0,009852156	54,398622	0,000000947	Sim
Erro	0,001811104	10	0,00018111			
Total	0,041219727	14				

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A54 – Teste t para avaliar a influência do tipo de fibra na massa específica da amostra real do concreto convencional

<i>Teor de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
0,5%	4	2,5008	0,0667	2,7764	Não
1,0%	4	10,3873	0,0005	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A55 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na massa específica da amostra real do concreto convencional (Comparação entre amostra sem fibra e com 0,5% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-1,9428	0,1240	2,7764	Não
Macrofibra polimérica	4	-0,4670	0,6648	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A56 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na massa específica da amostra real do concreto convencional (Comparação entre amostra com 0,5% de fibra e com 1,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-7,9633	0,0013	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-4,3188	0,01225	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A57 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na massa específica da amostra real do concreto convencional (Comparação entre amostra sem fibra e com 1,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-7,1388	0,0020	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-2,5809	0,0613	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A58 – Teste t para avaliar a influência do tipo de fibra na massa específica da amostra real do concreto de alta resistência

<i>Teor de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
1,0%	4	4,2548	0,0131	2,7764	Sim
2,0%	4	10,0600	0,0005	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A59 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na massa específica da amostra real do concreto de alta resistência (Comparação entre amostra sem fibra e com 1,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-4,6976	0,0093	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-0,0283	0,9788	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A60 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na massa específica da amostra real do concreto de alta resistência (Comparação entre amostra com 1,0% de fibra e com 2,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-7,6139	0,0016	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-3,8259	0,0187	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A61 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na massa específica da amostra real do concreto de alta resistência (Comparação entre amostra sem fibra e com 2,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-14,2458	0,0001	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-4,3585	0,0121	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A62 – Teste t para avaliar a influência do tipo de matriz na massa específica da amostra real do concreto

<i>Adição de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Sem fibras	4	4,6589	0,0096	2,7764	Sim
1,0% de fibras de aço	4	13,2369	0,0002	2,7764	Sim
1,0% de macrofibra polimérica	4	11,5771	0,0003	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

APÊNDICE J – TESTES ESTATÍSTICOS PARA A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO

A Tabela A63 contém os resultados individuais, as medidas estatísticas e os resultados do critério de *Chauvenet* para a resistência à compressão de cada concreto analisado, comprovando a homogeneidade dos dados. Foram realizadas cinco medidas desta propriedade em cada concreto, porém alguns valores tiveram que ser desconsiderados por estarem fora do intervalo de confiança do critério de *Chauvenet*. Para que o resultado seja considerado não duvidoso, o valor limite da variação dos dados em relação ao desvio padrão deve ser de 1,54 e 1,65, considerando 4 e 5 medições, respectivamente.

Tabela A63 – Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a resistência à compressão do concreto

	<i>Amostra</i>	<i>Valor (MPa)</i>	<i>Média</i>	<i>DP</i>	<i>Variância</i>	<i>CV (%)</i>	<i>Critério de Chauvenet</i>	<i>Homogeneidade?</i>
CCR	1	42,14	41,66	0,593	0,352	1,42	0,82	Sim
	2	41,74					0,14	Sim
	3	41,94					0,48	Sim
	4	40,80					1,44	Sim
CC5FA	1	46,03	46,17	0,434	0,188	0,94	0,33	Sim
	2	46,59					0,96	Sim
	3	45,67					1,16	Sim
	4	46,66					1,12	Sim
	5	45,91					0,60	Sim
CC10FA	1	44,46	42,63	1,984	3,936	4,65	0,92	Sim
	2	41,85					0,39	Sim
	3	40,71					0,97	Sim
	4	41,10					0,77	Sim
	5	45,03					1,21	Sim
CC5PP	1	46,02	46,61	1,253	1,569	2,69	0,47	Sim
	2	47,95					1,07	Sim
	3	45,17					1,15	Sim
	4	47,31					0,56	Sim
CC10PP	1	45,44	44,08	1,644	2,704	3,73	0,83	Sim
	2	44,55					0,28	Sim
	3	41,64					1,49	Sim
	4	45,53					0,88	Sim
	5	43,25					0,51	Sim

(continua)

Tabela A63 – Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a resistência à compressão do concreto (conclusão)

	<i>Amostra</i>	<i>Valor (MPa)</i>	<i>Média</i>	<i>DP</i>	<i>Variância</i>	<i>CV (%)</i>	<i>Critério de Chauvenet</i>	<i>Homogeneidade?</i>
CARR	1	72,76	70,24	2,554	6,523	3,64	0,99	Sim
	2	68,53					0,67	Sim
	3	66,81					1,34	Sim
	4	70,65					0,16	Sim
	5	72,45					0,87	Sim
CAR10FA	1	71,95	77,60	4,372	19,116	5,63	1,29	Sim
	2	74,74					0,66	Sim
	3	83,27					1,30	Sim
	4	78,78					0,27	Sim
	5	79,28					0,38	Sim
CAR20FA	1	84,91	84,14	0,895	0,800	1,06	0,86	Sim
	2	82,96					1,32	Sim
	3	83,93					0,23	Sim
	4	84,75					0,68	Sim
CAR10PP	1	74,34	73,52	1,173	1,375	1,60	0,70	Sim
	2	71,78					1,48	Sim
	3	73,90					0,33	Sim
	4	74,05					0,45	Sim
CAR20PP	1	65,96	65,16	2,423	5,870	3,72	0,33	Sim
	2	66,36					0,50	Sim
	3	68,15					1,23	Sim
	4	62,59					1,06	Sim
	5	62,74					1,00	Sim

Nota:

DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação, em %.

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Nas Tabelas A64 e A65 são apresentados os resultados da ANOVA para a resistência à compressão de cada concreto. Já nas Tabelas A66 a A74 há os detalhes do teste t para a resistência à compressão de cada concreto.

Tabela A64 – Análise de variância para a resistência à compressão do concreto convencional

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma de quadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Quadrado médio</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Adição de fibras	80,99232587	4	20,24808147	11,0191192	0,000107096	Sim
Erro	33,075735	18	1,837540833			
Total	114,0680609	22				

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A65 – Análise de variância para a resistência à compressão do concreto de alta resistência

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma de quadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Quadrado médio</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Adição de fibras	936,6082517	4	234,1520629	31,793627	0,000000062	Sim
Erro	132,56547	18	7,364748333			
Total	1069,173722	22				

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A66 – Teste t para avaliar a influência do tipo de fibra na resistência à compressão do concreto convencional

<i>Teor de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
0,5%	7	-0,7435	0,4814	2,3646	Não
1,0%	8	-1,2600	0,2432	2,3060	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A67 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na resistência à compressão do concreto convencional (Comparação entre amostra sem fibra e com 0,5% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	7	-13,2479	0,0001	2,3646	Sim
Macrofibra polimérica	6	-7,1543	0,0004	2,4469	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A68 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na resistência à compressão do concreto convencional (Comparação entre amostra com 0,5% de fibra e com 1,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	8	3,8998	0,0045	2,3060	Sim
Macrofibra polimérica	7	2,5332	0,0391	2,3646	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A69 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na resistência à compressão do concreto convencional (Comparação entre amostra sem fibra e com 1,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	7	-0,9382	0,3794	2,3646	Não
Macrofibra polimérica	7	-2,7783	0,0274	2,3646	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A70 – Teste t para avaliar a influência do tipo de fibra na resistência à compressão do concreto de alta resistência

<i>Teor de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
1,0%	7	1,7954	0,1157	2,3646	Não
2,0%	7	14,7121	0,0001	2,3646	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A71 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na resistência à compressão do concreto de alta resistência (Comparação entre amostra sem fibra e com 1,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	8	-3,2520	0,0117	2,3060	Sim
Macrofibra polimérica	7	-2,3516	0,0510	2,3646	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A72 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na resistência à compressão do concreto de alta resistência (Comparação entre amostra com 1,0% de fibra e com 2,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	7	-2,9016	0,0229	2,3646	Sim
Macrofibra polimérica	7	6,2735	0,0004	2,3646	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A73 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na resistência à compressão do concreto de alta resistência (Comparação entre amostra sem fibra e com 2,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	7	-10,2686	0,0001	2,3646	Sim
Macrofibra polimérica	8	3,2267	0,0121	2,3060	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A74 – Teste t para avaliar a influência do tipo de matriz na resistência à compressão do concreto

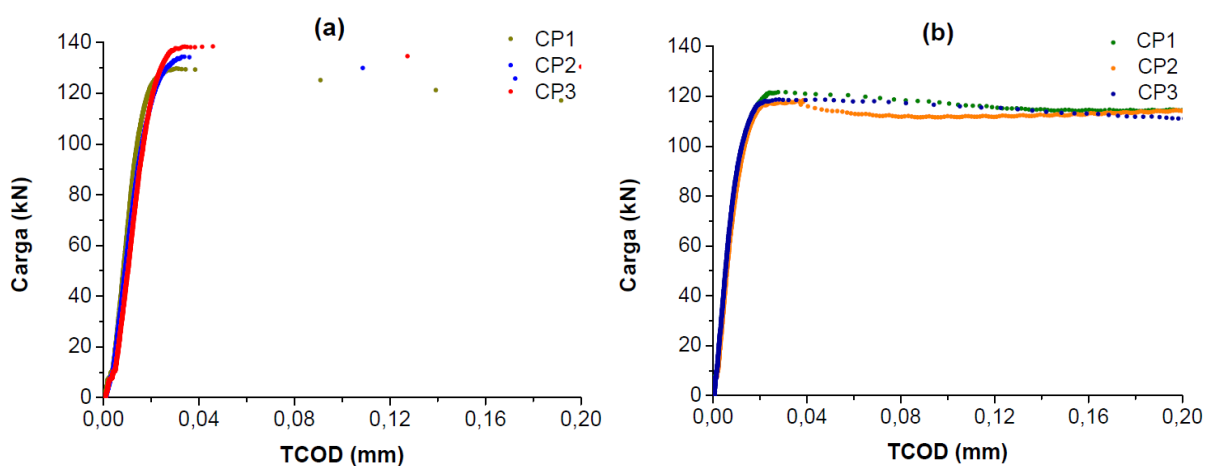
<i>Adição de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Sem fibras	7	-21,6384	0,0001	2,3646	Sim
1,0% de fibras de aço	8	-16,2881	0,0001	2,3060	Sim
1,0% de macrofibra polimérica	7	-30,0350	0,0001	2,3646	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

APÊNDICE K – CURVAS CARGA *VERSUS* TCOB PARA PEQUENOS VALORES DE TCOB (ENSAIO BARCELONA)

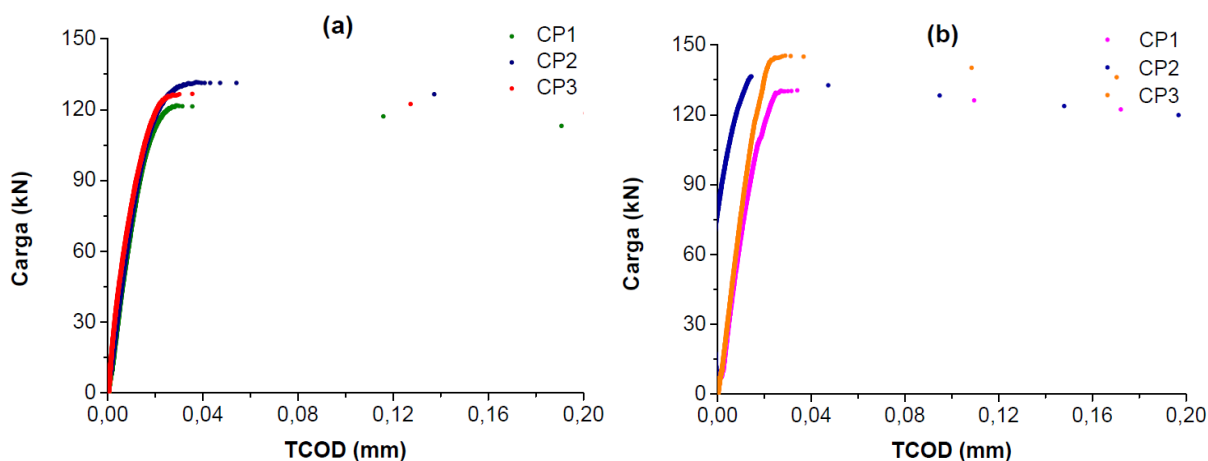
As Figuras A7 e A8 contêm as curvas carga *versus* TCOB do concreto convencional com fibra de aço e com macrofibra polimérica, respectivamente, para pequenos valores de TCOB. Nas Figuras A9 e A10 são apresentadas tais curvas para o concreto de alta resistência com fibra de aço e com macrofibra polimérica, respectivamente.

Figura A7 – Curvas carga *versus* TCOB do concreto convencional com teor de fibra de aço de (a) 0,5% e (b) 1,0%, em volume, para pequenos valores de TCOB



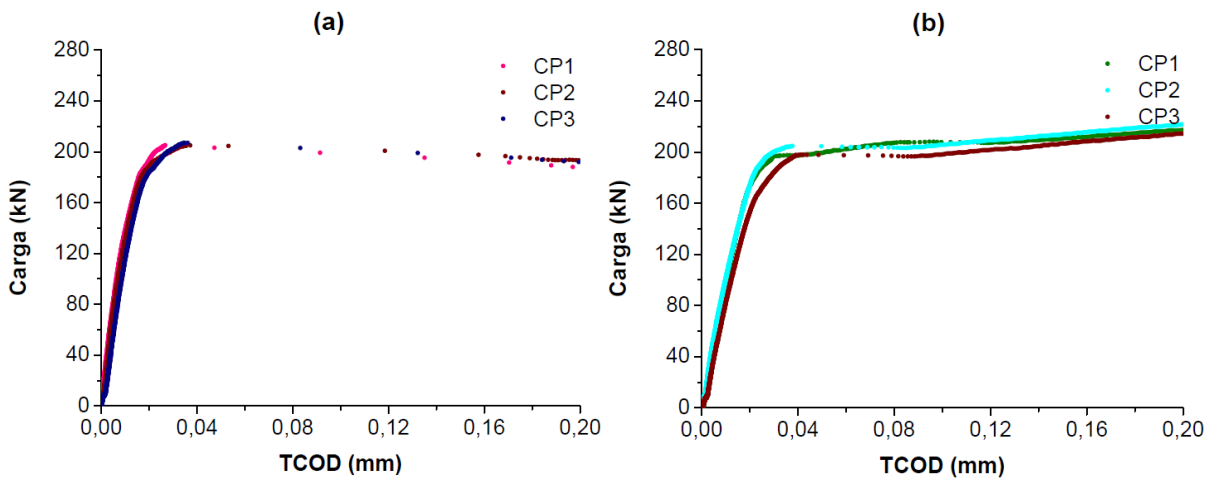
Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Figura A8 – Curvas carga *versus* TCOB do concreto convencional com teor de macrofibra polimérica de (a) 0,5% e (b) 1,0%, em volume, para pequenos valores de TCOB



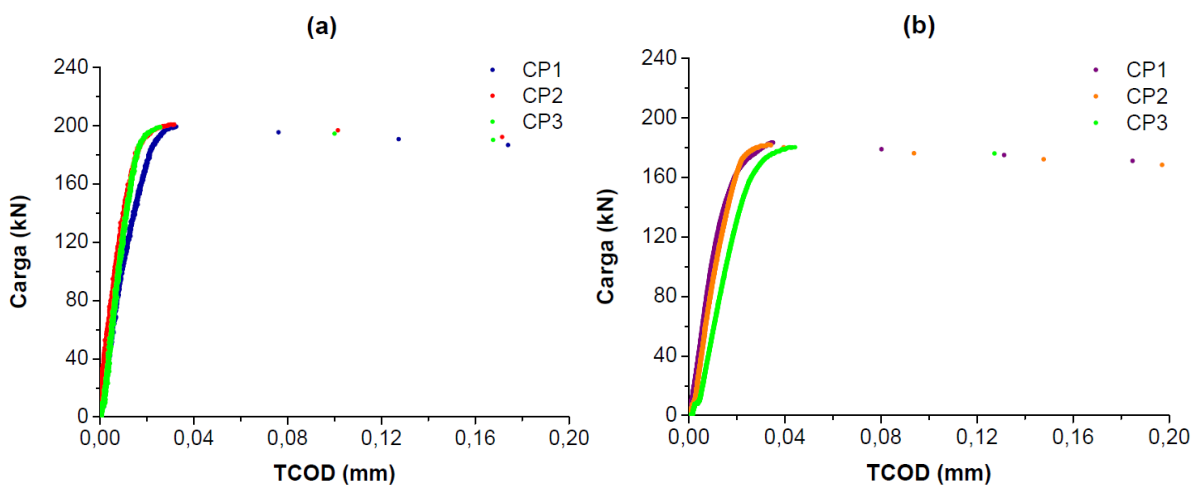
Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Figura A9 – Curvas carga *versus* TCOd do concreto de alta resistência com teor de fibra de aço de (a) 1,0% e (b) 2,0%, em volume, para pequenos valores de TCOd



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Figura A10 – Curvas carga *versus* TCOd do concreto de alta resistência com teor de macrofibra polimérica de (a) 1,0% e (b) 2,0%, em volume, para pequenos valores de TCOd



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

APÊNDICE L - TESTES ESTATÍSTICOS PARA A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DO CONCRETO (ENSAIO BARCELONA)

A Tabela A75 contém os resultados individuais, as medidas estatísticas e os resultados do critério de *Chauvenet* para a resistência à tração (ensaio Barcelona) de cada concreto analisado, comprovando a homogeneidade dos dados. Como foram realizadas três medidas desta propriedade em cada concreto, o valor limite da variação dos dados em relação ao desvio padrão deve ser de 1,38 para que o resultado seja considerado não duvidoso de acordo com o critério de *Chauvenet*.

Tabela A75 – Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a resistência à tração do concreto (ensaio Barcelona)

	<i>Amostra</i>	<i>Valor (MPa)</i>	<i>Média</i>	<i>DP</i>	<i>Variância</i>	<i>CV (%)</i>	<i>Critério de Chauvenet</i>	<i>Homogeneidade?</i>
CCR	1	2,78	2,88	0,111	0,012	3,87	0,83	Sim
	2	3,00					1,11	Sim
	3	2,84					0,28	Sim
CC5FA	1	3,26	3,37	0,109	0,012	3,23	1,02	Sim
	2	3,38					0,04	Sim
	3	3,48					0,98	Sim
CC10FA	1	3,06	3,04	0,015	0,000	0,50	1,15	Sim
	2	3,03					0,57	Sim
	3	3,03					0,59	Sim
CC5PP	1	3,06	3,19	0,124	0,015	3,89	1,00	Sim
	2	3,31					1,00	Sim
	3	3,19					0,00	Sim
CC10PP	1	3,28	3,46	0,189	0,036	5,46	0,93	Sim
	2	3,43					0,13	Sim
	3	3,66					1,06	Sim
CARR	1	4,46	4,29	0,201	0,041	4,70	0,89	Sim
	2	4,33					0,20	Sim
	3	4,07					1,08	Sim
CAR10FA	1	5,16	5,19	0,029	0,001	0,55	1,15	Sim
	2	5,21					0,65	Sim
	3	5,20					0,50	Sim
CAR20FA	1	6,24	6,29	0,137	0,019	2,18	0,33	Sim
	2	6,44					1,12	Sim
	3	6,18					0,80	Sim

(continua)

Tabela A75 – Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a resistência à tração do concreto (ensaio Barcelona)
(conclusão)

	<i>Amostra</i>	<i>Valor (MPa)</i>	<i>Média</i>	<i>DP</i>	<i>Variância</i>	<i>CV (%)</i>	<i>Critério de Chauvenet</i>	<i>Homogeneidade?</i>
CAR10PP	1	5,02					0,44	Sim
	2	5,05	5,03	0,023	0,001	0,47	1,15	Sim
	3	5,01					0,70	Sim
CAR20PP	1	4,62					0,98	Sim
	2	4,58	4,58	0,041	0,002	0,89	0,04	Sim
	3	4,53					1,02	Sim

Nota:

DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação, em %.

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Nas Tabelas A76 e A77 são apresentados os resultados da ANOVA para a resistência à tração (ensaio Barcelona) de cada concreto. Já nas Tabelas A78 a A86 há os detalhes do teste t para a resistência à tração (ensaio Barcelona) de cada concreto.

Tabela A76 – Análise de variância para a resistência à tração do concreto convencional

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma de quadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Quadrado médio</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Adição de fibras	0,678116968	4	0,169529	11,2316858	0,001018	Sim
Erro	0,150938377	10	0,015094			
Total	0,829055345	14				

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A77 – Análise de variância para a resistência à tração do concreto de alta resistência

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma de quadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Quadrado médio</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Adição de fibras	7,06491264	4	1,76622816	141,486	0,000000009	Sim
Erro	0,124833922	10	0,012483392			
Total	7,189746563	14				

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A78 – Teste t para avaliar a influência do tipo de fibra na resistência à tração do concreto convencional

<i>Teor de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
0,5%	4	1,9786	0,1190	2,7764	Não
1,0%	4	-3,7957	0,0192	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A79 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na resistência à tração do concreto convencional (Comparação entre amostra sem fibra e com 0,5% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-5,5535	0,0051	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-3,2338	0,0319	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A80 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na resistência à tração do concreto convencional (Comparação entre amostra com 0,5% de fibra e com 1,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	5,2533	0,0063	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-2,0695	0,1073	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A81 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na resistência à tração do concreto convencional (Comparação entre amostra sem fibra e com 1,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-2,5535	0,0631	2,7764	Não
Macrofibra polimérica	4	-4,5895	0,0101	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A82 – Teste t para avaliar a influência do tipo de fibra na resistência à tração do concreto de alta resistência.

<i>Teor de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
1,0%	4	7,6962	0,0015	2,7764	Sim
2,0%	4	20,6801	0,0001	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A83 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na resistência à tração do concreto de alta resistência (Comparação entre amostra sem fibra e com 1,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-7,6965	0,0015	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-6,3169	0,0032	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A84 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na resistência à tração do concreto de alta resistência (Comparação entre amostra com 1,0% de fibra e com 2,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-13,5440	0,0002	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	16,5085	0,0001	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A85 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na resistência à tração do concreto de alta resistência (Comparação entre amostra sem fibra e com 2,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-14,2188	0,0001	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-2,4398	0,0712	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A86 – Teste t para avaliar a influência do tipo de matriz na resistência à tração do concreto

<i>Adição de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Sem fibras	4	-10,6271	0,0004	2,7764	Sim
1,0% de fibras de aço	4	-114,6928	0,0001	2,7764	Sim
1,0% de macrofibra polimérica	4	-14,2899	0,0001	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

APÊNDICE M – TESTES ESTATÍSTICOS PARA A TENACIDADE DO CONCRETO (ENSAIO BARCELONA)

A Tabela A87 contém os resultados individuais, as medidas estatísticas e os resultados do critério de *Chauvenet* para a tenacidade (ensaio Barcelona) de cada concreto analisado, comprovando a homogeneidade dos dados. Como foram realizadas três medidas desta propriedade em cada concreto, o valor limite da variação dos dados em relação ao desvio padrão deve ser de 1,38 para que o resultado seja considerado não duvidoso de acordo com o critério de *Chauvenet*.

Tabela A87 – Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a tenacidade do concreto
(ensaio Barcelona)

	<i>Amostra</i>	<i>Valor (J)</i>	<i>Média</i>	<i>DP</i>	<i>Variância</i>	<i>CV (%)</i>	<i>Critério de Chauvenet</i>	<i>Homogeneidade ?</i>
CC5FA	1	384,48	387,59	9,156	83,832	2,36	0,34	Sim
	2	397,90					1,13	Sim
	3	380,40					0,79	Sim
CC10FA	1	500,20	542,75	38,906	1513,664	7,17	1,09	Sim
	2	551,53					0,23	Sim
	3	576,51					0,87	Sim
CC5PP	1	309,17	308,33	8,511	72,440	2,76	0,10	Sim
	2	299,43					1,05	Sim
	3	316,39					0,95	Sim
CC10PP	1	343,43	375,45	27,922	779,653	7,44	1,15	Sim
	2	394,73					0,69	Sim
	3	388,19					0,46	Sim
CAR10FA	1	646,00	750,90	106,505	11343,26	14,18	0,98	Sim
	2	858,94					1,01	Sim
	3	747,76					0,03	Sim
CAR20FA	1	1193,62	1114,75	84,996	7224,311	7,62	0,93	Sim
	2	1024,73					1,06	Sim
	3	1125,91					0,13	Sim
CAR10PP	1	433,02	467,90	39,798	1583,874	8,51	0,88	Sim
	2	511,25					1,09	Sim
	3	459,42					0,21	Sim
CAR20PP	1	781,80	722,48	95,791	9175,869	13,26	0,62	Sim
	2	611,97					1,15	Sim
	3	773,67					0,53	Sim

Nota:

DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação, em %.

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Nas Tabelas A88 e A89 são apresentados os resultados da ANOVA para a tenacidade (ensaio Barcelona) de cada concreto. Já nas Tabelas A90 a A94 há os detalhes do teste t para a tenacidade (ensaio Barcelona) de cada concreto.

Tabela A88 – Análise de variância para a tenacidade do concreto convencional

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma de quadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Quadrado médio</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Adição de fibras	88460,35207	3	29486,78402	48,1497623	0,0000183	Sim
Erro	4899,178333	8	612,3972917			
Total	93359,5304	11				

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A89 – Análise de variância para a tenacidade do concreto de alta resistência

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma de quadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Quadrado médio</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Adição de fibras	637801,8151	3	212600,605	28,9969459	0,0001196	Sim
Erro	58654,61993	8	7331,827492			
Total	696456,435	11				

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A90 – Teste t para avaliar a influência do tipo de fibra na tenacidade do concreto convencional

<i>Teor de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
0,5%	4	10,9823	0,0004	2,7764	Sim
1,0%	4	6,0508	0,0038	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A91 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na tenacidade do concreto convencional (Comparação entre amostra com 0,5% de fibra e com 1,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-6,7236	0,0025	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-3,9826	0,0164	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A92 – Teste t para avaliar a influência do tipo de fibra na tenacidade do concreto de alta resistência

<i>Teor de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
1,0%	4	4,3112	0,0125	2,7764	Sim
2,0%	4	5,3055	0,0061	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A93 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na tenacidade do concreto de alta resistência (Comparação entre amostra com 1,0% de fibra e com 2,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-4,6250	0,0098	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-4,2510	0,0131	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela 94 – Teste t para avaliar a influência do tipo de matriz na tenacidade do concreto

<i>Adição de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
1,0% de fibras de aço	4	-3,1796	0,0335	2,7764	Sim
1,0% de macrofibra polimérica	4	-3,2936	0,0301	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

APÊNDICE N – TESTES ESTATÍSTICOS PARA A RESISTÊNCIA RESIDUAL DO CONCRETO NO ELS (ENSAIO BARCELONA)

A Tabela A95 contém os resultados individuais, as medidas estatísticas e os resultados do critério de *Chauvenet* para a resistência residual no ELS (ensaio Barcelona) de cada concreto analisado, comprovando a homogeneidade dos dados. Como foram realizadas três medidas desta propriedade em cada concreto, o valor limite da variação dos dados em relação ao desvio padrão deve ser de 1,38 para que o resultado seja considerado não duvidoso de acordo com o critério de *Chauvenet*.

Tabela A95 – Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a resistência residual no ELS do concreto (ensaio Barcelona)

	<i>Amostra</i>	<i>Valor (MPa)</i>	<i>Média</i>	<i>DP</i>	<i>Variância</i>	<i>CV (%)</i>	<i>Critério de Chauvenet</i>	<i>Homogeneidade ?</i>
CC5FA	1	1,96	2,08	0,111	0,012	5,36	1,10	Sim
	2	2,18					0,86	Sim
	3	2,11					0,23	Sim
CC10FA	1	2,39	2,73	0,293	0,086	10,74	1,14	Sim
	2	2,93					0,70	Sim
	3	2,86					0,44	Sim
CC5PP	1	1,33	1,40	0,082	0,007	5,88	0,91	Sim
	2	1,39					0,16	Sim
	3	1,49					1,07	Sim
CC10PP	1	1,65	1,89	0,214	0,046	11,35	1,12	Sim
	2	2,06					0,82	Sim
	3	1,95					0,30	Sim
CAR10FA	1	4,35	4,63	0,304	0,092	6,57	0,91	Sim
	2	4,95					1,07	Sim
	3	4,58					0,16	Sim
CAR20FA	1	6,23	6,11	0,188	0,035	3,08	0,67	Sim
	2	6,20					0,48	Sim
	3	5,89					1,15	Sim
CAR10PP	1	2,35	2,73	0,398	0,159	14,59	0,95	Sim
	2	3,15					1,04	Sim
	3	2,69					0,10	Sim
CAR20PP	1	3,88	3,64	0,562	0,316	15,43	0,43	Sim
	2	3,00					1,14	Sim
	3	4,04					0,71	Sim

Nota:

DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação, em %.

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Nas Tabelas A96 e A97 são apresentados os resultados da ANOVA para a resistência residual do ELS (ensaio Barcelona) de cada concreto. Já nas Tabelas A98 a A102 há os detalhes do teste t para a resistência residual do ELS (ensaio Barcelona) de cada concreto.

Tabela A96 – Análise de variância para a $f_{ct, TCOD=1,5}$ do concreto convencional

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma de quadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Quadrado médio</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Adição de fibras	2,719486426	3	0,906495475	24,043676	0,000234512	Sim
Erro	0,301616263	8	0,037702033			
Total	3,021102688	11				

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A97 – Análise de variância para a $f_{ct, TCOD=1,5}$ do concreto de alta resistência

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma de quadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Quadrado médio</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Adição de fibras	18,80221732	3	6,267405775	41,637435	0,00003151	Sim
Erro	1,204186714	8	0,150523339			
Total	20,00640404	11				

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A98 – Teste t para avaliar a influência do tipo de fibra na $f_{ct, TCOD=1,5}$ do concreto convencional

<i>Teor de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
0,5%	4	8,5020	0,0010	2,7764	Sim
1,0%	4	4,0117	0,0160	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A99 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na $f_{ct, TCOD=1,5}$ do concreto convencional (Comparação entre amostra com 0,5% de fibra e com 1,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-3,5811	0,0231	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-3,6804	0,0212	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A100 – Teste t para avaliar a influência do tipo de fibra na $f_{ct, TCOD=1,5}$ do concreto de alta resistência

<i>Teor de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
1,0%	4	6,5534	0,0028	2,7764	Sim
2,0%	4	7,2077	0,0020	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A101 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na $f_{ct, TCOD=1,5}$ do concreto de alta resistência (Comparação entre amostra com 1,0% de fibra e com 2,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-7,1824	0,0020	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-2,2912	0,0838	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A102 – Teste t para avaliar a influência do tipo de matriz na $f_{ct, TCOD=1,5}$ do concreto

<i>Adição de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
1,0% de fibras de aço	4	-7,7958	0,0015	2,7764	Sim
1,0% de macrofibra polimérica	4	-3,2307	0,0320	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

APÊNDICE O – TESTES ESTATÍSTICOS PARA A RESISTÊNCIA RESIDUAL DO CONCRETO NO ELU (ENSAIO BARCELONA)

A Tabela A103 contém os resultados individuais, as medidas estatísticas e os resultados do critério de *Chauvenet* para a resistência residual no ELU (ensaio Barcelona) de cada concreto analisado, comprovando a homogeneidade dos dados. Como foram realizadas três medidas desta propriedade em cada concreto, o valor limite da variação dos dados em relação ao desvio padrão deve ser de 1,38 para que o resultado seja considerado não duvidoso de acordo com o critério de *Chauvenet*.

Tabela A103 – Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a resistência residual no ELU do concreto (ensaio Barcelona)

	<i>Amostra</i>	<i>Valor (MPa)</i>	<i>Média</i>	<i>DP</i>	<i>Variância</i>	<i>CV (%)</i>	<i>Critério de Chauvenet</i>	<i>Homogeneidade ?</i>
CC5FA	1	0,95	0,85	0,088	0,008	10,30	1,10	Sim
	2	0,83					0,24	Sim
	3	0,78					0,86	Sim
CC10FA	1	1,44	1,47	0,112	0,013	7,59	0,32	Sim
	2	1,39					0,80	Sim
	3	1,60					1,12	Sim
CC5PP	1	0,82	0,74	0,090	0,008	12,15	0,91	Sim
	2	0,65					1,07	Sim
	3	0,76					0,16	Sim
CC10PP	1	0,95	0,95	0,013	0,000	1,33	0,21	Sim
	2	0,96					0,88	Sim
	3	0,93					1,09	Sim
CAR10FA	1	1,01	1,37	0,410	0,168	29,99	0,88	Sim
	2	1,82					1,09	Sim
	3	1,28					0,21	Sim
CAR20FA	1	3,34	2,91	0,610	0,373	20,97	0,70	Sim
	2	2,21					1,15	Sim
	3	3,18					0,45	Sim
CAR10PP	1	0,63	0,83	0,196	0,039	23,61	1,04	Sim
	2	1,02					0,95	Sim
	3	0,85					0,09	Sim
CAR20PP	1	2,09	2,06	0,119	0,014	5,78	0,31	Sim
	2	1,92					1,12	Sim
	3	2,15					0,81	Sim

Nota:

DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação, em %.

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Nas Tabelas A104 e A105 são apresentados os resultados da ANOVA para a resistência residual do ELU (ensaio Barcelona) de cada concreto. Já nas Tabelas A106 a A110 há os detalhes do teste t para a resistência residual do ELU (ensaio Barcelona) de cada concreto.

Tabela A104 – Análise de variância para a $f_{ct, TCO D=6}$ do concreto convencional

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma de quadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Quadrado médio</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Adição de fibras	0,947761616	3	0,315920539	44,3359008	0,00002491	Sim
Erro	0,057004916	8	0,007125615			
Total	1,004766532	11				

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A105 – Análise de variância para a $f_{ct, TCO D=6}$ do concreto de alta resistência

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma de quadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Quadrado médio</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Adição de fibras	7,269859686	3	2,423286562	16,324287	0,00090132	Sim
Erro	1,187573631	8	0,148446704			
Total	8,457433318	11				

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A106 – Teste t para avaliar a influência do tipo de fibra na $f_{ct, TCO D=6}$ do concreto convencional

<i>Teor de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
0,5%	4	1,5243	0,2021	2,7764	Não
1,0%	4	8,0917	0,0013	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A107 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na $f_{ct, TCO D=6}$ do concreto convencional (Comparação entre amostra com 0,5% de fibra e com 1,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-7,5725	0,0016	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-3,9335	0,0171	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A108 – Teste t para avaliar a influência do tipo de fibra na $f_{ct, T_{COD}=6}$ do concreto de alta resistência

<i>Teor de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
1,0%	4	2,0443	0,1104	2,7764	Não
2,0%	4	2,3779	0,0762	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A109 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na $f_{ct, T_{COD}=6}$ do concreto de alta resistência (Comparação entre amostra com 1,0% de fibra e com 2,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-3,6310	0,0221	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-9,2442	0,0008	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A110 – Teste t para avaliar a influência do tipo de matriz na $f_{ct, T_{COD}=6}$ do concreto

<i>Adição de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
1,0% de fibras de aço	4	0,4302	0,6892	2,7764	Não
1,0% de macrofibra polimérica	4	1,0293	0,3615	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

APÊNDICE P – TESTES ESTATÍSTICOS PARA A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DO CONCRETO (TENACIDADE EM PRISMAS)

A Tabela A111 contém os resultados individuais, as medidas estatísticas e os resultados do critério de *Chauvenet* para a resistência à tração (tenacidade em prismas) de cada concreto analisado, comprovando a homogeneidade dos dados. Como foram realizadas três medidas desta propriedade em cada concreto, o valor limite da variação dos dados em relação ao desvio padrão deve ser de 1,38 para que o resultado seja considerado não duvidoso de acordo com o critério de *Chauvenet*.

Tabela A111 – Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a resistência à tração do concreto (tenacidade em prismas)

	<i>Amostra</i>	<i>Valor (MPa)</i>	<i>Média</i>	<i>DP</i>	<i>Variância</i>	<i>CV (%)</i>	<i>Critério de Chauvenet</i>	<i>Homogeneidade?</i>
CCR	1	5,14	5,07	0,068	0,005	1,34	1,08	Sim
	2	5,05					0,18	Sim
	3	5,01					0,90	Sim
CC5FA	1	5,13	5,37	0,448	0,201	8,35	0,54	Sim
	2	5,89					1,15	Sim
	3	5,10					0,62	Sim
CC10FA	1	7,34	6,89	0,417	0,174	6,05	1,07	Sim
	2	6,82					0,17	Sim
	3	6,51					0,90	Sim
CC5PP	1	5,24	5,10	0,285	0,081	5,58	0,50	Sim
	2	5,29					0,65	Sim
	3	4,77					1,15	Sim
CC10PP	1	4,55	4,37	0,379	0,143	8,66	0,48	Sim
	2	4,63					0,67	Sim
	3	3,94					1,15	Sim
CARR	1	8,11	7,97	0,199	0,039	2,49	0,71	Sim
	2	7,83					0,71	Sim
	3	-					-	Sim
CAR10FA	1	9,47	9,79	0,295	0,087	3,01	1,06	Sim
	2	10,06					0,93	Sim
	3	9,82					0,12	Sim
CAR20FA	1	12,85	12,85	0,366	0,134	2,85	0,00	Sim
	2	13,22					1,00	Sim
	3	12,48					1,00	Sim

(continua)

Tabela A111 – Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a resistência à tração do concreto (tenacidade em prismas)
(conclusão)

	<i>Amostra</i>	<i>Valor (MPa)</i>	<i>Média</i>	<i>DP</i>	<i>Variância</i>	<i>CV (%)</i>	<i>Critério de Chauvenet</i>	<i>Homogeneidade?</i>
CAR10PP	1	8,44	8,36	0,067	0,004	0,80	1,15	Sim
	2	8,33					0,58	Sim
	3	8,33					0,58	Sim
CAR20PP	1	7,59	7,82	0,221	0,049	2,83	1,06	Sim
	2	8,03					0,93	Sim
	3	7,85					0,13	Sim

Nota:

DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação, em %.

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Nas Tabelas A112 e A113 são apresentados os resultados da ANOVA para a resistência à tração (tenacidade em prismas) de cada concreto. Já nas Tabelas A114 a A122 há os detalhes do teste t para a resistência à tração (tenacidade em prismas) de cada concreto.

Tabela A112 – Análise de variância para a resistência à tração do concreto convencional

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma de quadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Quadrado médio</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Adição de fibras	10,40584249	4	2,601460622	21,5448667	0,00006659	Sim
Erro	1,207461926	10	0,120746193			
Total	11,61330441	14				

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A113 – Análise de variância para a resistência à tração do concreto de alta resistência

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma de quadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Quadrado médio</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Adição de fibras	50,89742947	4	12,72435737	194,70477	0,00000001	Sim
Erro	0,588168521	9	0,065352058			
Total	51,48559799	13				

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A114 – Teste t para avaliar a influência do tipo de fibra na resistência à tração do concreto convencional

<i>Teor de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
0,5%	4	0,8868	0,4253	2,7764	Não
1,0%	4	7,7457	0,0015	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A115 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na resistência à tração do concreto convencional (Comparação entre amostra sem fibra e com 0,5% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-1,1711	0,3066	2,7764	Não
Macrofibra polimérica	4	-0,2050	0,8476	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A116 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na resistência à tração do concreto convencional (Comparação entre amostra com 0,5% de fibra e com 1,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-4,2914	0,0127	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	2,6646	0,0561	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A117 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na resistência à tração do concreto convencional (Comparação entre amostra sem fibra e com 1,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-7,4808	0,0017	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	3,1258	0,0353	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A118 – Teste t para avaliar a influência do tipo de fibra na resistência à tração do concreto de alta resistência

<i>Teor de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
1,0%	4	8,1401	0,0012	2,7764	Sim
2,0%	4	20,3548	0,0001	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A119 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na resistência à tração do concreto de alta resistência (Comparação entre amostra sem fibra e com 1,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	3	-7,4765	0,0050	3,1824	Sim
Macrofibra polimérica	3	-3,4411	0,0412	3,1824	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A120 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na resistência à tração do concreto de alta resistência (Comparação entre amostra com 1,0% de fibra e com 2,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-11,2900	0,0004	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	4,0733	0,0152	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A121 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na resistência à tração do concreto de alta resistência (Comparação entre amostra sem fibra e com 2,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	3	-16,7031	0,0005	3,1824	Sim
Macrofibra polimérica	3	0,7396	0,5131	3,1824	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A122 – Teste t para avaliar a influência do tipo de matriz na resistência à tração do concreto

<i>Adição de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Sem fibras	3	-24,9258	0,0001	3,1824	Sim
1,0% de fibras de aço	4	-9,8278	0,0003	2,7764	Sim
1,0% de macrofibra polimérica	4	-17,9865	0,0001	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

APÊNDICE Q – TESTES ESTATÍSTICOS PARA O FATOR DE TENACIDADE DO CONCRETO (TENACIDADE EM PRISMAS)

A Tabela A123 contém os resultados individuais, as medidas estatísticas e os resultados do critério de *Chauvenet* para o fator de tenacidade (tenacidade em prismas) de cada concreto analisado, comprovando a homogeneidade dos dados. Como foram realizadas três medidas desta propriedade em cada concreto, o valor limite da variação dos dados em relação ao desvio padrão deve ser de 1,38 para que o resultado seja considerado não duvidoso de acordo com o critério de *Chauvenet*.

Tabela A123 – Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para o fator de tenacidade do concreto (tenacidade em prismas)

	<i>Amostra</i>	<i>Valor (MPa)</i>	<i>Média</i>	<i>DP</i>	<i>Variância</i>	<i>CV (%)</i>	<i>Critério de Chauvenet</i>	<i>Homogeneidade ?</i>
CC5FA	1	3,17	3,37	0,287	0,082	8,52	0,68	Sim
	2	3,70					1,15	Sim
	3	3,24					0,46	Sim
CC10FA	1	5,16	5,01	0,387	7,72	7,17	0,39	Sim
	2	5,30					0,74	Sim
	3	4,57					1,14	Sim
CC5PP	1	3,26	3,03	0,245	0,060	8,09	0,90	Sim
	2	2,77					1,07	Sim
	3	3,08					0,17	Sim
CC10PP	1	2,97	2,87	0,413	0,170	14,39	0,25	Sim
	2	3,22					0,85	Sim
	3	2,41					1,10	Sim
CAR10FA	1	7,08	7,28	0,172	0,030	2,36	1,15	Sim
	2	7,36					0,49	Sim
	3	7,39					0,66	Sim
CAR20FA	1	9,81	10,09	0,580	0,336	5,75	0,48	Sim
	2	10,76					1,15	Sim
	3	9,70					0,67	Sim
CAR10PP	1	5,75	5,00	0,837	0,701	16,74	0,89	Sim
	2	5,16					0,18	Sim
	3	4,10					1,08	Sim
CAR20PP	1	6,43	5,89	0,591	0,350	10,05	0,92	Sim
	2	5,26					1,07	Sim
	3	5,98					0,15	Sim

Nota:

DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação, em %.

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Nas Tabelas A124 e A125 são apresentados os resultados da ANOVA para o fator de tenacidade (tenacidade em prismas) de cada concreto. Já nas Tabelas A126 a A130 há os detalhes do teste t para o fator de tenacidade (tenacidade em prismas) de cada concreto.

Tabela A124 – Análise de variância para o fator de tenacidade do concreto convencional

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma de quadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Quadrado médio</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Adição de fibras	8,681745449	3	2,89391515	25,0108363	0,00020372	Sim
Erro	0,925651621	8	0,115706453			
Total	9,60739707	11				

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A125 – Análise de variância para o fator de tenacidade do concreto de alta resistência

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma de quadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Quadrado médio</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Adição de fibras	44,59015893	3	14,86338631	41,9789052	0,0000306	Sim
Erro	2,832543868	8	0,354067984			
Total	47,4227028	11				

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A126 – Teste t para avaliar a influência do tipo de fibra no fator de tenacidade do concreto convencional

<i>Teor de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
0,5%	4	1,5304	0,2007	2,7764	Não
1,0%	4	6,5548	0,0028	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A127 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra no fator de tenacidade do concreto convencional (Comparação entre amostra com 0,5% de fibra e com 1,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-5,9039	0,0041	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	0,5978	0,5821	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A128 – Teste t para avaliar a influência do tipo de fibra no fator de tenacidade do concreto de alta resistência

<i>Teor de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
1,0%	4	4,6202	0,0099	2,7764	Sim
2,0%	4	8,7941	0,0009	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A129 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra no fator de tenacidade do concreto de alta resistência (Comparação entre amostra com 1,0% de fibra e com 2,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-8,0543	0,0013	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-1,4990	0,2082	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A130 – Teste t para avaliar a influência do tipo de matriz no fator de tenacidade do concreto

<i>Adição de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
1,0% de fibras de aço	4	-9,2798	0,0008	2,7764	Sim
1,0% de macrofibra polimérica	4	-3,9555	0,0167	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

APÊNDICE R – TESTES ESTATÍSTICOS PARA A RESISTÊNCIA RESIDUAL NO ELS DO CONCRETO (TENACIDADE EM PRISMAS)

A Tabela A131 contém os resultados individuais, as medidas estatísticas e os resultados do critério de *Chauvenet* para a resistência residual no ELS (tenacidade em prismas) de cada concreto analisado, comprovando a homogeneidade dos dados. Como foram realizadas três medidas desta propriedade em cada concreto, o valor limite da variação dos dados em relação ao desvio padrão deve ser de 1,38 para que o resultado seja considerado não duvidoso de acordo com o critério de *Chauvenet*.

Tabela A131 – Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a resistência residual no ELS do concreto (tenacidade em prismas)

	<i>Amostra</i>	<i>Valor (MPa)</i>	<i>Média</i>	<i>DP</i>	<i>Variância</i>	<i>CV (%)</i>	<i>Critério de Chauvenet</i>	<i>Homogeneidade ?</i>
CC5FA	1	3,37	3,92	0,585	0,343	14,93	0,94	Sim
	2	4,54					1,05	Sim
	3	3,86					0,11	Sim
CC10FA	1	6,35	5,97	0,494	0,244	8,26	0,76	Sim
	2	6,16					0,38	Sim
	3	5,41					1,13	Sim
CC5PP	1	2,79	2,66	0,227	0,052	8,54	0,56	Sim
	2	2,40					1,15	Sim
	3	2,80					0,59	Sim
CC10PP	1	2,70	2,59	0,438	0,192	16,87	0,25	Sim
	2	2,97					0,85	Sim
	3	2,11					1,10	Sim
CAR10FA	1	8,13	8,91	0,703	0,495	7,89	1,11	Sim
	2	9,49					0,82	Sim
	3	9,12					0,29	Sim
CAR20FA	1	11,97	12,06	0,180	0,032	1,49	0,51	Sim
	2	12,27					1,15	Sim
	3	11,95					0,64	Sim
CAR10PP	1	4,72	4,23	0,446	0,199	10,55	1,09	Sim
	2	4,13					0,22	Sim
	3	3,84					0,87	Sim
CAR20PP	1	5,34	4,91	0,482	0,232	9,82	0,90	Sim
	2	4,39					1,08	Sim
	3	4,99					0,18	Sim

Nota:

DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação, em %.

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Nas Tabelas A132 e A133 são apresentados os resultados da ANOVA para a resistência residual no ELS (tenacidade em prismas) de cada concreto. Já nas Tabelas A134 a A138 há os detalhes do teste t para a resistência residual no ELS (tenacidade em prismas) de cada concreto.

Tabela A132 – Análise de variância para a σ_{600}^D do concreto convencional

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma de quadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Quadrado médio</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Adição de fibras	22,471631	3	7,490543668	36,1066439	0,00005352	Sim
Erro	1,65964883	8	0,207456104			
Total	24,13127983	11				

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A133 – Análise de variância para a σ_{600}^D do concreto de alta resistência

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma de quadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Quadrado médio</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Adição de fibras	120,6199873	3	40,20666243	167,732401	0,00000015	Sim
Erro	1,917657517	8	0,23970719			
Total	122,5376448	11				

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A134 – Teste t para avaliar a influência do tipo de fibra na σ_{600}^D do concreto convencional

<i>Teor de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
0,5%	4	3,4735	0,0255	2,7764	Sim
1,0%	4	8,8721	0,0009	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A135 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na σ_{600}^D do concreto convencional (Comparação entre amostra com 0,5% de fibra e com 1,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-4,6432	0,0097	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	0,2357	0,8253	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A136 – Teste t para avaliar a influência do tipo de fibra na σ_{600}^D do concreto de alta resistência

<i>Teor de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
1,0%	4	9,7335	0,0006	2,7764	Sim
2,0%	4	24,0867	0,0001	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A137 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na σ_{600}^D do concreto de alta resistência (Comparação entre amostra com 1,0% de fibra e com 2,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-7,5077	0,0017	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-1,7816	0,1494	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A138 – Teste t para avaliar a influência do tipo de matriz na σ_{600}^D do concreto

<i>Adição de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
1,0% de fibras de aço	4	-5,9256	0,0041	2,7764	Sim
1,0% de macrofibra polimérica	4	-4,5374	0,0105	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

**APÊNDICE S – TESTES ESTATÍSTICOS PARA A RESISTÊNCIA RESIDUAL NO
ELU DO CONCRETO (TENACIDADE EM PRISMAS)**

A Tabela A139 contém os resultados individuais, as medidas estatísticas e os resultados do critério de *Chauvenet* para a resistência residual no ELU (tenacidade em prismas) de cada concreto analisado, comprovando a homogeneidade dos dados. Como foram realizadas três medidas desta propriedade em cada concreto, o valor limite da variação dos dados em relação ao desvio padrão deve ser de 1,38 para que o resultado seja considerado não duvidoso de acordo com o critério de *Chauvenet*.

Tabela A139 – Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a resistência residual no ELU do concreto (tenacidade em prismas)

	<i>Amostra</i>	<i>Valor (MPa)</i>	<i>Média</i>	<i>DP</i>	<i>Variância</i>	<i>CV (%)</i>	<i>Critério de Chauvenet</i>	<i>Homogeneidade ?</i>
CC5FA	1	2,58	2,50	0,175	0,031	7,02	0,49	Sim
	2	2,61					0,66	Sim
	3	2,30					1,15	Sim
CC10FA	1	3,61	3,64	0,407	0,165	11,17	0,07	Sim
	2	4,06					1,03	Sim
	3	3,25					0,97	Sim
CC5PP	1	3,35	3,00	0,329	0,108	10,97	1,06	Sim
	2	2,69					0,93	Sim
	3	2,95					0,13	Sim
CC10PP	1	2,92	2,82	0,329	0,109	11,70	0,31	Sim
	2	3,08					0,81	Sim
	3	2,45					1,12	Sim
CAR10FA	1	5,39	5,14	0,220	0,049	4,29	1,15	Sim
	2	5,01					0,56	Sim
	3	5,01					0,59	Sim
CAR20FA	1	7,15	7,69	0,840	0,706	10,93	0,63	Sim
	2	8,66					1,15	Sim
	3	7,25					0,52	Sim
CAR10PP	1	5,66	4,83	1,026	1,054	21,23	0,81	Sim
	2	5,15					0,31	Sim
	3	3,69					1,12	Sim
CAR20PP	1	7,54	6,46	1,119	1,251	17,31	0,97	Sim
	2	5,31					1,03	Sim
	3	6,53					0,06	Sim

Nota:

DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação, em %.

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Nas Tabelas A140 e A141 são apresentados os resultados da ANOVA para a resistência residual no ELU (tenacidade em prismas) de cada concreto. Já nas Tabelas A142 a A146 há os detalhes do teste t para a resistência residual no ELU (tenacidade em prismas) de cada concreto.

Tabela A140 – Análise de variância para a σ_{150}^D do concreto convencional

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma de quadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Quadrado médio</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Adição de fibras	2,089098778	3	0,696366259	6,75219253	0,013900325	Sim
Erro	0,825054981	8	0,103131873			
Total	2,914153759	11				

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A141 – Análise de variância para a σ_{150}^D do concreto de alta resistência

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma de quadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Quadrado médio</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Adição de fibras	15,48709332	3	5,162364439	6,74928950	0,013916843	Sim
Erro	6,119001932	8	0,764875241			
Total	21,60609525	11				

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A142 – Teste t para avaliar a influência do tipo de fibra na σ_{150}^D do concreto convencional

<i>Teor de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
0,5%	4	-2,3277	0,0805	2,7764	Não
1,0%	4	2,7276	0,0526	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A143 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na σ_{150}^D do concreto convencional (Comparação entre amostra com 0,5% de fibra e com 1,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-4,4740	0,0110	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	0,6739	0,5373	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A144 – Teste t para avaliar a influência do tipo de fibra na σ_{150}^D do concreto de alta resistência

<i>Teor de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
1,0%	4	0,4968	0,6454	2,7764	Não
2,0%	4	1,5165	0,2040	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A145 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na σ_{150}^D do concreto de alta resistência (Comparação entre amostra com 1,0% de fibra e com 2,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-5,0879	0,0070	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-1,8570	0,1369	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A146 – Teste t para avaliar a influência do tipo de matriz na σ_{150}^D do concreto

<i>Adição de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
1,0% de fibras de aço	4	-5,6018	0,0050	2,7764	Sim
1,0% de macrofibra polimérica	4	-3,2431	0,0316	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

APÊNDICE T – TESTES ESTATÍSTICOS PARA A CARGA MÁXIMA DO CONCRETO (TENACIDADE EM PLACAS)

A Tabela A147 contém os resultados individuais, as medidas estatísticas e os resultados do critério de *Chauvenet* para a carga máxima (tenacidade em placas) de cada concreto analisado, comprovando a homogeneidade dos dados. Como foram realizadas três medidas desta propriedade em cada concreto, o valor limite da variação dos dados em relação ao desvio padrão deve ser de 1,38 para que o resultado seja considerado não duvidoso de acordo com o critério de *Chauvenet*.

Tabela A147 – Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a carga máxima do concreto (tenacidade em placas)

	<i>Amostra</i>	<i>Valor (kN)</i>	<i>Média</i>	<i>DP</i>	<i>Variância</i>	<i>CV (%)</i>	<i>Critério de Chauvenet</i>	<i>Homogeneidade?</i>
CCR	1	32,58					1,15	Sim
	2	54,02	46,32	11,924	142,192	25,75	0,65	Sim
	3	52,34					0,51	Sim
CC5FA	1	80,73					0,51	Sim
	2	89,12	83,30	5,056	25,560	6,07	1,15	Sim
	3	80,04					0,64	Sim
CC10FA	1	101,79					0,27	Sim
	2	100,57	102,37	2,158	4,658	2,11	0,84	Sim
	3	104,76					1,11	Sim
CC5PP	1	48,68					1,08	Sim
	2	56,62	55,47	6,298	39,659	11,35	0,18	Sim
	3	61,12					0,90	Sim
CC10PP	1	60,81					0,83	Sim
	2	65,77	68,27	8,962	80,325	13,13	0,28	Sim
	3	78,21					1,11	Sim
CARR	1	75,69					1,07	Sim
	2	89,58	83,17	7,005	49,068	8,42	0,91	Sim
	3	84,24					0,15	Sim
CAR10FA	1	156,12					0,79	Sim
	2	165,04	171,66	19,698	388,005	11,48	0,34	Sim
	3	193,81					1,12	Sim
CAR20FA	1	240,20					0,11	Sim
	2	225,25	242,29	18,174	330,293	7,50	0,94	Sim
	3	261,42					1,05	Sim

(continua)

Tabela A147 – Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a carga máxima do concreto (tenacidade em placas)
(conclusão)

	<i>Amostra</i>	<i>Valor (kN)</i>	<i>Média</i>	<i>DP</i>	<i>Variância</i>	<i>CV (%)</i>	<i>Critério de Chauvenet</i>	<i>Homogeneidade?</i>
CAR10PP	1	114,91	107,23	10,472	109,668	9,77	0,73	Sim
	2	111,48					0,41	Sim
	3	95,30					1,14	Sim
CAR20PP	1	141,62	125,24	16,444	270,401	13,13	1,00	Sim
	2	108,73					1,00	Sim
	3	125,37					0,01	Sim

Nota:

DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação, em %.

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Nas Tabelas A148 e A149 são apresentados os resultados da ANOVA para a carga máxima (tenacidade em placas) de cada concreto. Já nas Tabelas A150 a A158 há os detalhes do teste t para a carga máxima (tenacidade em placas) de cada concreto.

Tabela A148 – Análise de variância para a carga máxima do concreto convencional

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma de quadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Quadrado médio</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Adição de fibras	5979,951874	4	1494,987968	25,564580	0,0000312	Sim
Erro	584,788784	10	58,4788784			
Total	6564,740658	14				

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A149 – Análise de variância para a carga máxima do concreto de alta resistência

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma de quadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Quadrado médio</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Adição de fibras	47433,60412	4	11858,40103	51,67355	0,00000121	Sim
Erro	2294,868671	10	229,4868671			
Total	49728,47279	14				

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A150 – Teste t para avaliar a influência do tipo de fibra na carga máxima do concreto convencional

<i>Teor de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
0,5%	4	5,9678	0,0040	2,7764	Sim
1,0%	4	6,4083	0,0030	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A151 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na carga máxima do concreto convencional (Comparação entre amostra sem fibra e com 0,5% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-4,9455	0,0078	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-1,1760	0,3048	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A152 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na carga máxima do concreto convencional (Comparação entre amostra com 0,5% de fibra e com 1,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-6,0106	0,0039	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-2,0230	0,1131	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A153 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na carga máxima do concreto convencional (Comparação entre amostra sem fibra e com 1,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-8,0123	0,0013	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-2,5487	0,0634	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A154 – Teste t para avaliar a influência do tipo de fibra na carga máxima do concreto de alta resistência.

<i>Teor de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
1,0%	4	5,0020	0,0075	2,7764	Sim
2,0%	4	8,2719	0,0012	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A155 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na carga máxima do concreto de alta resistência (Comparação entre amostra sem fibra e com 1,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-7,3309	0,0018	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-3,3078	0,0297	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A156 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na carga máxima do concreto de alta resistência (Comparação entre amostra com 1,0% de fibra e com 2,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-4,5647	0,0103	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-1,5998	0,1849	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A157 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na carga máxima do concreto de alta resistência (Comparação entre amostra sem fibra e com 2,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-14,1499	0,0001	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-4,0766	0,0151	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A158 – Teste t para avaliar a influência do tipo de matriz na carga máxima do concreto

<i>Adição de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Sem fibras	4	-4,6157	0,0099	2,7764	Sim
1,0% de fibras de aço	4	-6,0559	0,0038	2,7764	Sim
1,0% de macrofibra polimérica	4	-4,8964	0,0081	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

APÊNDICE U – TESTES ESTATÍSTICOS PARA A TENACIDADE DO CONCRETO (TENACIDADE EM PLACAS)

A Tabela A159 contém os resultados individuais, as medidas estatísticas e os resultados do critério de *Chauvenet* para a tenacidade (tenacidade em placas) de cada concreto analisado, comprovando a homogeneidade dos dados. Como foram realizadas três medidas desta propriedade em cada concreto, o valor limite da variação dos dados em relação ao desvio padrão deve ser de 1,38 para que o resultado seja considerado não duvidoso de acordo com o critério de *Chauvenet*.

Tabela A159 – Medidas estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a tenacidade do concreto (tenacidade em placas)

	<i>Amostra</i>	<i>Valor (J)</i>	<i>Média</i>	<i>DP</i>	<i>Variância</i>	<i>CV (%)</i>	<i>Critério de Chauvenet</i>	<i>Homogeneidade ?</i>
CC5FA	1	1198,32	1176,26	63,229	3997,948	5,38	0,35	Sim
	2	1225,51					0,78	Sim
	3	1104,96					1,13	Sim
CC10FA	1	1633,49	1679,83	43,490	1891,380	2,59	1,07	Sim
	2	1686,23					0,15	Sim
	3	1719,76					0,92	Sim
CC5PP	1	657,81	907,63	216,820	47010,95	23,89	1,15	Sim
	2	1018,37					0,51	Sim
	3	1046,72					0,64	Sim
CC10PP	1	1104,00	1277,61	239,211	57221,79	18,72	0,73	Sim
	2	1178,36					0,41	Sim
	3	1550,47					1,14	Sim
CAR10FA	1	2594,16	2481,19	246,902	60960,59	9,95	0,46	Sim
	2	2198,01					1,15	Sim
	3	2651,39					0,69	Sim
CAR20FA	1	3636,68	3864,71	405,626	164532,7	10,50	0,56	Sim
	2	3624,41					0,59	Sim
	3	4333,03					1,15	Sim
CAR10PP	1	2177,43	1795,41	394,579	155692,6	21,98	0,97	Sim
	2	1819,44					0,06	Sim
	3	1389,37					1,03	Sim
CAR20PP	1	2479,69	2332,12	354,316	125539,8	15,19	0,42	Sim
	2	1927,87					1,14	Sim
	3	2588,80					0,72	Sim

Nota:

DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação, em %.

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Nas Tabelas A160 e A161 são apresentados os resultados da ANOVA para a carga máxima (tenacidade em placas) de cada concreto. Já nas Tabelas A162 a A166 há os detalhes do teste t para a carga máxima (tenacidade em placas) de cada concreto.

Tabela A160 – Análise de variância para a tenacidade do concreto convencional

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma de quadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Quadrado médio</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Adição de fibras	923218,1115	3	307739,3705	11,17812	0,003114722	Sim
Erro	220244,1371	8	27530,51713			
Total	1143462,249	11				

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A161 – Análise de variância para a tenacidade do concreto de alta resistência

<i>Fonte da variação</i>	<i>Soma de quadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Quadrado médio</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Adição de fibras	6994113,272	3	2331371,091	18,40342	0,000598552	Sim
Erro	1013451,359	8	126681,4199			
Total	8007564,631	11				

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A162 – Teste t para avaliar a influência do tipo de fibra na tenacidade do concreto convencional

<i>Teor de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
0,5%	4	2,0601	0,1084	2,7764	Não
1,0%	4	2,8654	0,0457	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A163 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na tenacidade do concreto convencional (Comparação entre amostra com 0,5% de fibra e com 1,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-11,3653	0,0003	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-1,9849	0,1181	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A164 – Teste t para avaliar a influência do tipo de fibra na tenacidade do concreto de alta resistência

<i>Teor de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
1,0%	4	2,5519	0,0632	2,7764	Não
2,0%	4	4,9287	0,0079	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A165 – Teste t para avaliar a influência do teor de fibra na tenacidade do concreto de alta resistência (Comparação entre amostra com 1,0% de fibra e com 2,0% de fibra)

<i>Tipo de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
Fibra de aço	4	-5,0464	0,0072	2,7764	Sim
Macrofibra polimérica	4	-1,7529	0,1545	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A166 – Teste t para avaliar a influência do tipo de matriz na tenacidade do concreto

<i>Adição de fibras</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
1,0% de fibras de aço	4	-5,5364	0,0052	2,7764	Sim
1,0% de macrofibra polimérica	4	-1,9437	0,1239	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

APÊNDICE V – TESTES T PARA EQUIVALÊNCIA DE DESEMPENHO DAS FIBRAS QUANTO À TENACIDADE

Nas Tabela A167 a A169 são apresentados os resultados do teste t para a equivalência de desempenho quanto à tenacidade entre o concreto com menor teor de fibra de aço e o concreto com maior teor de macrofibra polimérica nos ensaios Barcelona, de tenacidade em prismas e de tenacidade em placas, respectivamente.

Tabela A167 – Teste t para avaliar a equivalência de desempenho das fibras quanto à tenacidade do ensaio Barcelona

<i>Tipos de concreto</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
CC5FA e CC10PP	4	0,7158	0,5134	2,7764	Não
CAR10FA e CAR20PP	4	0,3436	0,7484	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A168 – Teste t para avaliar a equivalência de desempenho das fibras quanto à tenacidade do ensaio de tenacidade em prismas

<i>Tipos de concreto</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
CC5FA e CC10PP	4	1,7202	0,1605	2,7764	Não
CAR10FA e CAR20PP	4	3,9157	0,0173	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A169 – Teste t para avaliar a equivalência de desempenho das fibras quanto à tenacidade do ensaio de tenacidade em placas

<i>Tipos de concreto</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
CC5FA e CC10PP	4	-0,7095	0,5172	2,7764	Não
CAR10FA e CAR20PP	4	0,5979	0,5821	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

APÊNDICE X – TESTES T PARA EQUIVALÊNCIA DE DESEMPENHO DAS FIBRAS QUANTO À RESISTÊNCIA RESIDUAL NO ELS

Nas Tabelas A170 e A171 são apresentados os resultados do teste t para a equivalência de desempenho quanto à resistência residual no ELS entre o concreto com menor teor de fibra de aço e o concreto com maior teor de macrofibra polimérica nos ensaios Barcelona e de tenacidade em prismas, respectivamente.

Tabela A170 – Teste t para avaliar a equivalência de desempenho das fibras quanto à resistência residual no ELS do ensaio Barcelona

<i>Tipos de concreto</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
CC5FA e CC10PP	4	1,3812	0,2394	2,7764	Não
CAR10FA e CAR20PP	4	2,6693	0,0558	2,7764	Não

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela A171 – Teste t para avaliar a equivalência de desempenho das fibras quanto à resistência residual no ELS do ensaio de tenacidade em prismas

<i>Tipos de concreto</i>	<i>GL</i>	<i>t</i>	<i>P(T<=t) bi-caudal</i>	<i>t crítico</i>	<i>Diferença significativa?</i>
CC5FA e CC10PP	4	3,1433	0,0347	2,7764	Sim
CAR10FA e CAR20PP	4	8,1383	0,0012	2,7764	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).