



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA

COORDENAÇÃO DO CURSO SUPERIOR DE
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL



HEBERTON LINHARES DAMACENO

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE FIBRA DE POLIOLEFINA NO
COMPORTAMENTO FÍSICO E MECÂNICO DO CONCRETO**

Cajazeiras
2019

HEBERTON LINHARES DAMACENO

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE FIBRA DE POLIOLEFINA
NO COMPORTAMENTO FÍSICO E MECÂNICO DO CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba-*Campus* Cajazeiras, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Esp. Daniel Torres Filho.

Cajazeiras
2019

IFPB
Campus Cajazeiras
Coordenação de Biblioteca
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva
Catálogo na fonte: Daniel Andrade CRB-15/593

D154e

Damaceno, Heberton Linhares

Estudo da influência do teor de fibra de poliolefina no comportamento físico e mecânico do concreto / Heberton Linhares Damaceno; orientador Daniel Torres Filho.-

71 f.: il.

Orientador: Daniel Torres Filho.

TCC (Bacharelado em Eng. Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2019.

1. Concreto 2. Microfibras sintéticas 3. Fibras de poliolefina I. Título

CDU 691.3(0.067)

HEBERTON LINHARES DAMACENO

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE FIBRA DE POLIOLEFINA NO
COMPORTAMENTO FÍSICO E MECÂNICO DO CONCRETO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba,
como parte dos requisitos para a obtenção do
Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 17 de abril de 2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Esp. Daniel Torres Filho
IFPB – *Campus* Cajazeiras
Orientador

Prof. Esp. José Lucas Pessoa de Oliveira
IFPB – *Campus* Cajazeiras
Examinador Interno

Prof. Me. Sebastião Simão da Silva
IFPB – *Campus* Cajazeiras
Examinador Interno

Cajazeiras,
2019.

Aos primeiros e melhores professores que Deus me deu: minha mãe, Edineuza, e meu pai, Lairton (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à Deus pelo dom da vida.

À minha mãe, Edineuza, e meus irmãos, Higor e Hiago, por serem as bases que me mantem firme na realização dos meus objetivos e por estarem ao meu lado desde sempre.

Aos meus familiares, que sempre me ajudaram, motivaram e me deram condições de crescer profissionalmente e pessoalmente.

À Alice, pelo carinho, companheirismo, paciência, conselhos e sonhos compartilhados.

Aos amigos e colegas de curso que, mesmo sem saber, me instigavam a tentar ser um aluno cada vez melhor, em especial, aos fiéis companheiros do grupo de estudos Comeketo: Lucas, Neto, Mayza, Luíza e Jorge, em especial, que contribuiu diretamente com execução dos ensaios e preparo dos concretos.

Aos professores nos quais me espelho e que foram imprescindíveis para minha formação acadêmica e profissional.

À Gastão, Mel, Ana Paula, Leonardo e Kelcylane, pela atenção e ajuda durante todas as atividades realizadas nos Laboratórios de Geotecnia e de Materiais e Técnicas Construtivas do IFPB – Cajazeiras.

Ao professor Daniel Torres, pela orientação, comprometimento e por todo o auxílio durante a execução desse trabalho, pelas excelentes aulas e toda a experiência profissional compartilhada e, principalmente, por despertar ainda mais meu interesse nos estudos de Concreto e Estruturas.

Aos professores Lucas e Sebastião pelas contribuições ao trabalho apresentado.

Ao IFPB – *Campus* Cajazeiras, pelas condições e estruturas disponibilizadas ao desenvolvimento dessa e de tantas outras pesquisas.

RESUMO

O concreto é um dos materiais com fins estruturais mais empregados na construção civil em todo o mundo, entretanto, algumas de suas características - como a baixa resistência à tração, a baixa capacidade de deformação e a tendência à fissuração - estão entre as principais motivações dos estudos sobre materiais compósitos de matriz cimentícia, especificamente, de matriz de concreto. Entre esses compósitos estão os Concretos Reforçados com Fibras (CRF), que têm apresentado resultados satisfatórios em relação ao aumento da capacidade resistente pós-fissuração e melhora no desempenho do concreto mediante esforços de tração. Nesse contexto, este trabalho apresenta uma análise comparativa entre propriedades do Concreto Simples e do Concreto Reforçado com Fibra de Poliolefina (CRFP) com adição de diferentes porcentagens, por meio da avaliação da consistência, da resistência à compressão axial, da resistência à tração na flexão e da determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Os resultados apontam que o aumento do teor da fibra de poliolefina reduz expressivamente a consistência do concreto. Entretanto, no intervalo estudado, o teor não apresentou relações bem definidas com a resistência à tração na flexão, tampouco com a resistência à compressão axial. A massa específica diminuiu com o acréscimo de fibras, mas sua variação máxima não chegou aos 2%. A taxa de absorção de água e o índice de vazios apresentaram um comportamento crescente, porém, não linear, com o aumento da concentração da fibra.

Palavras-Chave: Concreto Reforçado com Fibras; Macrofibras Sintéticas; Fibras de Poliolefina; Teor de Fibras.

ABSTRACT

Concrete is one of the most commonly used structural materials in civil construction worldwide however some of its characteristics - such as low tensile strength, low deformation capacity and cracking tendency - are among the main motivations of studies on cement matrix composite materials, specifically, the concrete matrix. Among these composites are Fiber Reinforced Concrete (FRC), which have presented satisfactory results in relation to the increase of the resistant capacity after cracking and improvement in the performance of the concrete by tensile stresses. In this context, this work presents a comparative analysis of the Simple Concrete and Polyolefin Fiber Reinforced Concrete (PFRC) properties with addition of different fibers contents, through the evaluation of the consistency, the axial compressive strength, the flexural tensile strength and the determination of water absorption, void index and specific mass. The results indicate that the increase of the content of the polyolefin fiber significantly reduces the consistency of the concrete. However, in the interval studied, the content did not present well defined relations with the tensile strength in the flexion, nor with the resistance to axial compression. The specific mass decreased with the addition of fibers, but its maximum variation did not reach 2%. The water absorption rate and the voids index showed an increasing but non-linear behavior with the increase in fiber concentration.

Keywords: Reinforced Concrete with Fibers; Synthetic Macrofibers; Polyolefin Fibers; Fiber Content.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fibras de aço (a), carbono (b), polipropileno (c) e vidro (d).	17
Figura 2 - Distribuição do mercado brasileiro de fibras de aço por tipo de aplicação no ano de 2009 e no primeiro semestre de 2010.	17
Figura 3 - Distribuição do mercado brasileiro de macrofibras poliméricas por tipo de aplicação que se manteve constante no ano de 2009 e no primeiro semestre de 2010.	18
Figura 4 - Esquema de distribuição de tensões para um concreto simples e concreto reforçado com fibras.	20
Figura 5 - Compósitos reforçados com fibras em teores abaixo (a), acima (b) e igual (c) ao volume crítico de fibras durante o ensaio de tração na flexão.....	21
Figura 6 - Comportamentos básicos do CRF segundo a concepção do fib Model Code.	22
Figura 7 - Exemplo de microfibras de polipropileno.	23
Figura 8 – Exemplos de macrofibras poliméricas disponíveis no mercado brasileiro.	24
Figura 9 - Fibra de Poliolefina.....	28
Figura 10 - Resumo das características dos materiais.	29
Figura 11 - Gráfico para determinação da relação a/c.....	30
Figura 12 – Balança para determinação da umidade infravermelho.	35
Figura 13 - Mistura mecanizada de concreto em betoneira.....	36
Figura 14 - Corpos de prova F0.....	37
Figura 15 - Adensamento mecânico.	37
Figura 16 - Tanque de Cura.....	38
Figura 17 - Preparo da base de corpo de prova por retificação.	38
Figura 18 - Corpo de prova F2 pós rasamento.	39
Figura 19 - Corpo de prova F2 após retificação.	39
Figura 20 - Medição das dimensões de corpo de prova cilíndrico com paquímetro.	39
Figura 21 - Medição das dimensões de corpo de prova prismático com régua.....	39
Figura 22 - Execução do slump test.....	40
Figura 23 - Ensaio de slump test.....	41
Figura 24 - Prensa hidráulica.....	41
Figura 25 - Dispositivo de Flexão Adaptado.....	42
Figura 26 - Perspectiva do dispositivo de flexão recomendado.	43
Figura 27 – Retirada dos corpos de prova secos em estufa.	44

Figura 28 - Corpos de prova imersos em água em ebulição.....	44
Figura 29 - Balança hidrostática adaptada.....	45
Figura 30 - Falha em ensaio de compressão diametral.....	45
Figura 31 - Teor de fibra de poliolefina e Abatimento.....	46
Figura 32 - Aspecto dos CRFP produzidos.	47
Figura 33 - Teor de fibra de poliolefina e resistência média à compressão.	48
Figura 34 - Variação percentual da resistência média à compressão em relação ao concreto sem fibras.....	48
Figura 35 - Teor de fibra de poliolefina e resistência média à tração na flexão.....	49
Figura 36 - Fratura de corpo de prova prismático (F05) em ensaio de tração na flexão.	50
Figura 37 - Variação percentual da resistência à tração na flexão em relação ao concreto sem fibras.	51
Figura 38 - Teor de fibra de poliolefina e Absorção, Índice de vazios e Massa específica real.	52
Figura 39 - Variação percentual da absorção de água (A), índice de vazios (IV) e massa específica real (ME) em relação ao concreto sem fibras.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades típicas de fibras sintéticas.....	25
Tabela 2 - Dados das fibras de poliolefina.	27
Tabela 3 - Desvio padrão a ser adotado em função da condição de preparo do concreto.	30
Tabela 4 - Quantidade de água de amassamento do concreto em função do abatimento e da dimensão máxima característica do agregado.	31
Tabela 5 - Volume compactado seco de agregado graúdo, em metro cúbico por metro cúbico de concreto.....	32
Tabela 6 - Traço unitário teórico.	33
Tabela 7 - Traço unitário definitivo.....	33
Tabela 8 – Consumos de Fibra	35
Tabela 9 – Resumo de traços.....	36

LISTA DE ABREVIATURAS

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI - *American Concrete Institute*

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

CAARF – Concreto Autoadensável Reforçado com Fibras

CRF - Concreto Reforçado com Fibras

CRFA - Concreto Reforçado com Fibras de Aço

CRFP - Concreto Reforçado com Fibras de Poliolefina

CRFS - Concreto Reforçado com Fibras Sintéticas

EN - *Europäische Norm*

fib - *Fédération Internationale du Béton*

JSCE - *Japan Society of Civil Engineers*

SUMÁRIO

RESUMO.....	3
ABSTRACT	4
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	5
LISTA DE TABELAS.....	7
LISTA DE ABREVIATURAS.....	8
SUMÁRIO.....	9
1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS.....	12
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	12
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	14
2.1 CONCRETO SIMPLES DE CIMENTO PORTLAND	14
2.2 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS	16
2.3 PROPRIEDADES DOS CRF.....	19
2.4 MACROFIBRAS POLIMÉRICAS.....	23
3 METODOLOGIA.....	26
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	26
3.2 DOSAGEM DO CONCRETO	29
3.3 DOSAGEM DE FIBRA DE POLIOLEFINA	34
3.4 PREPARO DO CONCRETO.....	35
3.5 PROCEDIMENTOS DE MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	36
3.6 ENSAIOS	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1 CONSISTÊNCIA	46
4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	47

4.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	49
4.4 ABSORÇÃO, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA	51
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	54
6 REFERÊNCIAS	55
APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADO MIÚDO	59
APÊNDICE B – CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADO GRAÚDO	61
APÊNDICE C – RELATÓRIO DE ENSAIO DE ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE.....	64
APÊNDICE D – RELATÓRIO DE ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL AOS 14 DIAS	65
APÊNDICE E – RELATÓRIO DE ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL AOS 28 DIAS	66
APÊNDICE F – RELATÓRIO DE ENSAIO DE FLEXÃO EM CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS	67
APÊNDICE G – RELATÓRIO DE ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DE ABSORÇÃO, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA DE CONCRETO ENDURECIDO	68

1 INTRODUÇÃO

As aplicações de reforços fibrosos em materiais de construção são milenares, porém estudos da utilização de fibras como reforço do concreto tem se intensificado na comunidade acadêmica desde a década de 1960 (HELENE; ANDRADE, 2010; FIGUEIREDO, 2011a; PEREIRA; SILVA, 2017) e demonstram resultados positivos se tratando principalmente do controle de fissuração do concreto no estado plástico e do acréscimo à resistência pós fissuração da matriz no estado endurecido. (MEHTA; MONTEIRO, 2014; FIGUEIREDO, 2011b)

A variedade de materiais, formas e tamanhos das fibras disponíveis na natureza e no mercado possibilitam uma vasta gama de investigações a respeito dos efeitos de sua utilização, isolada ou combinadas, sob diversas propriedades do concreto (MACIEL *et al*, 2015).

A consolidação do concreto reforçado com fibras como uma técnica construtiva madura ainda esbarra na dificuldade de transferir os conhecimentos acadêmicos para o mercado da construção e na insuficiência de normas, sobretudo, nacionais que forneçam segurança aos projetistas e especificadores de CRF (FIGUEIREDO, 2011b). Outra dificuldade se deve ao fato dos ensaios estrangeiros comumente aplicados aos CRF para adequada determinação de suas propriedades serem de grande complexidade e estarem quase sempre restritos aos laboratórios das grandes universidades (FIGUEIREDO, 2014).

Têm sido notáveis os recentes esforços da comunidade acadêmica em propor ensaios alternativos, acessíveis e confiáveis para o controle das propriedades e da qualidade dos CRF (MONTE; BARBOZA, 2017; PEREIRA, 2017; DIAS, 2018; MONTE *et al*, 2014; TOALDO *et al*, 2013), bem como a elaboração de práticas recomendadas e normas consensuais entre si no tocante à dosagem e dimensionamento de estruturas de CRF (FIGUEIREDO, 2014; FIGUEIREDO *et al*, 2008; *fib*, 2010).

Os estudos precursores na tecnologia dos CRF são direcionados, principalmente, aos Concretos Reforçados com Fibras de Aço (CRFA) e muito se deve às boas propriedades mecânicas desse material (FIGUEIREDO, 2000), mas também à confiabilidade que se tem devido seu processo de fabricação e sua associação ao já consagrado Concreto Armado. Todavia, isso não impede o advento de outros materiais fibrosos e, um bom exemplo são as fibras sintéticas, em especial, as macrofibras poliméricas que, apesar de possuírem propriedades mecânicas como módulo de elasticidade e resistência à tração inferiores às fibras

de aço, são igualmente populares no mercado, com a vantagem de preço, de maior resistência ao álcali e de não sofrer oxidação (CARNIO, 2017; SALVADOR, 2013; RODRIGUES; MONTARDO, 2002).

Nesse sentido, reconhecidas as potencialidades dos CRF, bem como a necessidade de novas contribuições ao estudo de aspectos fundamentais ao seu bom desempenho, este trabalho propõe e apresenta um breve estudo sobre a adição de fibras ao concreto simples, direcionando as análises apenas à influência do aumento do teor de macrofibras poliméricas de poliolefina sobre as principais propriedades do concreto na fase fresca e na fase endurecida, a partir de ensaios preconizados pelas normas brasileiras para concreto simples.

1.1 OBJETIVOS

Objetiva-se principalmente comparar as propriedades de um concreto simples com as propriedades de concretos de mesmo traço contendo, respectivamente, teores de 0,5%, 1% e 2% de fibras de poliolefina.

Em específico, objetivou-se analisar a consistência, a resistência à compressão axial, a resistência à tração na flexão, o teor de absorção de água, índice de vazios e a massa específica e, por fim, determinar a variação nas propriedades estudadas em função da variação dos teores de fibra.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esse texto está estruturado em cinco capítulos, sendo que o primeiro se refere à introdução e delimitação dos objetivos da pesquisa.

O segundo capítulo, referente à revisão bibliográfica, é dividido em quatro partes, onde inicialmente é feito um apanhado, em linhas gerais, das principais limitações do concreto que acabam por se tornar a motivação para a utilização de reforços que atenuem essas limitações; considerando as fibras como exemplo de reforço, na segunda parte, são elencados seus principais tipos, aplicações e normativas relacionadas ao dimensionamento e controle de qualidade dos concretos reforçados com fibras; na terceira parte, são abordadas suas propriedades, especificamente, as que mais se relacionam com o teor de fibras

empregado. Na quarta e última parte deste capítulo é feita uma breve introdução às características das fibras sintéticas (poliméricas).

A metodologia da pesquisa é detalhada no capítulo 3, delineando as etapas de caracterização dos materiais; o método de cálculo da dosagem do concreto, bem como a dosagem das fibras; os procedimentos para execução e moldagem dos concretos e; por fim, as metodologias dos ensaios empregados na análise.

O capítulo 4 é destinado à apresentação e discussão dos resultados obtidos e, por último, são feitas as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CONCRETO SIMPLES DE CIMENTO PORTLAND

Descoberto no final do século XIX e usado em larga escala no século XX, o concreto de cimento Portland é o segundo material mais consumido no mundo e o material com fins estruturais mais importante da construção civil (HELENE; ANDRADE, 2010). O concreto está presente nas mais diversas aplicações da engenharia e da arquitetura, desde elementos estruturais mais comuns como lajes, vigas, pilares e fundações, até muros, reservatórios, canais, pavimentos, estruturas de contenção, barragens e pontes (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Dentre os motivos para tamanha popularidade, estão a sua resistência às águas agressivas, que viabiliza diversas aplicações em ambientes industriais e naturais; a consistência plástica do concreto fresco que proporciona grande variedade de formas e tamanhos dos elementos deste; e o seu baixo custo de execução, associado à facilidade de acesso e acompanhamento de sua produção, seja em usinas ou nos próprios canteiros de obras, bem como a disponibilidade de materiais (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Apesar de todas as vantagens, o concreto também possui características que, ao menos em parte, limitam algumas de suas aplicações. As principais limitações são o seu comportamento frágil, a baixa capacidade de deformação mediante esforços de tração e a baixa resistência à tração, se comparada à sua resistência à compressão (FIGUEIREDO, 2011a).

Outra desvantagem das estruturas de concreto é justamente a tendência à fissuração desse material. As fissuras são temidas e indesejadas tanto do ponto de vista estético como em relação a durabilidade e manutenção da vida útil das estruturas, uma vez que são capazes de aumentar a deformação dos elementos estruturais e são porta de entrada de inúmeras patologias. Além disso, uma vez fissurado, o concreto reduz consideravelmente sua capacidade de resistir aos esforços de tração (FIGUEIREDO, 2011b).

O processo de fissuração é complexo e tem inúmeras causas como a deterioração, causas estruturais, ambientais e a retração. Como exemplos de causas de deterioração, Mehta e Monteiro (2014) dão ênfase à corrosão da armadura, à exposição aos ciclos de congelamento e degelo, à reação álcali-agregado e ao ataque por sulfatos. Há ainda as fissuras

estruturais decorrentes das deformações elásticas e plásticas devido os carregamentos aplicados às estruturas; e as que resultam das contrações térmicas.

Além das causas já mencionadas, destaca-se o fenômeno de retração, que consiste na diminuição do volume de concreto devido às alterações físico-químicas internas e à perda da água da pasta de cimento, sem que haja ação de forças externas (HELENE; ANDRADE, 2010).

A depender do estado no qual o concreto se encontra, fresco ou endurecido, a retração pode ocorrer de diferentes formas. No estado fresco ou plástico, antes do endurecimento, o concreto está sujeito à retração plástica que se dá das seguintes maneiras (WANG *et al.*, 2001):

- Retração por assentamento plástico: ocorre quando do lançamento do concreto, a exsudação e o assentamento são elevados e há restrições ao assentamento provocadas pela armadura;
- Retração Plástica Primária ou Retração por Exsudação: devido à evaporação da água superficial, quando esta taxa excede a taxa de exsudação;
- Retração Plástica Secundária: ocorre no início do endurecimento e tende a desaparecer à medida que o concreto passa a ganhar resistência.

Já no estado endurecido, o concreto pode sofrer retração das seguintes formas (HELENE; ANDRADE, 2010):

- Retração Hidráulica ou de Secagem: pela evaporação da água livre ou capilar, gerando tensões capilares nos poros do concreto;
- Retração Autógena (ou por hidratação do cimento ou retração química): devido à hidratação incompleta, quando o volume dos produtos hidratados é menor que a soma dos volumes de cimento anidro e água;
- Retração por Carbonatação do concreto.

De modo geral, a respeito das fissuras ocasionadas pela retração explica-se que:

Quando a deformação por retração em um material elástico se encontra totalmente restringida, o resultado é o aparecimento de uma tensão elástica de tração; a magnitude dessa tensão induzida σ é determinada pelo produto da deformação ε e o módulo de elasticidade E do material ($\sigma = E \cdot \varepsilon$) (MEHTA; MONTEIRO, 2014, p. 88).

Conseqüentemente, o material fissura justamente quando essa tensão supera a resistência à tração do concreto. Portanto, apesar de ser uma situação indesejada, é frequente o

surgimento de fissuras nas estruturas de concreto, tendo em vista sua baixa resistência à tração. Por outro lado, o que justifica a não ocorrência de fissuração no concreto é o fato de não se tratar de um material perfeitamente elástico e apresentar propriedades características de materiais viscoelásticos como a fluência e a relaxação da tensão - que é o fenômeno de redução da tensão sob deformações constantes - permitindo um alívio de tensões que, ao menos em parte, reduz a tensão de tração induzida (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.2 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS

Na intenção de mitigar ou eliminar as principais limitações do concreto, a utilização dos chamados materiais compósitos surge como uma excelente alternativa tecnológica. Os compósitos são materiais compostos por pelo menos duas fases: a matriz e o reforço (FIGUEIREDO, 2000). O compósito de matriz cimentícia mais conhecido e utilizado é o Concreto Armado, cuja resistência à tração e a resistência ao cisalhamento do concreto simples (matriz) são reforçadas por barras de aço (reforço) longitudinais e transversais, respectivamente.

Além do concreto armado, já consagrado na engenharia e no mercado da construção, outros materiais compósitos como o Concreto Reforçado com Fibras – CRF vêm sendo intensamente estudados, sobretudo no meio acadêmico, desde a década de 1960 (PEREIRA; SILVA, 2017).

O reforço com fibras descontínuas e aleatoriamente distribuídas na matriz tem como expectativa o controle da abertura e da propagação de fissuras no concreto, alterando o seu comportamento mecânico após a ruptura da matriz, melhorando consideravelmente a capacidade de absorção de energia do concreto e diminuindo o nível de fragilidade do material (CARNIO, 2017, p. 26).

As fibras para reforço de concreto apresentam diferentes formas e tamanhos e podem ser produzidas a partir de diversos materiais como aço, plástico, vidro, carbono e, inclusive, materiais naturais (Figura 1).

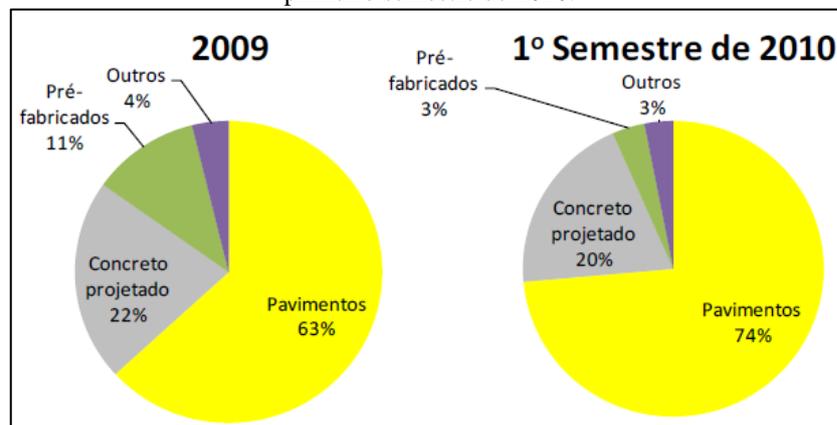
Figura 1 - Fibras de aço (a), carbono (b), polipropileno (c) e vidro (d).



Fonte: AZEVEDO, 2018.

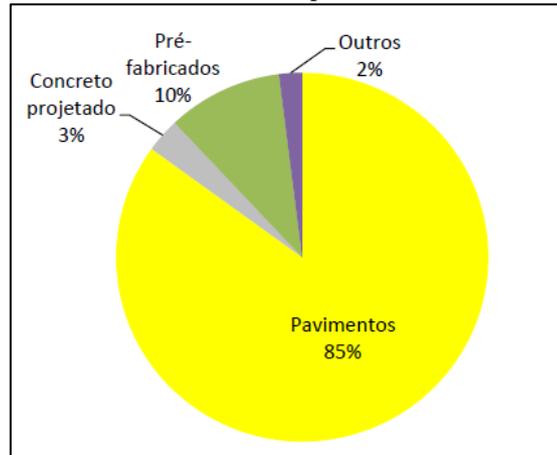
Dentre as fibras comercializadas, a fibra de aço é a mais utilizada (MEHTA e MONTEIRO, 2014) e, nacionalmente, tem como principais aplicações os pavimentos industriais, o concreto projetado e pré-moldados (Figura 2). Uma tendência semelhante ocorre com as macrofibras poliméricas (Figura 3).

Figura 2 - Distribuição do mercado brasileiro de fibras de aço por tipo de aplicação no ano de 2009 e no primeiro semestre de 2010.



Fonte: FIGUEIREDO, 2011b.

Figura 3 - Distribuição do mercado brasileiro de macrofibras poliméricas por tipo de aplicação que se manteve constante no ano de 2009 e no primeiro semestre de 2010.



Fonte: FIGUEIREDO, 2011b.

Percebe-se que seu emprego se limita basicamente a aplicações de baixa demanda estrutural, enquanto em outros países, o CRF já é usado em lajes suspensas sem necessidade de reforço adicional (FIGUEIREDO, 2014). No Brasil, tanto o uso do Concreto Reforçado com Fibras de Aço – CRFA, como dos demais CRF, ainda não se consolidaram como técnicas construtivas maduras devido à falta de embasamento técnico por parte de muitos especificadores e aplicadores brasileiros, além da insuficiência de referências normativas nacionais e a dificuldade de transferir os resultados das pesquisas acadêmicas para o meio produtivo (FIGUEIREDO, 2011b).

A elaboração da NBR 15530 (ABNT, 2007), intitulada “Fibras de aço para concreto – Especificação”, contribuiu para a classificação desse material a fim de proporcionar melhores desempenhos do CRFA por meio de um maior controle desse reforço fibroso. Entretanto, esta ainda é uma normalização restrita apenas às fibras de um único material, não acrescentando outros avanços aos demais CRF (FIGUEIREDO, 2011a; FIGUEIREDO *et al.*, 2008).

Em nível internacional, o surgimento do *fib* Model Code (*fib*, 2010) trouxe significativas contribuições para os métodos de dimensionamento de estruturas de CRF e, no Brasil, isso refletiu na elaboração das Práticas Recomendadas “Projeto de Estruturas de Concreto Reforçado com Fibras”, “Controle e Qualidade dos Concretos Reforçados com Fibras”, “Macrofibras Poliméricas para Concreto destinado a Aplicações Estruturais” e “Macrofibras de Vidro Álcali Resistentes (AR) para Concreto destinado a Aplicações Estruturais”, entre os anos de 2016 e 2017, pelo CT 303 – Comitê Técnico IBRACON/ABECE.

Há uma tendência internacional de busca de consenso e de embasamento técnico científico que potencializem o uso do CRF como material estrutural. Esta tendência está muito direcionada ao novo fib Model Code (2010) e irá permear as mais distintas aplicações do CRF seja qual for o tipo de fibra utilizado (FIGUEIREDO, 2014, p.17).

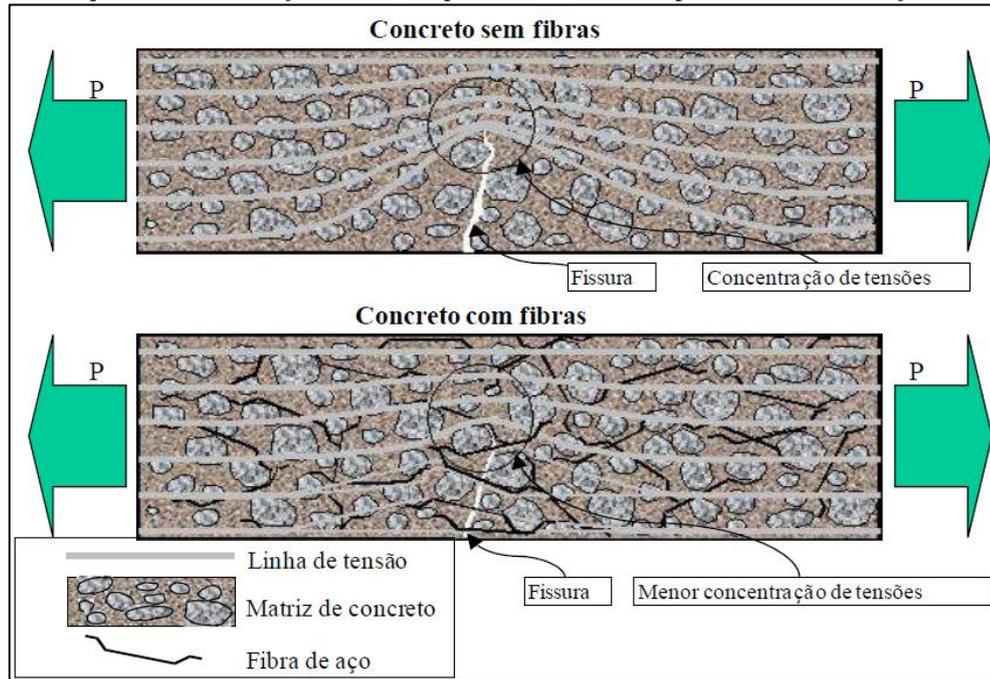
Ainda segundo esse autor, espera-se ver temas como a especificação do CRF nas normalizações da ABNT que se aproximem das metodologias do *fib* Model Code (*fib*, 2010), bem como a definição de ensaios confiáveis e mais simples para avaliação das resistências residuais nos estados limites de serviço (ELS) e último (ELU) e para o controle de qualidade dos CRF.

Essa preocupação não se deve apenas ao fato de inexistir normas nacionais destinadas ao dimensionamento e controle de qualidade dos CRF, mas também à complexidade dos ensaios internacionais destinados a esses fins que, em sua maioria, avaliam a tenacidade ou a resistência residual pós-fissuração através da tração por flexão de vigas, como os ensaios especificados pela JSCE-SF4 (1984), pela ASTM C1609 (2012), pela ASTM C1399 (2010) e pela EN 14651 (2007) (TOALDO *et al.*, 2013; SALVADOR; FIGUEIREDO, 2013) e outros mais simples e promissores como o Ensaio Barcelona Simplificado (PUJADAS, 2013).

2.3 PROPRIEDADES DOS CRF

De modo geral, quando fibras com propriedades adequadas são adicionadas ao concreto nas proporções ideais, o CRF apresenta um comportamento “pseudo-dúctil”, caracterizado por um aumento da capacidade resistente pós-fissuração. Isso ocorre porque as fibras atuam como uma costura nas fissuras, de modo a transferir as tensões de tração através das mesmas, reduzindo, assim, a concentração de tensões nas extremidades dessas fissuras e restringindo a propagação das mesmas (FIGUEIREDO, 2011a) (Figura 4).

Figura 4 - Esquema de distribuição de tensões para um concreto simples e concreto reforçado com fibras.



Fonte: FIGUEIREDO, 2011a.

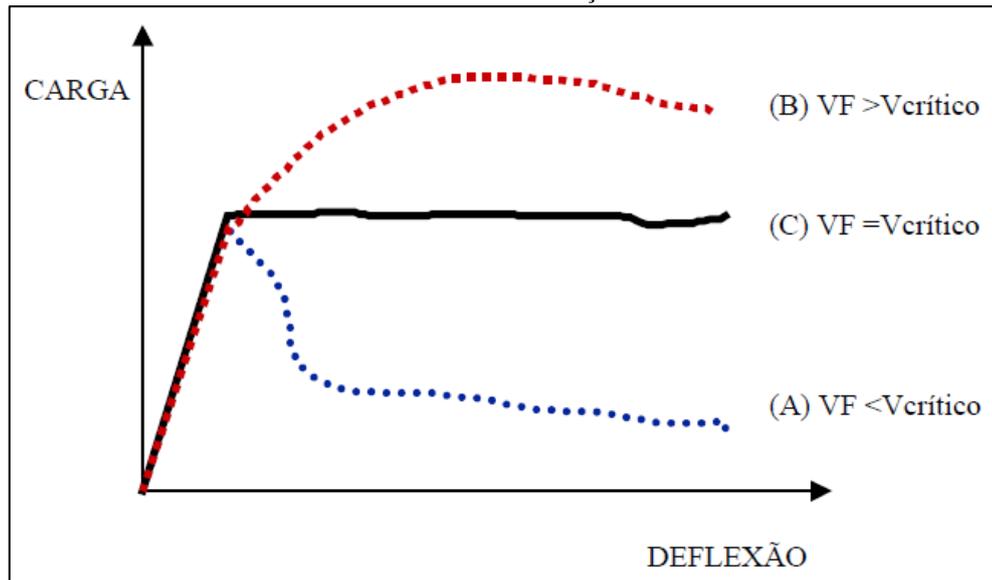
Conseqüentemente, o bom desempenho do CRF está intimamente ligado à eficiência do reforço em desempenhar essa função que, por sua vez, depende de alguns aspectos tecnológicos fundamentais como o teor, a geometria, a orientação e o módulo de elasticidade e resistência mecânica das fibras (FIGUEIREDO, 2011a).

A dosagem das proporções de fibras no concreto se mostra relevante economicamente, visto que, de acordo com Figueiredo (2011b), as mesmas podem custar até quinze vezes mais que o cimento. Ainda assim, as aplicações de CRF, no Brasil, se revelam um tanto quanto empíricas, pois comumente as fibras são adicionadas ao concreto em teores fixos, múltiplos de 5 kg/m³, sem maiores preocupações com a dosagem, tampouco com a otimização desse compósito (FIGUEIREDO, 2011b).

Do ponto de vista do desempenho do material, de acordo com Quinino (2015), a capacidade de reforço está diretamente ligada com o teor de fibra empregado, pois seu aumento permite uma maior transferência de tensões.

Figueiredo (2011b) aponta o teor de fibras como o principal parâmetro definidor do comportamento do compósito e, além disso, define o volume crítico como o correspondente “ao teor de fibras que mantém a mesma capacidade resistente para o compósito a partir da ruptura da matriz” (Figura 5).

Figura 5 - Compósitos reforçados com fibras em teores abaixo (a), acima (b) e igual (c) ao volume crítico de fibras durante o ensaio de tração na flexão.



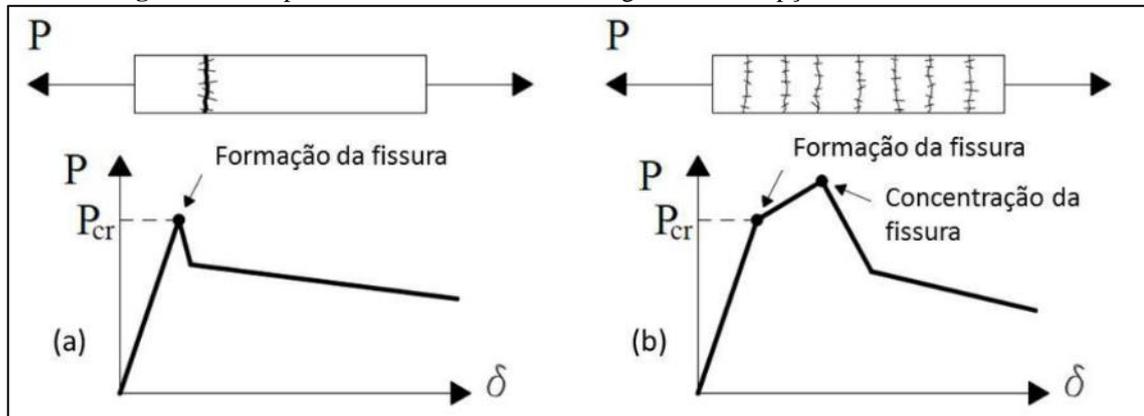
Fonte: FIGUEIREDO, 2000.

Esse valor pode ser deduzido no trabalho de Figueiredo (2000) a partir da modelagem proposta por Aveston, Cupper e Kelly (1971), que considera um compósito ideal, no qual as fibras são contínuas e alinhadas na direção do esforço principal. De imediato, percebe-se que esse modelo não é fiel à realidade, onde as fibras são descontínuas e aleatoriamente distribuídas. Entretanto, com as correções pertinentes, é possível alcançar valores de volumes críticos próximos aos experimentais.

Esse conceito é útil para o entendimento dos comportamentos básicos esperados nos CRF. Como proposto pela metodologia do *fib* Model Code, há dois tipos de comportamentos (*fib*, 2010; FIGUEIREDO, 2014; PEREIRA, 2017):

- *Strain-softening* (amolecimento): quando o concreto é reforçado com um teor de fibras inferior ao volume crítico. Esse comportamento é característico de um compósito cuja resistência pós-fissuração é menor que a resistência da matriz. Conseqüentemente, ocorre uma perda gradativa de sua capacidade resistente após a fissuração da matriz e, por esse motivo, só há o surgimento da primeira fissura que será ampliada à medida em que o deslocamento continua sendo imposto ao material (Figura 6-a).
- *Strain-hardening* (endurecimento): quando o concreto é reforçado com um teor de fibras superior ao volume crítico. O compósito resultante possui uma resistência residual maior que o da matriz, portanto, ocorre um crescente aumento da capacidade resistente após o início da fissuração da matriz. Devido esse aumento, ocorre a múltipla fissuração do material (Figura 6-b), ao contrário do primeiro caso.

Figura 6 - Comportamentos básicos do CRF segundo a concepção do fib Model Code.



Fonte: FIGUEIREDO, 2014.

Diversos estudos relacionam o aumento do teor de fibras com a perda de fluidez e trabalhabilidade dos CRF; com ganhos na resistência à compressão em concretos autoadensáveis (SHIMOSAKA, 2016; MIGLIORINI, 2011; ALFERES FILHO, 2016;) e simples reforçados com fibras de aço (CARVALHO, 2016; GASPAR *et al.*, 2016); ganhos na resistência à tração (SHIMOSAKA, 2016; CRISTOFOLI, 2018); acréscimos à tenacidade (CRISTOFOLI, 2018); aumento da capacidade de blindagem de placas ao impacto balístico com reforço de fibras de aço e de poliolefina (GASPAR *et al.*, 2016); e ganhos de resistência à compressão e à tração em concreto leve com agregados de argila expandida com adição de fibras de aço, carbono, polipropileno e vidro (AZEVEDO, 2018). Por outro lado, estudos como o de Cristofoli *et al* (2018) constataram queda na resistência à compressão de concretos autoadensáveis reforçados com fibras de aço, mas sem relação com o aumento do teor de fibras; e efeitos insignificantes na resistência à compressão de concretos com adições de fibra de polipropileno (CARVALHO, 2016).

Dessa forma, apesar do teor de fibras ser um aspecto bastante relevante no acréscimo da resistência pós fissuração do CRF, outras propriedades importantes na dosagem e controle da qualidade do concreto - como a trabalhabilidade e a resistência à compressão - podem ser alteradas a ponto de inviabilizarem a utilização das fibras como reforço e, por esse motivo, devem ser levadas em consideração nos estudos sobre concretos fibrosos.

2.4 MACROFIBRAS POLIMÉRICAS

Para Budinski (1996 *apud* Rodrigues; Montardo 2002), as combinações de polímeros e materiais cerâmicos constituem os compósitos mais importantes. O concreto e demais produtos de cimento Portland se enquadram nesse grupo devido suas características de alta rigidez, fragilidade, baixa resistência à tração e tendência à fissuração comuns aos materiais cerâmicos. Os polímeros se caracterizam por serem materiais versáteis, com baixo módulo de elasticidade, ductilidade variável e média resistência à tração.

O Concreto Reforçado com Fibras Sintéticas – CRFS – ou Poliméricas pode ter como principais materiais de reforço as fibras de plástico, como poliamida (náilon), polipropileno, polietileno, poliéster (PET) e, quanto a sua forma, podem ser classificadas como microfibras ou macrofibras.

As microfibras (Figura 7) possuem comprimentos entre 3 e 18 mm e diâmetros da ordem de 10 a 30 μm , são utilizadas para melhorar o controle de retração do concreto no estado fresco e não acrescentam resistência residual pós-fissuração à matriz. Por outro lado, as macrofibras sintéticas (Figura 8) tem diâmetros maiores que 0,30 mm e comprimentos que variam de 30 a 60 mm e são utilizadas para funcionar como um reforço nos mesmos moldes que as fibras de aço tradicionais, incorporando tenacidade após o endurecimento do concreto e controlando a abertura e propagação de fissuras (SALVADOR, 2013; CARNIO, 2017).

Figura 7 - Exemplo de microfibra de polipropileno.



Fonte: VASCONCELOS, 2012.

Figura 8 – Exemplos de macrofibras poliméricas disponíveis no mercado brasileiro.



Fonte: FIGUEIREDO, 2011b.

Como já mencionado, um dos aspectos fundamentais condicionantes ao bom desempenho dos CRF é o módulo de elasticidade do reforço fibroso, sendo interessante que as fibras possuam módulo de elasticidade superior à matriz de concreto para que proporcionem uma apropriada resistência residual ao compósito (SALVADOR, 2013). Pela análise da Tabela 1, percebe-se que essa condição não é atendida, em geral, pela maioria das fibras sintéticas mencionadas. Em contrapartida, estudo relatam que fibras de baixo módulo podem conferir aumentos de tenacidade, resistência ao impacto, controle de fissuração e capacidade de deformação a matrizes cimentícias (KIM; NAAMAN; EL-TAWIL, 2008; ZHENG; FELDMAN, 1995; ZOLLO, 1996 *apud* SALVADOR, 2013).

Tabela 1 - Propriedades típicas de fibras sintéticas.

Tipo de Fibra	Diâmetro (µm)	Massa Específica (g/cm ³)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (Gpa)	Deformação na Ruptura (%)
Polietileno	25 - 1000	0,92 - 0,96	80 - 600	2,0 – 10	3 - 100
Polipropileno	20 - 400	0,9 - 0,95	450 - 760	3,5 – 10	15 - 25
Nylon	23 - 400	1,14	750 - 1000	4,1 - 5,2	16 - 20
PVA	14 - 650	1,3	800 - 1500	29 – 36	5,7
PAN	20 - 350	1,16 - 1,18	200 - 1000	14 – 19	10 - 50
Aço*	100 - 1000	7,84	500 - 2600	210	0,5 - 3,5
Concreto*	-	1,5 - 2,5	3 - 7	10 - 45	0,02
Polioléfina*	-	0,96	650 - 750	4,80	-

*Valores para comparação.

Fonte: Adaptado de Bentur; Mindess, 2007 *apud* Salvador, 2013.

Apesar das fibras poliméricas - a exemplo das macrofibras de polietileno, polipropileno e poliolefina - apresentarem resistência à tração e módulo de elasticidade inferiores às fibras de aço, suas maiores vantagens são a maior durabilidade em meio alcalino e o fato de não sofrerem com a oxidação (CARNIO, 2017).

3 METODOLOGIA

Esta pesquisa trata-se de um trabalho experimental e nesse capítulo, serão abordadas detalhadamente as etapas que constituem a metodologia utilizada para sua execução.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Todos procedimentos referentes à caracterização dos agregados foram realizados no Laboratório de Geotecnia, enquanto a execução dos concretos e a realização dos ensaios ocorreu no Laboratório de Materiais e Técnicas Construtivas, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB) – *Campus Cajazeiras*, entre os meses de dezembro de 2018 e fevereiro de 2019.

Os ensaios para caracterização dos agregados foram realizados no intuito principal de fornecer os índices físicos necessários a dosagem do concreto utilizando o Método ABCP/ACI (RODRIGUES, 1990; BOGGIO, 2000; TUTIKIAN; HELENE, 2011; TORRES FILHO, 2016). Os dados dos ensaios de caracterização dos agregados encontram-se nos Apêndices A e B.

a) Areia

Foi determinada a composição granulométrica do agregado miúdo, a partir do ensaio de peneiramento, do qual se obteve o valor do módulo de finura, em conformidade com a NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Também foi verificada a massa específica da areia seca, através do método do frasco de Chapman, de acordo com a NBR NM 9776 (ABNT, 1987), que já se encontra em desuso e foi substituída pela NBR NM 52, de 2009, intitulada “Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente”.

Outra determinação realizada foi a do coeficiente de inchamento do agregado miúdo (em consenso com a NBR 6467 (ABNT, 2006)), entretanto, esse valor foi irrelevante, pois é usado para a correção do volume de areia de traços em volume e todos os concretos feitos foram dosados em massa.

b) Brita

A composição granulométrica do agregado graúdo foi determinada a partir do ensaio de peneiramento, do qual se obteve o valor da dimensão máxima característica (DMC), em conformidade com a NBR NM 248 (ABNT, 2003).

De acordo com a NBR NM 53 (ABNT, 2009), foram verificadas a massa específica do agregado seco, a massa específica do agregado saturado com superfície seca, a massa específica aparente e a absorção de água, sendo que apenas a primeira foi considerada para a dosagem.

Por fim, a partir das recomendações da NBR NM 45 (ABNT, 2006), verificou-se a massa específica unitária compactada do agregado graúdo e o índice de vazios, sendo que apenas o primeiro índice foi de relevância para a dosagem.

c) Cimento

Ao contrário dos agregados, o cimento não passou por caracterização, sendo utilizadas as informações fornecidas pelo próprio fabricante. Utilizou-se Cimento CP-II Z RS (resistente à sulfatos), da marca Mizu.

d) Fibra

Não foram realizados ensaios de caracterização da fibra, exceto sua contagem para uma dada massa. Foi utilizada uma fibra sintética, da marca Duristeel, produzida pela Mult Building (Figura 9), cujas propriedades físicas mais relevantes foram obtidas no catálogo do fabricante (Tabela 2).

Tabela 2 - Dados das fibras de poliolefina.

Item	Valor
Material	Blenda de poliolefina
Módulo de Elasticidade (GPa)	4,80
Peso Específico (g/cm ³)	0,96
Comprimento (mm)	40 – 60
Forma	Fibra frisada com pós arranjos
Cor	Cinza
Resistência à tração (MPa)	650 – 750
Fibras/quilogramas	22555
Dosagem Recomendada (kg / m ³ de concreto)	3 – 6

Fonte: Adaptado de MULT BUILDING, 2018.

Figura 9 - Fibra de Poliolefina

Fonte: Autor, 2019.

O termo “blenda de poliolefina” usado pelo fabricante para especificar o material da fibra em questão, a princípio, acaba por se tornar uma expressão genérica, pois as poliolefinas abrangem os polímeros cujo monômero é uma olefina (ou alqueno). Como exemplos mais conhecidos, cita-se o polietileno e o polipropileno, que são poliolefinas resultantes da polimerização do etileno e do propileno (ou propeno), respectivamente.

Uma blenda se constitui da mistura de dois ou mais polímeros diferentes para alcance de melhorias no custo/benefício de plásticos comerciais, seja pela obtenção de propriedades específicas para algum uso do material ou pela melhor processabilidade do produto (FERREIRA, 2016). Nesse caso, em específico, a fibra utilizada é resultado de adições de blendas ao polipropileno, a fim de evitar a flutuação (ou afloramento) das mesmas na matriz de concreto após o adensamento (MULT BUILDING, 2018).

Destaca-se ainda que estas fibras são certificadas pela Universidade de São Paulo para o ensaio preconizado pela JSCE-SF4 (1984), apresentando valores significativos em relação à resistência à tração na flexão para consumo de fibra entre 3 e 6 kg/m³ (MULT BUILDING, 2018), que em termos de porcentagem, correspondem à 0,35% e 0,71%, respectivamente.

e) Água

A água de amassamento dos concretos executados foi fornecida pela Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA), através das instalações prediais de água fria do IFPB – Campus Cajazeiras.

3.2 DOSAGEM DO CONCRETO

A dosagem foi feita a partir do Método ABCP/ACI, adotando-se nos cálculos as informações contidas na Figura 10.

Figura 10 - Resumo das características dos materiais.

Concreto Requerido	Cimento	Areia	Brita	Água	Fibra
$f_{ck} = 20 \text{ MPa}$	CP II - Z - 32 - RS	Módulo de Finura = 2,48	Dimensão Máxima Característica = 19 mm	Massa Específica = 1000 kg/m ³	Massa Específica = 960 kg/m ³
Abatimento = 80 ± 10mm	Massa Específica = 3100 kg/m ³	Massa Específica da Areia Seca = 2560 kg/m ³	Massa Unitária Compactada Seca = 1560 kg/m ³		
Condição de Produção A			Massa Específica = 2740 kg/m ³		
$f_{cm28} = 26,6 \text{ MPa}$					

Fonte: Autor, 2019.

a) Cálculo da resistência de dosagem

O primeiro passo foi a determinação da resistência de dosagem, dada pela Eq. 1.

$$f_{cm28} = f_{ck28} + 1,65 \cdot s_d \quad (1)$$

$$f_{cm28} = 26,6 \text{ MPa}$$

Sendo $f_{cm,28}$ a resistência média do concreto à compressão; f_{ck28} é a resistência característica do concreto à compressão, ambas previstas para os 28 dias; e s_d é o desvio padrão da dosagem, que depende da condição na qual o concreto é preparado, conforme Tabela 3. Como informado na Figura 10, a condição de preparo do concreto foi a “A”, cujo desvio padrão equivalente é de 4 MPa.

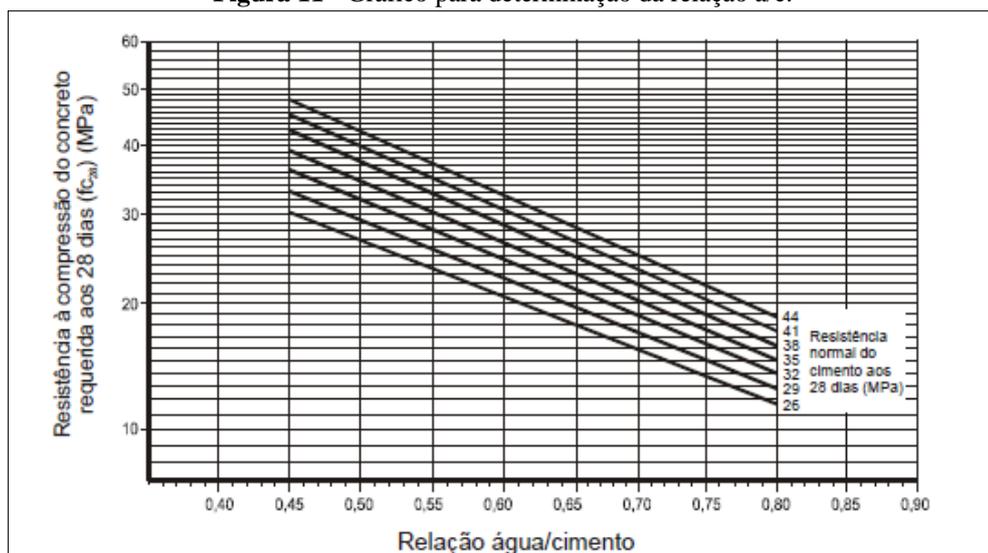
Tabela 3 - Desvio padrão a ser adotado em função da condição de preparo do concreto.

Condição de preparo do concreto	Desvio padrão s_d (MPa)	Descrição
A	4,0	Aplicável a todas as classes de concreto: o cimento e os agregados são medidos em massa, a água de amassamento é medida em massa ou volume com dispositivo dosador e corrigida em função da umidade dos agregados.
B	5,5	Pode ser aplicada às classes C10 e C20: o cimento é medido em massa, a água de amassamento é medida em volume mediante dispositivo dosador e os agregados medidos em massa combinada com volume.
C	7,0	Pode ser aplicada apenas aos concretos de classe C10 e C15: o cimento é medido em massa, os agregados são medidos em volume, a água de amassamento é medida em volume e sua quantidade é corrigida em função da estimativa da umidade dos agregados da determinação da consistência do concreto, conforme disposto na ABNT NBR NM 67 ou outro método normalizado.

Fonte: NBR 12655: “Concreto de Cimento Portland – Preparo, Controle, recebimento e aceitação – Procedimento”. ABNT, 2015.

a) Determinação da relação água/cimento (a/c)

Com o valor da resistência média calculada no item anterior e da resistência do cimento aos 28 dias, determinou-se a relação $a/c = 0,565$, pelo gráfico da Figura 11.

Figura 11 - Gráfico para determinação da relação a/c .

Fonte: BUCHER, 1989 *apud* BOGGIO, 2000.

b) Determinação do consumo de água (C_w)

A partir do valor de abatimento requerido, que foi de 80 ± 10 mm, e da dimensão máxima característica do agregado graúdo conhecida através dos ensaios de caracterização, obteve-se um consumo de água de $C_w = 205 \text{ kg/m}^3$, através da Tabela 4.

Tabela 4 - Quantidade de água de amassamento do concreto em função do abatimento e da dimensão máxima característica do agregado.

Abatimento (mm)	Dimensão Máxima Característica do Agregado Graúdo (mm)				
	9,5	19	25	32	38
	Consumo de água por metro cúbico de concreto				
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	200	190

Fonte: RODRIGUES, 1990 *apud* BOGGIO, 2000.

c) Determinação do consumo de cimento (C_c)

Conhecidos o consumo de água e a relação a/c , determinou-se o consumo de cimento, pela Eq. 2.

$$C_c = \frac{C_w}{a/c} \quad (2)$$

$$C_c = 362,83 \text{ kg/m}^3$$

d) Consumo de agregado graúdo (C_b)

Com os valores do módulo de finura da areia e a dimensão máxima característica da brita, determinou-se, pela Tabela 5, o volume compactado seco da brita (V_b) e em seguida, calculou-se o consumo de agregado graúdo, pela Eq. 3, onde μ_{bc} é a massa unitária compactada do agregado graúdo.

$$C_b = \mu_{bc} \cdot V_b \quad (3)$$

$$C_b = 1095,12 \text{ kg/m}^3$$

Tabela 5 - Volume compactado seco de agregado graúdo, em metro cúbico por metro cúbico de concreto.

Módulo de Finura do Agregado Miúdo	Dimensão Máxima Característica do Agregado Graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
Volume compactado seco de agregado graúdo					
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Fonte: RODRIGUES, 1990 *apud* BOGGIO, 2000.

e) Determinação do consumo de agregado miúdo (C_a)

O consumo de areia depende, primeiramente, do volume de areia, calculado pela Eq. 4 e aplicado na Eq. 5:

$$V_a = 1 - \left(\frac{C}{\gamma_c} + \frac{C_b}{\gamma_b} + \frac{C_w}{\gamma_w} \right) \quad (4)$$

$$V_a = 0,278 \text{ m}^3$$

$$C_a = \gamma_a \cdot V_a \quad (5)$$

$$C_a = 712,39 \text{ kg/m}^3$$

Onde γ_a é a massa específica da areia seca; γ_c é a massa específica do cimento; γ_b é a massa específica do agregado graúdo e γ_w é a massa específica da água.

f) Determinação do traço unitário

O traço unitário, em massa, refere-se massa de materiais em relação a uma unidade de cimento, conforme as razões da Eq. 6.

$$\frac{C_c}{C_c} : \frac{C_a}{C_c} : \frac{C_b}{C_c} : \frac{C_w}{C_c} \quad (6)$$

Dessa forma, foi possível chegar no seguinte traço unitário teórico:

$$1 : 1,96 : 3,02 : 0,57$$

g) Correções realizadas no traço teórico

Para o preparo do concreto, convencionou-se que o volume produzido por betonada teria como unidade padrão 30 quilogramas de agregado graúdo. A partir desse valor, fazendo uso do traço teórico pré-determinado, relacionou-se o consumo dos demais materiais na Tabela 6.

Tabela 6 - Traço unitário teórico.

	Cimento	Areia	Brita	Água
Traço Unitário Teórico	1	1,96	3,02	0,57
Consumo Teórico (kg/betonada)	9,93	19,46	30	5,66

Fonte: Autor, 2019.

Após a execução da primeira betonada do programa experimental, percebeu-se tátil e visualmente que a massa de concreto apresentava aspecto seco e com pouca fluidez, portanto, indesejada para os fins de adição de fibras. Logo, optou-se por realizar adições de água e de cimento, mantendo constante a proporção água/cimento.

Foram realizadas três adições sucessivas: a primeira com 0,250 kg de água e 0,438 kg de cimento; a segunda com 0,500 kg de água e 0,877 kg de cimento e a terceira adição igual à segunda. O novo consumo de materiais foi relacionado na Tabela 7 e, a partir dele, determinado o novo traço unitário.

Tabela 7 - Traço unitário definitivo.

	Cimento	Areia	Brita	Água
Traço Unitário Definitivo	1	1,61	2,48	0,57
Consumo Definitivo (kg/betonada)	12,12	19,46	30	6,91

Fonte: Autor, 2019.

Ao término desse processo, ainda visualmente, verificou-se que o concreto executado apresentava aspecto mais fluido e, portanto, mais próximo do desejado para fins de adição de fibras.

h) Correções realizadas em virtude da umidade do agregado miúdo

Devido à presença da umidade natural no agregado miúdo foram feitas correções nos consumos de areia e de água por betonada. Em resumo, foi necessário aumentar a massa de areia e diminuir a massa de água fazendo uso das Eq. 7 e 8, respectivamente, para determinar o consumo de areia (m_{ac}) e de água (m_{wc}) corrigidos:

$$m_{ac} = m_a \cdot (1 + h) \quad (7)$$

$$m_{wc} = m_w - (m_{ac} \cdot h) \quad (8)$$

Onde h é o teor de umidade do agregado miúdo aferido momentos antes da execução do concreto e m_a e m_w são as massas teóricas de areia seca e de água, respectivamente.

3.3 DOSAGEM DE FIBRA DE POLIOLEFINA

Os teores da fibra em estudo são relacionados com o volume de concreto, conforme Eq. 9.

$$\frac{V_f}{V_{con}} = f = \begin{cases} 0,5 \% \\ 1 \% \\ 2 \% \end{cases} \quad (9)$$

Entretanto, a quantificação das fibras em gramas facilita sua utilização e, por esse motivo, a dosagem foi feita em massa, assim como os agregados do concreto.

Determinou-se primeiro o volume de concreto em função do volume dos materiais que o constituem (Eq. 10) até chegar numa relação dependente apenas do consumo de cimento, em quilogramas (Eq. 13).

$$V_{con} = V_c + V_a + V_b + V_w \quad (10)$$

$$V_{con} = \frac{m_c}{\gamma_c} + \frac{m_a}{\gamma_a} + \frac{m_b}{\gamma_b} + \frac{m_w}{\gamma_w} \quad (11)$$

$$V_{con} = m_c \cdot \left(\frac{1}{3100} + \frac{1,61}{2560} + \frac{2,48}{2740} + \frac{0,57}{1000} \right) \quad (12)$$

$$V_{con} = m_c \cdot 2,43 \cdot 10^{-3} \quad (13)$$

Relacionando Eq. 9 com Eq. 13, obteve-se a Eq. 15, onde a massa de fibras (em gramas) depende da massa de cimento (em quilogramas), da massa específica da fibra (em kg/m³) e do teor que se deseja (em porcentagem):

$$V_f = f \cdot m_c \cdot 2,43 \cdot 10^{-3} \quad (14)$$

$$m_f = \gamma_f \cdot f \cdot m_c \cdot 2,43 \quad (15)$$

Dessa forma, determinou-se a massa de fibra por betonada para cada traço de CRFP, conforme Tabela 8.

Tabela 8 – Consumos de Fibra

Série	F0	F05	F1	F2
Teor Volumétrico (%)	0,0	0,50	1,0	2,0
Consumo (g/betonada)	0,00	141,37	282,74	565,47
Consumo (kg/m ³ de concreto)	0,00	4,23	8,45	16,90

Fonte: Autor, 2019.

3.4 PREPARO DO CONCRETO

Nos minutos anteriores à cada mistura do concreto, determinou-se a umidade natural da areia com o auxílio de uma balança para determinação de umidade infravermelho (Figura 12).

Figura 12 – Balança para determinação da umidade infravermelho.



Fonte: Autor, 2019.

Uma vez conhecido esse valor, os consumos de água e de areia foram recalculados pelas Eq. 7 e 8, para posterior pesagem em balança digital. O consumo efetivo de materiais e outras informações de cada mistura de concreto foram compilados na Tabela 9.

Tabela 9 – Resumo de traços.

Traço	Betonadas	Consumo por betonada (kg)					Umidade da Areia	Data de Execução
		Cimento	Areia	Brita	Água	Fibra		
F0	2,5		19,88		6,48	0,00000	2,16%	23/01/2019
F05	2	12,12	20,08	30	6,27	0,14137	3,17%	25/01/2019
F1	2		19,99		6,36	0,28274	2,73%	28/01/2019
F2	2		19,88		6,48	0,56547	2,16%	01/02/2019

Fonte: Autor, 2019.

O preparo do concreto foi feito em betoneira com capacidade nominal de 120 litros (Figura 13).

Inicialmente, foram colocadas a brita e metade da água na betoneira. Após cerca de 1 minuto de mistura, adicionou-se o cimento, permanecendo em mistura por mais 2 minutos até a adição de areia e do restante da água. A betoneira permaneceu ligada até o concreto adquirir aspecto homogêneo.

Figura 13 - Mistura mecanizada de concreto em betoneira.

Fonte: Autor, 2019.

3.5 PROCEDIMENTOS DE MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Finalizada a mistura de cada traço de concreto, foram moldados 8 corpos de prova cilíndricos (100 mm x 200 mm) e 2 prismáticos (150 mm x 150 mm x 500 mm) (Figura 14), seguindo as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2015).

Essa mesma norma preconiza a utilização de moldes de aço, entretanto, para a produção dos corpos de prova prismáticos, foram utilizadas formas de compensados de MDF e madeira. Apesar da adaptação feita e da depreciação das formas ao longo da sua utilização, não foram verificadas imperfeições significativas no acabamento ou na geometria dos corpos de prova.

Todos os moldes e formas foram previamente revestidos com desmoldante antes de cada moldagem. Foi feito adensamento mecânico com vibrador de imersão (agulha) para ambos os tipos de corpos de prova (Figura 15) e, após o adensamento da última camada, foi feito o rasamento da superfície com a borda do molde, utilizando colher de pedreiro e régua metálica.

Figura 14 - Corpos de prova F0.



Fonte: Autor, 2019.

Figura 15 - Adensamento mecânico.



Fonte: Autor, 2019.

Após 24 horas da moldagem, os corpos de prova foram desmoldados e armazenados em tanque de cura (Figura 16), onde permaneceram submersos em água, sob processo de cura saturada, até o momento dos ensaios destrutivos.

Figura 16 - Tanque de Cura.



Fonte: Autor, 2019.

Antes dos ensaios, os corpos de prova cilíndricos tiveram as bases regularizadas através do processo de retificação, feito na máquina retífica (Figura 17). Tal medida foi imprescindível visto que, principalmente no traço F2, com maior teor de fibra, o acabamento das bases dos corpos de prova ficou muito irregular, inclusive pela dificuldade de rasamento no momento da moldagem (Figuras 18 e 19).

Figura 17 - Preparo da base de corpo de prova por retificação.



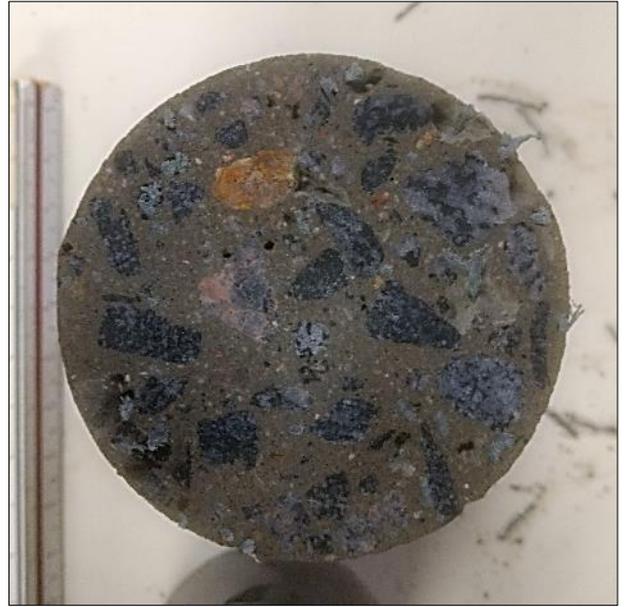
Fonte: Autor, 2019.

Figura 18 - Corpo de prova F2 pós rasamento.



Fonte: Autor, 2019.

Figura 19 - Corpo de prova F2 após retificação.



Fonte: Autor, 2019.

Em seguida, todos os corpos de prova tiveram suas dimensões medidas com paquímetro (resolução 0,1 mm) ou régua (Figuras 20 e 21). Especificamente, os prismáticos tiveram linhas marcadas em suas superfícies, sinalizando os eixos de aplicação das cargas de ensaio, para garantir o posicionamento alinhado no momento do ensaio.

Figura 20 - Medição das dimensões de corpo de prova cilíndrico com paquímetro.



Fonte: Autor, 2019.

Figura 21 - Medição das dimensões de corpo de prova prismático com régua.



Fonte: Autor, 2019.

3.6 ENSAIOS

a) Ensaio de Consistência (*slump test*)

O ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone (Figura 22), ou slump test, foi realizado conforme as recomendações da NBR NM 67 (ABNT, 1998).

Por se tratar de um ensaio feito com o concreto no estado fresco, este foi realizado uma vez logo após o preparo de cada traço, com e sem fibras, totalizando 4 ensaios.

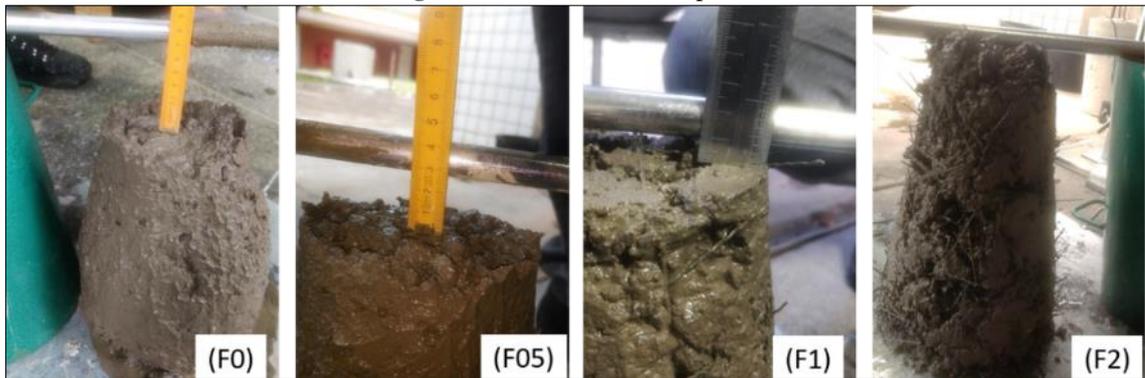
Em cada ensaio, o molde metálico tronco-cônico foi colocado sob uma placa metálica, ambos previamente umedecidos e, em seguida, foi feito o preenchimento com concreto em três camadas igualmente compactadas com 25 golpes dados com haste metálica. O molde foi retirado e o abatimento foi medido com régua ou trena (Figura 23). O relatório dos ensaios de abatimento do tronco de cone encontra-se no Apêndice C.

Figura 22 - Execução do slump test.



Fonte: Autor, 2019.

Figura 23 - Ensaio de slump test.



Fonte: Autor, 2019.

b) Compressão Axial

Foram realizados ensaios de compressão axial dos concretos seguindo as recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2007).

Aos 14 dias, foram rompidos 2 corpos de prova para cada traço, totalizando 8 rompimentos. Já aos 28 dias, foram rompidos 2 corpos de prova para o traço F0 e 4 para cada traço com fibra (F05, F1 e F2), totalizando mais 14 rupturas.

O ensaio foi feito em prensa hidráulica (Figura 24) e, com o valor da carga de ruptura mostrado no painel da prensa, calculou-se a resistência à compressão axial cujos resultados foram expressos nos relatórios de ensaio de compressão axial, aos 14 e aos 28 dias, no Apêndice D e E.

Figura 24 - Prensa hidráulica.



Fonte: Autor, 2019.

c) Tração na Flexão

Os ensaios de determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos foram realizados, conforme as recomendações da NBR 12142 (ABNT, 2010).

Foram feitas adaptações para utilização da mesma prensa hidráulica na qual foram realizados os ensaios de compressão. Para isso, foi confeccionado um dispositivo de flexão (Figura 25) constituído por duas peças de madeira, uma superior e outra inferior, ambas com 2 roletes metálicos acoplados às faces internas.

O espaçamento entre roletes é padronizado em 150 mm e 450 mm nas partes superior e inferior, respectivamente.

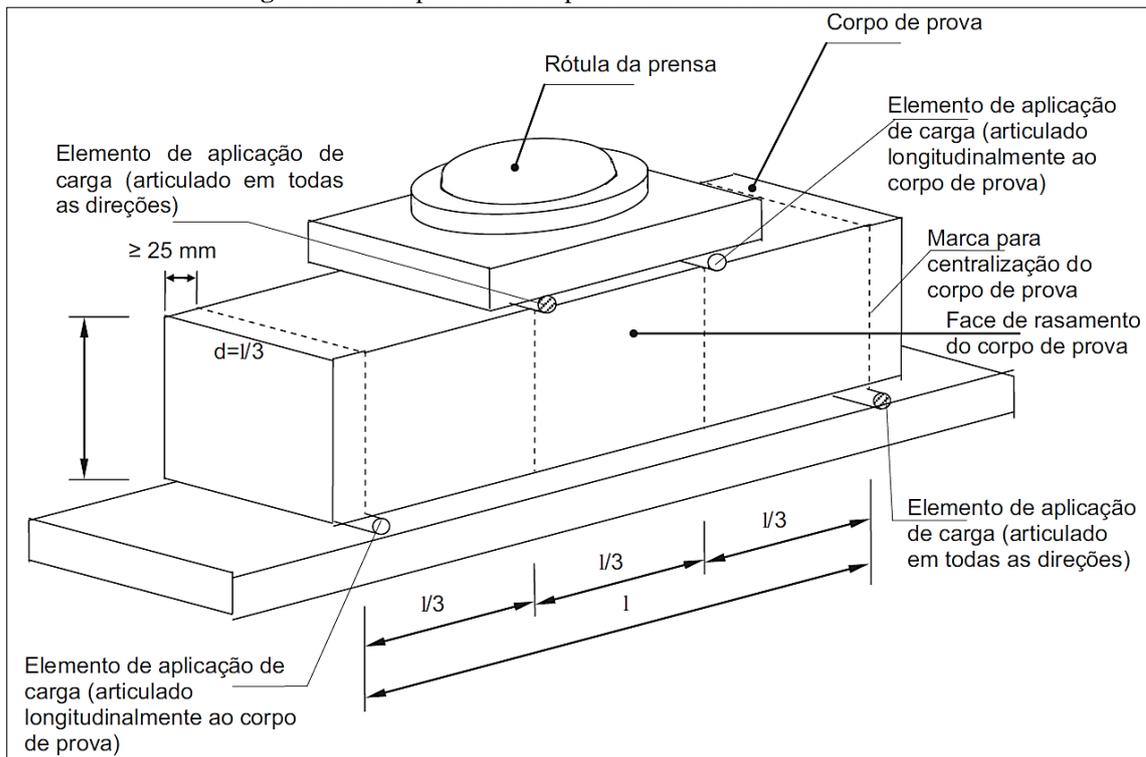
Para garantir o contato ideal entre os roletes e o corpo de prova, já que o dispositivo utilizado foi adaptado, foram posicionadas almofadas de neoprene em todos os apoios.

As faces externas das peças de madeira ficam em contato direto com os discos da prensa e a carga é aplicada sobre os corpos de prova através do contato destes com os roletes metálicos, intermediados pelo neoprene. Logo, este dispositivo deve simular um ensaio de flexão de quatro pontos (Figura 26).

Figura 25 - Dispositivo de Flexão Adaptado.



Fonte: Autor, 2019.

Figura 26 - Perspectiva do dispositivo de flexão recomendado.

Fonte: Adaptado da NBR 12142. ABNT, 2010.

Para cada traço, foram rompidos 2 corpos de prova prismáticos com idade de 28 dias, cujas dimensões e resistência à tração na flexão foram compilados no relatório de ensaio de flexão, no Apêndice F.

É importante ressaltar que este ensaio não permite determinar a deformação ou a abertura de fissuras, tampouco a tenacidade dos CRFP, como ocorre em outros ensaios tradicionalmente realizados com CRF. Logo, trata-se apenas da determinação da resistência última do material à tração por flexão.

d) Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica

As determinações do teor de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica dos concretos endurecidos foram feitas com base nas recomendações da NBR 9778 (ABNT, 2005).

Neste ensaio, para cada traço, foram reservados 2 corpos de prova cilíndricos que foram colocados em estufa para secagem por 72 horas (Figura 27). Por precaução, manteve-se a temperatura constante em 80°C , temendo o derretimento das fibras.

Após a secagem, em balança digital, aferiu-se e registrou-se as massas secas.

Em seguida, os corpos de prova foram imersos em água em temperatura ambiente por, no mínimo, 72 horas. Na data da nova pesagem, foram retirados e colocados em panelas com água que, levada à ebulição por 5 horas seguidas, mantendo-se constante o volume de água no recipiente (Figura 28).

Figura 27 – Retirada dos corpos de prova secos em estufa.



Fonte: Autor, 2019.

Figura 28 - Corpos de prova imersos em água em ebulição.



Fonte: Autor, 2019.

Terminado esse período, os corpos de prova permaneceram imersos até esfriarem para, em seguida, serem submersos e pesados em balança hidrostática adaptada (Figura 29).

Por fim, uma última pesagem foi feita após as superfícies dos CPs terem sido enxugadas com uma toalha.

As respectivas pesagens forneceram as massas secas, as massas saturadas submersas e as massas saturadas com superfície seca. Com esses valores, a partir das equações presentes na NBR 9778 (ABNT, 2005), determinou-se dos índices físicos desejados.

Para cada traço foram feitas duas determinações de cada índice físico, devidamente registradas no relatório de ensaio de determinação da absorção, índice de vazios e massa específica, no Apêndice G.

Figura 29 - Balança hidrostática adaptada.



Fonte: Autor, 2019.

e) Tração por Compressão Diametral

A princípio, seriam reservados 2 corpos de prova cilíndricos, com idade de 28 dias, de cada traço para a execução do ensaio de compressão diametral. Os CPs F0 chegaram a ser rompidos neste ensaio, entretanto, houve grande divergência entre as cargas de ruptura e o tipo de ruptura diferiu da ruptura padrão, como pode-se ver na Figura 30.

Por esse motivo, optou-se por retirar esse ensaio do programa experimental e destinar os corpos de prova para os ensaios de compressão axial aos 28 dias.

Figura 30 - Falha em ensaio de compressão diametral.

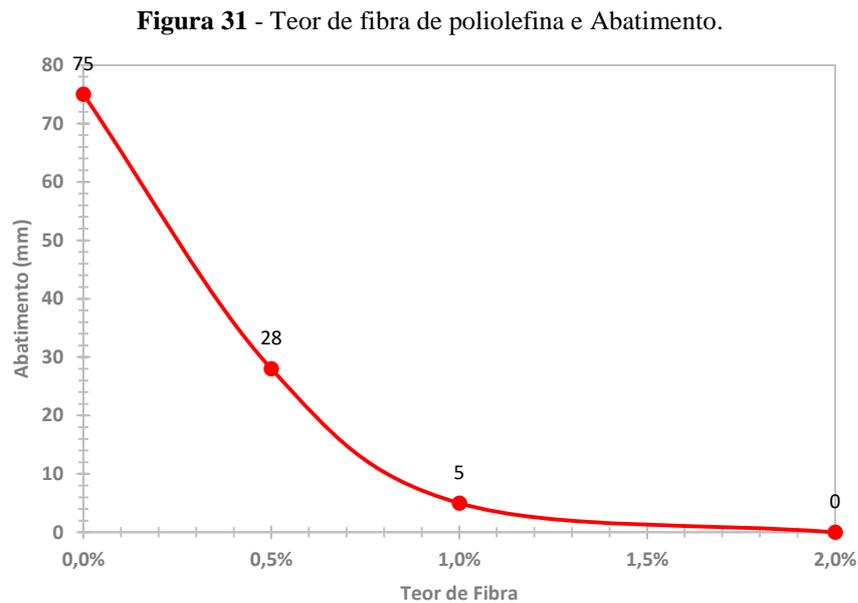


Fonte: Autor, 2019.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CONSISTÊNCIA

Os resultados da influência do aumento do teor de fibra de poliolefina sobre a consistência do concreto são apresentados na Figura 31.



Fonte: Autor, 2019.

Como era esperado, o aumento do teor da fibra de poliolefina resultou na redução do abatimento do tronco de cone, seguindo a tendência geral verificada para outros tipos de fibras e corroborando com a afirmação de Mehta e Monteiro (2014) de que a redução da trabalhabilidade está diretamente ligada à concentração de fibras no concreto.

Ainda segundo esses autores, a determinação da consistência dos CRF pelo *slump test* não é um parâmetro adequado de trabalhabilidade, pois como as fibras aumentam a estabilidade da massa fresca de concreto e, mesmo com a redução do abatimento do tronco de cone, ainda é possível se alcançar lançamentos e adensamentos satisfatórios. Um parâmetro mais preciso para avaliação da trabalhabilidade é o ensaio VeBe (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Para o traço de referência utilizado, além da redução do abatimento, foi possível perceber que o aumento do teor da fibra dificultou o lançamento nos moldes dos corpos de

prova e, mesmo com o adensamento automático, houveram imperfeições na superfície dos mesmos, principalmente nos traços F1 e F2.

Observando a Figura 32, nota-se que no traço F2 houve grande quantidade de fibras que não ficaram completamente recobertas pelo concreto. Tal característica pode inviabilizar a utilização do compósito com grandes teores de fibra devido à significativa perda de trabalhabilidade.

Figura 32 - Aspecto dos CRFP produzidos.



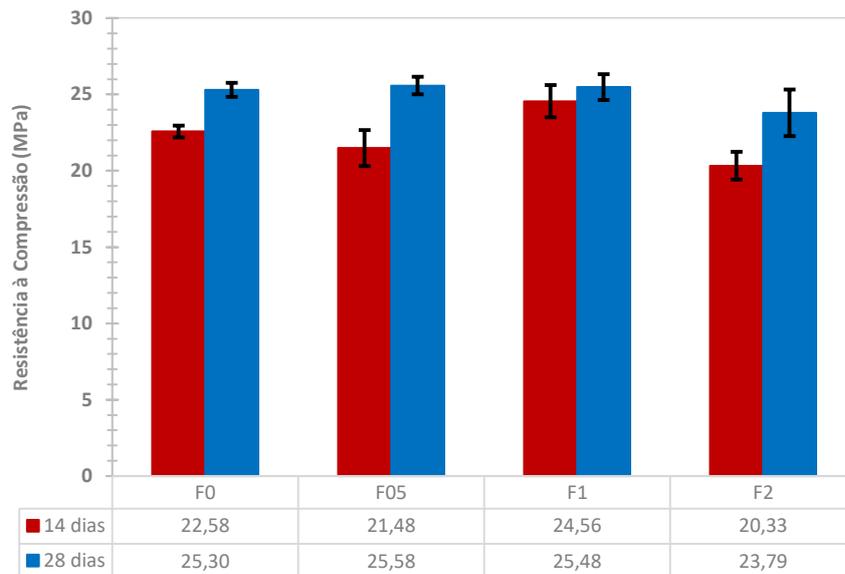
Fonte: Autor, 2019.

Para contornar essa situação e atender o quesito trabalhabilidade dos CRF em geral, é possível a adoção de medidas como uso de agregados graúdos com menor diâmetro máximo característico, uso de ar incorporado, aditivos plastificantes, maior quantidade de pasta de cimento, além da adoção do Concreto Autoadensável Reforçado com Fibras – CAARF (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Mesmo nesses casos, o aumento do teor de fibras ainda resultará na tendência à perda da trabalhabilidade, mas devido à melhor consistência da matriz em relação ao traço adotado nesse trabalho, o estudo e aplicação de altos teores pode tornar-se viável.

4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

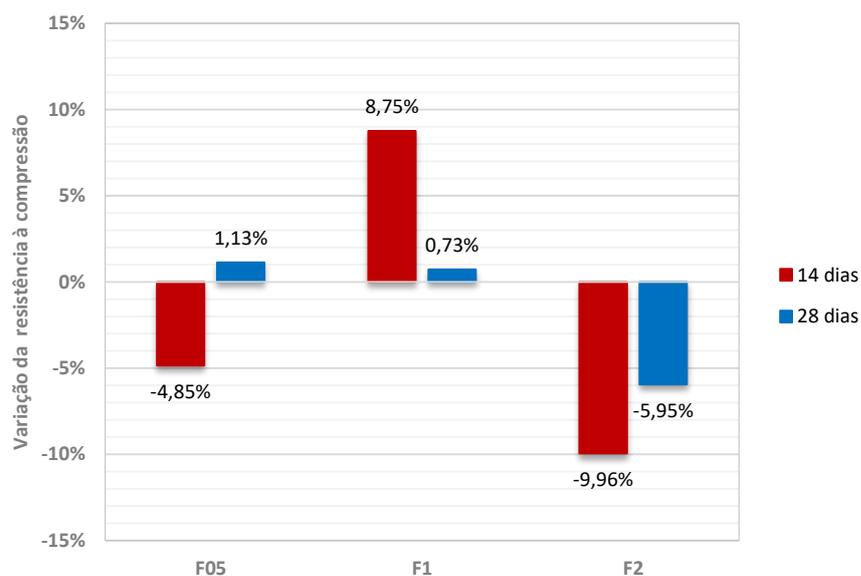
Os resultados sobre a influência do aumento do teor da fibra de poliolefina sobre a resistência média à compressão aos 14 e aos 28 dias podem ser visualizados na Figura 33 e a variação percentual desse parâmetro em relação ao concreto referencial sem fibras, na Figura 34.

Figura 33 - Teor de fibra de poliolefina e resistência média à compressão.

Fonte: Autor, 2019.

Para ambas idades analisadas, percebe-se que não houveram alterações significativas em relação à resistência à compressão do CRFP com o aumento da concentração volumétrica de fibra. Os resultados obtidos corroboram, em parte, com Mehta e Monteiro (2014), que afirmam que a resistência e módulo de elasticidade do CRF não divergem muito dos valores observados para um concreto convencional sem reforço.

Por outro lado, Gaspar *et. al.* (2016) e Saraiva *et. al.* (2018) obtiveram ganhos de até 13,9% e 20% na resistência axial de CRFP, respectivamente.

Figura 34 - Variação percentual da resistência média à compressão em relação ao concreto sem fibras.

Fonte: Autor, 2019.

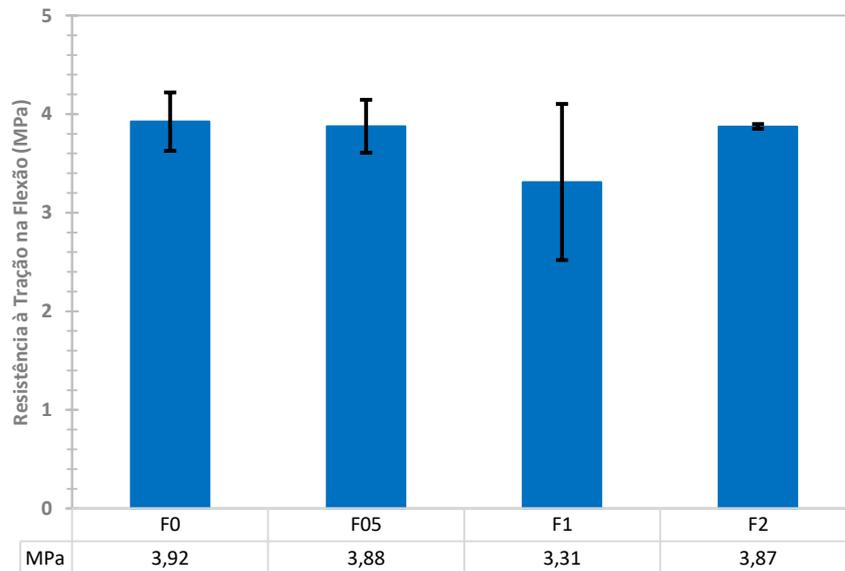
Especificamente aos 14 dias, a partir da Figura 34, nota-se um comportamento anômalo em relação à variação da resistência à compressão comparada à do concreto referencial sem fibras, de modo que o incremento inicial da fibra (F05) provocou um decréscimo de 4,85%, mas, por outro lado, para o traço F1, houve um aumento de 8,75%, enquanto que para o traço F2, também ocorreu uma redução de 9,96%.

Já aos 28 dias, o gráfico da Figura 34 revela um comportamento mais estável, indicando que houve um aumento da resistência com a adição da fibra, mas o aumento do teor desta provocou um decréscimo na resistência, de modo que F05 e F1 apresentaram resistências acima do F0, entretanto, o F2 foi 5,95% inferior ao F0.

4.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Os resultados para a resistência à tração na flexão são indicados na Figura 35.

Figura 35 - Teor de fibra de poliolefina e resistência média à tração na flexão.



Fonte: Autor, 2019.

Percebe-se que a maior resistência alcançada foi a do F0, sendo que o acréscimo de fibras ocasionou uma queda nesse parâmetro, tanto para o traço F05, que se enquadra na faixa de dosagem recomendada pelo fabricante da fibra, como para os traços com concentrações superiores às recomendadas, como é o caso de F1 e F2.

Maciel *et. al.* (2015), num estudo com concretos reforçados com fibras de aço e com microfibras de polipropileno, após obter valores inferiores de resistência à tração na flexão

para os CRF em relação ao concreto referencial sem fibras, atribuiu tais resultados ao fato das fibras aumentarem a incorporação de ar ao concreto, aumentando também sua porosidade, além de ocasionarem maior dificuldade de mistura e, conseqüentemente, maiores defeitos à sua microestrutura. O conjunto desses fatores tenderia a atenuar as propriedades mecânicas da matriz de concreto.

Outra informação relevante, além do resultado do ensaio de tração propriamente dito, pode ser observada na Figura 36. Após a execução dos referidos ensaios, observou-se nas seções de fratura dos corpos de prova a presença em maioria de fibras que sofreram arrancamento. Deduz-se tal situação devido a diferença entre as resistências à tração da matriz de concreto (da ordem de 3 a 7 MPa) e da fibra de poliolefina (entre 650 a 750 MPa), como apresentado na Tabela 1. A partir dessa mesma tabela, destaca-se o módulo de elasticidade da fibra de poliolefina, de 4,80 GPa, considerado um baixo módulo.

Figueiredo (2011b) aponta que para o desempenho do reforço com fibras com tais propriedades seja satisfatório, as mesmas devem estar presentes em alta concentração no compósito. Por outro lado, o acréscimo do teor da fibra em questão, ao contrário do que se esperava, não demonstrou melhoras na resistência à tração, mas uma redução nesse parâmetro. Por esse motivo, torna-se relevante não apenas a análise de novos teores da fibra de poliolefina, mas também o controle de outros aspectos fundamentais ao bom desempenho do CRFP, como a geometria e a orientação do reforço fibroso.

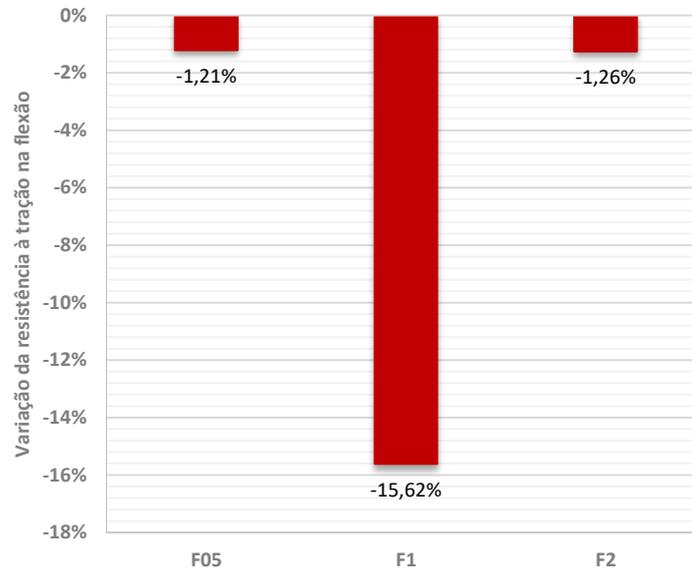
Figura 36 - Fratura de corpo de prova prismático (F05) em ensaio de tração na flexão.



Fonte: Autor, 2019.

Os resultados para a variação da resistência à tração dos CRFP em relação ao concreto sem fibras estão indicados na Figura 37.

Figura 37 - Variação percentual da resistência à tração na flexão em relação ao concreto sem fibras.

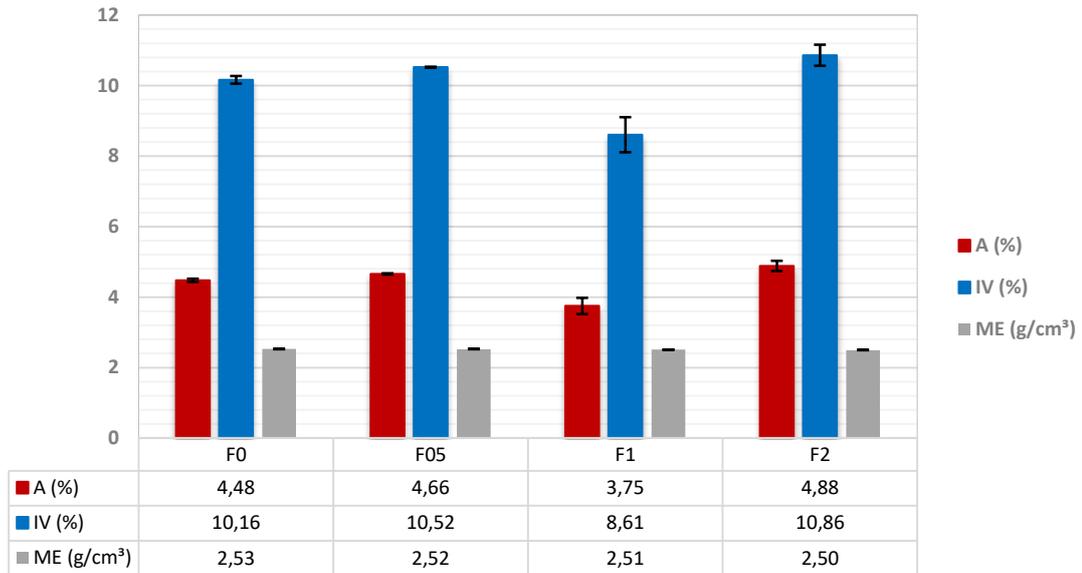


Fonte: Autor, 2019.

A grande queda na resistência à tração na flexão apresentada no traço F1 não condiz com o acréscimo alcançado na resistência à compressão axial do mesmo traço. É possível que essa discrepância possa ter ocorrido devido imperfeições geométricas dos corpos de prova prismáticos ou durante a própria execução do ensaio devido às adaptações feitas com o aparelho de flexão, com o uso das almofadas de neoprene ou devido um eventual mau posicionamento dos aparelhos na prensa hidráulica.

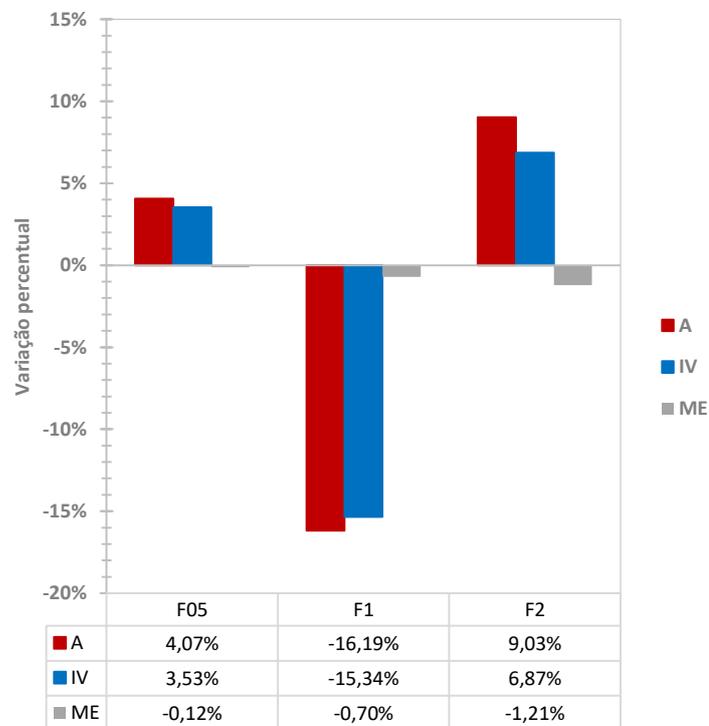
4.4 ABSORÇÃO, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA

Os resultados obtidos para o teor de absorção de água, o índice de vazios e a massa específica real dos concretos estão apresentados na Figura 38.

Figura 38 - Teor de fibra de poliolefina e Absorção, Índice de vazios e Massa específica real.

Fonte: Autor, 2019.

Os valores referentes às variações da absorção, índice de vazios e massa específica dos CRFP em relação ao concreto sem fibras estão dispostos na Figura 39.

Figura 39 - Variação percentual da absorção de água (A), índice de vazios (IV) e massa específica real (ME) em relação ao concreto sem fibras.

Fonte: Autor, 2019.

Em relação à massa específica, nota-se uma variação ínfima, mas claramente decrescente com o aumento da concentração da fibra. Esse comportamento pode ser atribuído à presença de fibras e vazios ocupando os espaços antes ocupados apenas pelo concreto, que possui massa específica superior à poliolefina e ao ar.

Por outro lado, a taxa de absorção de água e o índice de vazios apresentam um comportamento crescente com o aumento do teor da fibra, exceto pelo traço F1. Todavia, esse comportamento é esperado, visto que o incremento da quantidade de fibras provoca maior tendência à formação de vazios entre elas. Vale salientar que, para a macrofibra de poliolefina, o crescimento da taxa de absorção não está relacionado à fibra em si, pois a mesma não absorve água, mas justamente aos vazios decorrentes da sua incorporação ao concreto.

Ainda a respeito desses índices, devido sua íntima relação, é notório que sua variação também é similar, ainda que não se possa afirmar que haja linearidade.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A execução desse trabalho permitiu observar que, dentre dos limites analisados, a concentração de fibras de poliolefina, bem como materiais fibrosos em geral, resultou na redução do abatimento do tronco de cone.

A resistência à compressão do CRFP não apresentou relação bem definida com o aumento do teor de fibra estudado, tampouco relação de linearidade. Entretanto, o estudo e controle dessa propriedade são imprescindíveis se tratando de compósitos de matriz de concreto, uma vez que a resistência à compressão ainda é a principal propriedade dessa matriz e de seus compósitos resultantes.

A resistência à tração na flexão não apresentou linearidade com teor da fibra, mas apesar das variações, percebeu-se uma tendência à redução da resistência com o aumento da quantidade de fibras.

A massa específica do compósito diminuiu em relação à massa específica da matriz não reforçada, porém a variação foi ínfima. A absorção e o índice de vazios mostraram-se relacionados entre si, mas sem relação de linearidade com o teor da fibra. Todavia, apesar da oscilação verificada no traço F1, houve uma aparente tendência de crescimento desses índices à medida que a concentração da fibra aumenta.

Os resultados atribuídos ao traço F1 apresentam indícios de que podem ter ocorrido erros em alguma das etapas de preparo, adensamento ou execução dos ensaios, ocasionando pontos fora das curvas esperadas. O uso de aparelhos para adaptação dos ensaios e as próprias recomendações normativas específicas para concreto simples podem dificultar o uso dos resultados obtidos para fins de comparação com outros trabalhos.

Por fim, visando o aprofundamento sobre as características dos concretos reforçados com macrofibras poliméricas, em especial, a de poliolefina, são sugeridos estudos de mudança da matriz de concreto com aditivos plastificantes ou concreto autoadensável; de teores de fibra direcionados à determinação do volume crítico; da variação do tipo de macrofibra e, conseqüentemente, do seu módulo de elasticidade; da variação da forma geométrica (comprimento, diâmetro e formato) da fibra; do tipos e dimensões dos agregados utilizados; e, principalmente, do incremento à tenacidade e resistência pós-fissuração do compósito.

6 REFERÊNCIAS

ALFERES FILHO, R. S. **Avaliação da influência do direcionamento de fibras de aço no comportamento mecânico de concreto autoadensável aplicado em elementos planos**. 2016. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana). Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)**. ASTM C1609. Book of ASTM Standards, ASTM, Philadelphia, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Obtaining Average Residual-Strength of Fiber-Reinforced Concrete**. ASTM C1399. Book of ASTM Standards, ASTM, Philadelphia, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro. 2006.

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

_____. **NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro. 2003.

_____. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro. 2015.

_____. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro. 2007.

_____. **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro. 2009.

_____. **NBR 7222: Concreto e Argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro. 2010.

_____. **NBR 9776: Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman**. Rio de Janeiro. 1987.

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

_____. **NBR 12142: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. Rio de Janeiro. 2010.

_____. **NBR 15530: Concreto – Fibras de Aço para Concreto - Especificação**. Rio de Janeiro. 2007.

AZEVEDO, V. H. O. **Estudo da influência da utilização de fibras sobre o comportamento físico e mecânico de um concreto leve**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

BOGGIO, A. J. **Estudo comparativo de métodos de dosagem de concretos de cimento Portland**. Porto Alegre, 2000. 180p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CARNIO, M. A. Aspectos gerais sobre o uso do concreto reforçado com fibras no Brasil: produção, projeto, tecnologia, normalização. **Revista Concreto & Construções**. IBRACON, ed. 87, ano XLV, p. 26-32, jul./set. 2017.

CARVALHO, A. R. **Avaliação das propriedades mecânicas do concreto com adição de fibras para confecção de anéis pré-moldados segmentados para revestimento de túnel de metrô**. Fortaleza, 2016. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará.

CRISTOFOLI, T.; CATRINE, G.; TUTIKIAN, B. F.; CHRIST, R. **Influência da adição de fibras metálicas em concreto autoadensável no estado endurecido**. In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO SOBRE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL E BETÕES ESPECIAIS, V., 2018, Valência. HAC 2018.

DIAS, R. F. **Comparação da determinação da tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço por meio do ensaio de abertura por encunhamento e da ASTM C1609**. 2018. 139 f. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Uberlândia.

EUROPEAN STANDARD. **Test Method of metallic fibered concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality residual)**. EN 14651. 2007.

FERREIRA, R. L. R. **Blendas ternárias poliolefinicas em filmes para embalagens de pet food com propriedades de barreira**. 2016. 139 f. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

fib Bulletin 55, Model Code 2010. First complete draft, v. 1, 2010, 312p.

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

_____. **Concreto com fibras**. In: Concreto: ciência e tecnologia. 1 ed., cap. 37, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), São Paulo, 2011a.

_____. **Concreto reforçado com fibras**. 2011b. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

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

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

GASPAR, D. H.; CARNEIRO, L. A. V.; TEIXEIRA, A. M. A. J. **Estudo de placas de concreto com fibras de aço e de poliolefina submetidos a impacto balístico**. Revista Militar de Ciência e Tecnologia. v. XXXIII. p.57 - 62, 2016.

HELENE, P.; ANDRADE, T. Concreto de cimento Portland. Cap. 29. *In*: ISAIA, G. C. (Ed. 1). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON, 2010, v. 2, p. 905-944.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete**. JSCE-SF4, 1984.

MACIEL, M. H.; TORRES, D. R.; SAKANO, V. K.; ROMANO, R. C. O.; PILEGGI, R. G.; FIGUEIREDO, A. D. **Influência do tipo de fibra nas propriedades reológicas e no estado endurecido de concretos**. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 57., 2015, Bonito. Anais... O futuro do concreto para a sustentabilidade nas construções. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2015.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto - Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2ª edição. São Paulo: Instituto Brasileiro de Concreto IBRACON. 751p, 2014.

MIGLIORINI, A. V. **Estudo de fibras de aço em blocos de concreto para a possível utilização em carapaça de molhes**. Rio Grande, 2011. 200p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande.

MONTE, R.; BARBOZA, A. S. R. Controle tecnológico do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras. **Revista Concreto & Construções**. IBRACON, ed. 87, ano XLV, p. 33-38, jul./set. 2017.

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

MULT BULDING. **Formulário de Descrições Técnicas – Duristeel**. Acesso em: 05 de dezembro de 2018. Disponível em: <<http://www.concrefibra.com.br/fibra-para-concreto/macrofibra-sintetica/>>.

PEREIRA, E. V.; SILVA, F. A. **Influência de Fibras de Aço no Comportamento Mecânico e nos Mecanismos de Fissuração de Concretos Autoadensáveis**. Rio de Janeiro, 2017. 170p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

PEREIRA, M. M. **Análise comparativa da medida de tenacidade por meio do ensaio por encunhamento e do Barcelona simplificado**. 2017. Qualificação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

PUJADAS, P. **Caracterización y diseño del hormigón reforzado con fibras plásticas**. Tesis doctoral. Universidad Politecnica de Cataluña. Barcelona, Marzo, 2013.

QUININO, U. C. M. **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras**. 2015. 216 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RODRIGUES, P. P. F. **Parâmetros de dosagem do concreto**. ET-67. São Paulo: ABCP, 1990.

RODRIGUES, P. P. F.; MONTARDO, J. P. **A influência da Adição de Fibras de Polipropileno nas Propriedades dos Concretos para Pisos e Pavimentos**. *In: 44º Congresso Brasileiro do Concreto*. IBRACON, Belo Horizonte. 2002.

SALVADOR, R. P. **Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras**. 2013. 201 f. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SALVADOR, R. P.; FIGUEIREDO, A. D. **Análise comparativa de comportamento mecânico de concreto reforçado com macrofibra polimérica e com fibra de aço**. *Matéria (UFRJ)*, v. 18, p. 1273-1285, 2013.

SHIMOSAKA, T. J. **Influência do teor de diferentes tipos de fibras de aço em concretos autoadensáveis**. 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

TOALDO, G. S.; MONTE, R.; FIGUEIREDO, A. D. **Avaliação comparativa de métodos de ensaio para a determinação da tenacidade do concreto reforçado com fibras**. *In: 55º Congresso Brasileiro do Concreto*, 2013, Gramado. *Ações concretas para o futuro da construção em concreto no Brasil*. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2013.

TORRES FILHO, D. **Manual Básico de Materiais para Construção**. 2016. 171p. 2. ed. Gráfica Real. Cajazeiras.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. **Dosagem dos concretos de cimento Portland**. Cap. 12. *In: ISAIA, G. C. Concreto: Ciência e Tecnologia*. São Paulo. Instituto Brasileiro de Concreto IBRACON. 2011.

VASCONCELOS, R. E. **Fratuira do concreto reforçado com fibras de aço e de polipropileno em meios normal e agressivo**. 2012. 181 f. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia de Materiais. Universidade Estadual de Campinas.

WANG, K.; SURENDRA, P. S.; PHUAKSUK, P. **Plastic shrinkage cracking in concrete materials – Influence of fly ash and fibers**. *Journal of Materials*. American Concrete Institute ACI, 2001.

APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADO MIÚDO

a) Composição granulométrica - em conformidade com a NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Tabela A1 - Peneiramento do agregado miúdo.

Peneira Nº	Abertura (mm)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	P _{1ri} (%)	P _{2ri} (%)	P _{média} (%)	P _{acum} (%)
3/8"	9,5	-	-	-	-	-	-
1/4"	6,3	-	-	-	-	-	-
4	4,8	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
10	2,4	23,7	43,8	4,76	8,82	6,79	6,79
16	1,2	69,3	80,2	13,90	16,15	15,03	21,81
30	0,6	123,8	134,7	24,84	27,11	25,98	47,79
50	0,3	159,4	146,0	31,98	29,39	30,69	78,48
100	0,15	82,5	68,2	16,55	13,72	15,14	93,61
	Prato	39,7	23,9	7,97	4,81	6,39	100,00
	Total	498,4	496,76	100,00	100,00	100,00	
						Módulo de Finura	2,48
						DMC	4,8 mm

Fonte: Autor, 2019.

M_x: massa da amostra x retida em cada peneira;

P_{xri}: porcentagem da massa da amostra x retida em cada peneira;

P_{média}: porcentagem média retida em cada peneira;

P_{acum}: porcentagem média retida acumulada em cada peneira;

Módulo de Finura: Soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100;

Dimensão Máxima Característica (DMC): grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado, correspondente à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

- b) Massa Específica (μ) – Método do Frasco de Chapmam, em conformidade com a NBR 9776 (ABNT, 1987)

Tabela A2 - Massa Específica do agregado graúdo.

Determinação	Ms (g)	Li (mL)	Lf (mL)	μ (g/cm³)
Amostra 1	500	200	396	2,55
Amostra 2	500	200	395	2,56
			$\mu_{\text{médio}}$	2,56

Fonte: Autor, 2019.

APÊNDICE B – CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADO GRAÚDO

Parte final do texto, na qual se apresentam conclusões correspondentes aos objetivos, comprovação dos pressupostos ou hipóteses (se for o caso de existir na pesquisa). É recomendável apresentar os desdobramentos relativos à importância, síntese, projeção, repercussão, encaminhamento e outros.

a) Composição granulométrica, em conformidade com a NBR NM 248 (ABNT, 2003)

Tabela B1 - Peneiramento de agregado graúdo.

Peneira Nº	Abertura (mm)	M₁ (g)	M₂ (g)	P_{1ri} (%)	P_{2ri} (%)	P_{média} (%)	P_{acum} (%)
3"	75	-	-	-	-	-	-
-	63	-	-	-	-	-	-
2"	50	0	0	0%	0%	0%	0%
1 1/2"	38	0	0	0%	0%	0%	0%
-	32	-	-	-	-	-	-
1"	25	0	0	0%	0%	0%	0%
3/4"	19	0	0	0%	0%	0%	0%
-	12,5	-	-	-	-	-	-
3/8"	9,5	320,4	361,3	64%	72%	68%	68%
-	6,3	-	-	-	-	-	-
Nº 4	4,8	156,1	121,5	31%	24%	28%	96%
Nº 8	2,4	14,5	8,2	3%	2%	2%	98%
	Prato	9,5	8,7	2%	2%	2%	100%
	Total	500,5	499,7	100%	100%	100%	
						Módulo de Finura	6,62
						DMC	19 mm

Fonte: Autor, 2019.

M_x: massa da amostra x retida em cada peneira;

P_{xri}: porcentagem da massa da amostra x retida em cada peneira;

P_{média}: porcentagem média retida em cada peneira;

P_{acum}: porcentagem média retida acumulada em cada peneira;

Módulo de Finura: Soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100. Nesse caso, foi acrescentado mais 400% à somas das porcentagens retidas acumuladas. Esse valor é referente às peneiras 1,2 mm, 0,6 mm, 0,30 mm e 0,15 mm.

Dimensão Máxima Característica (DMC): grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado, correspondente à abertura nominal, em milímetros, da malha da

peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

- b) Massa específica, massa específica aparente e absorção de água do agregado graúdo, em conformidade com a NBR NM 53 (ABNT, 2009)

Tabela B2 - Ensaio de massa específica do agregado graúdo.

		M ₁	M ₂	Média
Massa da Amostra Seca (g)	m	2000	2000	
Massa da Amostra Saturada Superfície Seca (g)	m_{sss}	2017,6	2010,4	
Massa da Amostra Saturada Superfície Seca Submersa (g)	m_{sub}	1283,5	1283,8	
Massa Específica do Agregado Seco (g/cm ³)	γ_b	2,72	2,75	2,74
Massa Específica do Agregado Saturado Superfície Seca (g/cm ³)	γ_{sss}	2,75	2,77	2,76
Massa Específica Aparente (g/cm ³)	μ_{apa}	2,79	2,79	2,79
Absorção de água (%)	A	0,88	0,52	0,70

Fonte: Autor, 2019.

Massa Específica do Agregado Seco:

$$\gamma_b = \frac{m}{m_{sss} - m_{sub}}$$

Massa Específica do Agregado na Condição Saturado Superfície Seca:

$$\gamma_{sss} = \frac{m_{sss}}{m_{sss} - m_{sub}}$$

Massa Específica Aparente:

$$\gamma_{apa} = \frac{m}{m - m_{sub}}$$

Absorção de água:

$$A = \frac{m_{sss} - m}{m} \cdot 100$$

- c) Massa Unitária e Volume de Vazios, em conformidade com a NBR NM 45 (ABNT, 2006)

Tabela B3 - Massa Unitária de agregado graúdo.

		M₁	M₂	M₃	Média
Massa do recipiente mais amostra (g)	m_{ar}	16780	16940	16890	
Massa do Recipiente (g)	m_r		690		
Volume do Recipiente (cm ³)	V_r		10364,34		
Massa Unitária Compactada do Agregado Graúdo (g/cm ³)	μ_{bc}	1,55	1,57	1,56	1,56
Massa Unitária do Agregado Saturado Superfície Seca (g/cm ³)	μ_{sss}	1,56	1,58	1,57	1,57
Índice de Vazios (%)	E_V	43,31	42,75	42,92	42,99

Fonte: Autor, 2019.

Massa Unitária Compactada do Agregado Graúdo:

$$\mu_{bc} = \frac{m_{ar} - m_r}{V_r}$$

Massa Unitária do Agregado Saturado Superfície Seca:

$$\mu_{sss} = \mu_{bc} \cdot \left(1 + \frac{A}{100}\right)$$

Sendo que A é a absorção, determinada de acordo com a NBR NM 53 (ABNT, 2003).

Índice de Vazios:

$$E_V = \frac{100 \cdot (d_1 \cdot \rho_w - \mu_{bc})}{d_1 \cdot \rho_w}$$

Sendo que d_1 é a massa específica relativa do agregado seco, determinada conforme a NBR NM 53 (ABNT, 2003); ρ_w é a massa específica da água, em quilogramas por metro cúbico; μ_{bc} é a massa unitária média do agregado, em quilogramas por metro cúbico.

APÊNDICE C – RELATÓRIO DE ENSAIO DE ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE

Tabela C1 - Resumo de ensaio de abatimento.

Traço	Data de ensaio	Abatimento (mm)
F0	23/01/2019	70
F05	25/01/2019	28
F1	28/01/2019	5
F2	01/02/2019	0

Fonte: Autor, 2019.

APÊNDICE D – RELATÓRIO DE ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL AOS 14 DIAS

Tabela D1 - Resumo de ensaio de compressão axial aos 14 dias.

CP	Datas		Dimensões (mm)				h/D	Fator de Correção	F (kgf)	Tipo de Capeamento	Resistência à Compressão (MPa)	Tipo de Ruptura
	Moldagem	Ensaio	D ₁	D ₂	D _m	h						
F0-1	23/01/2019	06/02/2019	100	101,65	100,83	196	1,944	1,000	18600	Retificação	22,85	E
F0-2			100,9	101	100,95	198,5	1,966	1,000	18200		22,31	A
F05-1	25/01/2019	08/02/2019	99,6	100,7	100,15	195	1,947	1,000	17920		22,32	C
F05-2			100	100,1	100,05	193,5	1,934	0,995	16640		20,65	C
F1-1	28/01/2019	11/02/2019	99,6	100,7	100,15	195	1,947	1,000	20320		25,30	E
F1-2			100	100,1	100,05	193,5	1,934	0,986	19360		23,81	C
F2-1	01/02/2019	15/02/2019	100,25	100	100,13	200	1,998	1,000	15800		19,69	E
F2-2			99,8	100,7	100,25	196	1,955	1,000	16880		20,98	E

Fonte: Autor, 2019.

APÊNDICE E – RELATÓRIO DE ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL AOS 28 DIAS

Tabela E1 - Resumo de ensaio de compressão axial aos 28 dias.

CP	Datas		Dimensões (mm)				h/D	Fator de Correção	F (kgf)	Tipo de Capeamento	Resistência à Compressão (MPa)	Tipo de Ruptura
	Moldagem	Ensaio	D ₁	D ₂	D _m	h						
F0-3	23/01/2019	20/02/2019	103,5	99,8	101,65	197,0	1,938	0,995	20760	Retificação	24,97	A
F0-4			100,2	101,2	100,70	197,0	1,956	1,000	20800		25,62	E
F05-3	25/01/2019	22/02/2019	102,2	99,0	100,60	198,5	1,973	1,000	20940		25,84	B
F05-4			100,2	100,1	100,15	200,0	1,997	1,000	20640		25,70	C
F05-5			100,7	100,0	100,35	199,0	1,983	1,000	21000		26,05	C
F05-6			101,8	100,0	100,90	197,5	1,957	1,000	20160		24,73	C
F1-3	28/01/2019	25/02/2019	100,9	100,5	100,70	194,5	1,931	0,995	21120		25,87	C
F1-4			101,8	100,4	101,10	198,5	1,963	1,000	19840		24,24	C
F1-5			100,0	100,8	100,40	197,0	1,962	1,000	21080		26,12	C
F1-6			100,3	100,1	100,20	196,0	1,956	1,000	20640		25,68	C
F2-3	01/02/2019	01/03/2019	99,8	102,2	101,00	195,5	1,936	0,995	20840		25,39	B
F2-4			99,4	100,8	100,10	196,0	1,958	1,000	18720		23,34	B
F2-5			99,1	101,6	100,35	196,0	1,953	1,000	19800	24,56	C	
F2-6			100,0	100,0	100,00	198,5	1,985	1,000	17520	21,88	B	

Fonte: Autor, 2019.

APÊNDICE F – RELATÓRIO DE ENSAIO DE FLEXÃO EM CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS

Tabela F1 - Resumo de ensaio de flexão.

CP	Datas		Dimensões (mm)						Vão entre apoios (mm)	F (kgf)	Resistência à Tração na Flexão (MPa)
	Moldagem	Ensaio	b ₁	b ₂	b _m	d ₁	d ₂	d _m			
F0-9	23/01/2019	20/02/2019	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	450,0	2840,0	3,71
F0-10			150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	450,0	3160,0	4,13
F05-9	25/01/2019	22/02/2019	152,0	153,0	152,5	153,0	154,0	153,5	450,0	3000,0	3,69
F05-10			149,0	150,0	149,5	150,0	151,0	150,5	450,0	3120,0	4,07
F1-9	28/01/2019	25/02/2019	149,0	151,0	150,0	153,0	151,0	152,0	450,0	2160,0	2,75
F1-10			153,0	153,0	153,0	152,0	153,0	152,5	450,0	3120,0	3,87
F2-9	01/02/2019	01/03/2019	156,0	156,0	156,0	154,0	153,0	153,5	450,0	3240,0	3,89
F2-10			153,0	154,0	153,5	154,0	151,0	152,5	450,0	3120,0	3,86

Fonte: Autor, 2019.

**APÊNDICE G – RELATÓRIO DE ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DE ABSORÇÃO, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA
DE CONCRETO ENDURECIDO**

Tabela G1 - Resumo de ensaio de absorção, índice de vazios e massa específica.

CP	Datas		Massas (g)			Absorção (%)	Índice de Vazios (%)	Massa Específica da Amostra Seca (g/cm ³)	Massa Específica da Amostra Saturada (g/cm ³)	Massa Específica Real (g/cm ³)	
	Moldagem	Pesagem Seca	Pesagem Submersa e Saturada	m _s	m _{sub}						m _{sat}
F0-7	23/01/2019			3531,40	2135,40	3690,70	4,51	10,24	2,27	2,37	2,53
F0-8						3550,10	2144,40	3707,80	4,44	10,09	2,27
F05-7	25/01/2019		28/02/2019	3529,40	2133,3	3693,40	4,65	10,51	2,26	2,37	2,53
F05-8						3506,90	2115,8	3670,70	4,67	10,53	2,26
F1-7	28/01/2019			3611,70	2170,9	3741,30	3,59	8,25	2,30	2,38	2,51
F1-8						3524,40	2121,9	3662,40	3,92	8,96	2,29
F2-7	01/02/2019		01/03/2019	3494,70	2094,1	3661,70	4,78	10,65	2,23	2,34	2,50
F2-8						3467,70	2079,9	3640,50	4,98	11,07	2,22

Fonte: Autor, 2019.