

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COECI - COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

RENAN SCHIMIDT PROFETA PANSSONATO

**CONTROLE TECNOLÓGICO DO CONCRETO REFORÇADO COM
FIBRAS DE PET PELO ENSAIO BARCELONA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO
2019

RENAN SCHIMIDT PROFETA PANSSONATO

**CONTROLE TECNOLÓGICO DO CONCRETO REFORÇADO COM
FIBRAS DE PET PELO ENSAIO BARCELONA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, do curso de Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Boabaid Ibrahim

TOLEDO

2019



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Toledo
Coordenação do Curso de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de Nº 233

Controle Tecnológico do Concreto Reforçado com Fibras de PET pelo Ensaio Barcelona

por

Renan Schimidt Profeta Panssonato

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 11:10 h do dia **14 de Novembro de 2019** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Prof. Dr. Carlos Eduardo Tino Balestra
(UTFPR – TD)

Prof. Dr. Gustavo Savaris
(UTFPR – TD)

Prof. Dr. Lucas Boabaid Ibrahim
(UTFPR – TD)
Orientador

Visto da Coordenação
Prof. Dr. Fulvio Nartecio Feiber
Coordenador da COECI

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

AGRADECIMENTOS

Agradecer a Deus por me guiar durante todo esse percurso dentro da graduação. Dando-me sabedoria e força para concluir mais esta etapa de minha vida.

À minha família, excepcionalmente aos meus pais, Lau e Merly, agradeço profundamente o apoio e carinho recebido, não só durante o curso, mas durante toda minha vida. Demonstro minha gratidão também, a minha irmã Mariana que com sua paciência e maior experiência pôde me instruir sobre alguns pormenores deste trabalho.

A família Sá, por me acolher em seu lar e me dar todo o suporte necessário. Por estar longe da minha casa e família, este amparo foi de total diferença para minha ambientação nesta nova fase.

Gostaria de mostrar minha gratidão também ao meu orientador Dr. Lucas Boabaid Ibrahim, o qual teve grande importância para a realização deste trabalho, sanando minhas dúvidas e me auxiliando no mesmo.

Aos técnicos do laboratório de materiais da UTFPR-TD, Wilson Leobet e Marcos Vinicius Schlichting pelo auxílio prestado durante a realização dos ensaios da pesquisa.

Aos meus amigos, Kevin Augusto Cupehinski, João Marcelo Riedi, Ricardo Almeida Ferrarese, Jonathan Luiz Giron e Matheus Ricardo Fioretto agradeço pela amizade que foi adquirida na formação e pela ajuda prestada na realização dos ensaios.

RESUMO

PANSSONATO, Renan S. P. **Controle tecnológico do concreto reforçado com fibras de PET pelo ensaio Barcelona**. 2019. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2019.

O concreto convencional apresenta um comportamento frágil, não resistindo a carga alguma após sua ruptura. Adicionando-se fibras a mistura, verifica-se a alteração deste comportamento, conferindo uma resistência residual e tenacidade ao compósito. Essas propriedades, bem como a alteração na resistência a compressão e resistência a tração do concreto, dependem diretamente do material da fibra utilizada, comprimento, seção e teor de fibra empregado. Na presente pesquisa, é avaliado a influência da fibra de PET (polietileno tereftalato) ao concreto em três diferentes concentrações (0kg/m^3 , $3,5\text{kg/m}^3$ e $7,0\text{kg/m}^3$) com dimensão de $4\times 50\text{mm}$. A incorporação desse tipo de fibra ao concreto visa a redução de material que poderia ser descartado, fazendo sua reutilização em um novo campo. Foram avaliadas as propriedades de trabalhabilidade, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração pelo método Barcelona, resistência residual e tenacidade. O ensaio Barcelona já é um método normatizado na Espanha para obtenção destas propriedades em concretos reforçados com fibras (CRF), mostrando resultados mais consistentes perante ao JSCE-SF4. Os resultados de resistência à compressão obtidos mostraram que a adição das fibras de PET não alterou significativamente essa propriedade. Entretanto, a partir do ensaio Barcelona, aferiu-se uma redução na resistência à tração do compósito com adição das fibras. Além disso, houve incremento de resistência residual e tenacidade com a incorporação das fibras de PET, aumentando cerca de 17% da tenacidade no traço com $7,0\text{kg/m}^3$ de fibra quando comparado com o teor de $3,5\text{kg/m}^3$.

Palavras-chave: concreto reforçado com fibras; fibras de PET; ensaio Barcelona; tenacidade.

ABSTRACT

PANSSONATO, Renan S. P. **Technological control of PET fiber reinforced concrete by the Barcelona test.** 2019. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2019.

Conventional concrete behaves in a fragile way, being unable to withstand any load after its rupture. This behavior changes by adding fibers to the blend, providing residual strength and toughness to the composite. These properties, as well as the change in compressive strength and tensile strength of concrete, depend directly on the fiber material used, length, section and fiber content employed. In the presented research, the influence of PET (polyethylene terephthalate) fiber on concrete is evaluated in three different concentrations (0 kg/m^3 , $3,5 \text{ kg/m}^3$ and $7,0 \text{ kg/m}^3$) with a size of $4 \times 50 \text{ mm}$. The incorporation of this kind of fiber into concrete aims at reducing material that would be discarded, reusing it in a new field. The following properties were evaluated: workability, axial compressive strength, diametral tensile strength, tensile strength by Barcelona test, residual strength and toughness. The Barcelona test is already a standardized method in Spain for obtaining these properties in fiber reinforced concrete (FRC), showing consistent results over JSCE-SF4. The compressive strength results obtained demonstrated that the addition of PET fibers did not change this property. However, from the Barcelona test, a reduction in the tensile strength of the composite with the addition of fibers was verified. In addition, there was an increase in residual strength and toughness with the incorporation of PET fibers, increasing about 17% of toughness in the composite with $7,0 \text{ kg/m}^3$ of fiber compared to the $3,5 \text{ kg/m}^3$ content.

Keywords: fiber reinforced concrete; PET fiber; Barcelona test; toughness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Comportamento ao carregamento do concreto reforçado e não reforçado com fibras.....	16
Figura 2: Tipos de fibras de aço.....	19
Figura 3: Fissuração em concreto reforçado e não reforçado com fibras.....	21
Figura 4: Representação dos componentes necessários para o ensaio de flexão de prismas.....	22
Figura 5: Curva Carregamento x Deformação.....	23
Figura 6: Ensaio de Duplo Puncionamento.....	24
Figura 7: Gráfico de representação dos três estágios de a) Carregamento x TCO, b) Carga x Deslocamento vertical.....	26
Figura 8: Modelo proposto de estudo e parâmetros utilizados.....	27
Figura 9: Modelo de análise do ensaio Barcelona.....	28
Figura 10: Fluxograma da metodologia adotada.....	31
Figura 11 - Fibras de PET produzidas manualmente utilizadas na pesquisa.....	34
Figura 12 - Filetador utilizado para fabricação das fibras.....	35
Figura 13 - Corpos de prova com desmoldante.....	36
Figura 14 - Slump test traço (a) R (b) CRF1 e (c) CRF2.....	41
Figura 15 – Resultados de resistência à compressão axial dos três traços com desvio padrão.....	43
Figura 16 - Ensaio (a) Tração por compressão diametral (b) Barcelona.....	44
Figura 17 – Planos de rupturas pelo ensaio de tração por compressão com concreto (a) sem fibras (b) com fibras.....	47
Figura 18 – Resistência a tração por compressão diametral e pelo ensaio Barcelona dos três traços.....	48
Figura 19 – Corpo de prova rompido pelo ensaio Barcelona (a) três planos de rompimento (b) quatro planos de rompimento.....	48
Figura 20 – Cunha cônica formada no corpo de prova pelo ensaio Barcelona.....	49
Figura 21 - Comparação entre os pares dos traços de resistência a tração pelo ensaio Barcelona.....	50
Figura 22 – Evidência do arrancamento das fibras da matriz.....	52
Figura 23 – Curva Carregamento x Deformação para o traço R.....	53

Figura 24 – Curva Carregamento x Deformação para o traço CRF1	53
Figura 25 – Curva Carregamento x Deformação para o traço CRF2	54
Figura 26 – Curva Carregamento x TCOD para o traço CRF1.....	55
Figura 27 – Curva Carregamento x TCOD para o traço CRF2.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade de material em kg utilizado para produção de 40L de concreto para cada teor de fibras	30
Tabela 2 - Caracterização dos materiais utilizados	40
Tabela 3 - Resistência à compressão axial referente ao traço R	41
Tabela 4 - Resistência à compressão axial referente ao traço CRF1	42
Tabela 5 – Retirada do CP4 do traço CRF1	42
Tabela 6 - Resistência à compressão axial referente ao traço CRF2	42
Tabela 7 - Resultado ANOVA de resistência à compressão axial para diferentes teores de fibras de PET	43
Tabela 8 - Resistência à tração por compressão diametral referente ao traço R.....	44
Tabela 9 - Resistência à tração pelo ensaio Barcelona referente ao traço R.....	45
Tabela 10 – Retirada do CP7 do ensaio Barcelona referente ao traço R.....	45
Tabela 11 - Resistência à tração por compressão diametral referente ao traço CRF1	45
Tabela 12 - Resistência à tração pelo ensaio Barcelona referente ao traço CRF1 ...	45
Tabela 13 - Resistência à tração por compressão diametral referente ao traço CRF2	46
Tabela 14 - Resistência à tração pelo ensaio Barcelona referente ao traço CRF2 ...	46
Tabela 15 - Resultado ANOVA de resistência à tração por compressão diametral para diferentes teores de fibras de PET	49
Tabela 16- Resultado ANOVA de resistência à tração pelo ensaio Barcelona para diferentes teores de fibras de PET	50
Tabela 17 - Teste Tukey de resistência à tração pelo ensaio Barcelona	50
Tabela 18 - Tenacidade dos corpos de prova para o traço CRF1	56
Tabela 19 - Tenacidade dos corpos de prova para o traço CRF2.....	56
Tabela 20 - Resistência residual em 1,0mm para o traço CRF1	57
Tabela 21 - Resistência residual em 1,0mm para o traço CRF2	57
Tabela 22 - Resistência residual em 4,0mm para o traço CRF1	57
Tabela 23 - Resistência residual em 4,0mm para o traço CRF2	58

LISTA DE SÍMBOLOS

σ_b	Resistência à flexão
P	Carga máxima aplicada
l	Comprimento do vão
b	Largura do corpo de prova
h	Altura do corpo de prova
FT	Fator de tenacidade
Tb	Tenacidade
δ_{tb}	Deformação de L/150 do vão
f_t	Resistência à tração pelo ensaio Barcelona
a	Diâmetro do disco de aço
$f_{t,TCOD}$	Resistência residual a um referente TCOB
P_{TCOD}	Carga aplicada em determinado TCOB
n	Número de fissuras radiais
l	Comprimento da cunha formada
δ	Deslocamento vertical no ponto calculado
F_{cr}	Força máxima aplicada
δ_{cr}	Deslocamento no ponto de carga máxima
$F_{R,0}$	Força aplicada no ponto de resistência residual
$\delta_{R,0}$	Deslocamento vertical no ponto de resistência residual
w_{nbn}	Abertura média da fissura do ensaio de flexão
w_{bcn}	Abertura média da fissura no ensaio Barcelona
θ	Ângulo de rotação do corpo de prova
ds	Densidade do agregado graúdo SSS
ms	Massa da amostra seca ao ar
ma	Massa da amostra obtida na balança hidrostática
me	Massa específica da areia
f_c	Resistência à compressão
$f_{ct,sp}$	Resistência à tração por compressão diametral

LISTA DE SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i> – Instituto Americano de Concreto
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i> – Análise de Variância
CRF	Concreto Reforçado com Fibras
DMC	Dimensão Máxima Característica
JSCE	<i>Japanese Society of Civil Engineers</i> – Sociedade Japonesa de Engenheiros Civis
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i> – Transformador Diferencial Variável Linear
MF	Módulo de Finura
NBR	Norma Brasileira
PET	Polietileno Tereftalato
SSS	Saturado de Superfície Seca
TCOD	<i>Total Circumferential Opening Displacement</i> – Abertura Circunferencial Total
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 JUSTIFICATIVA	13
1.2 OBJETIVO GERAL	14
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 CONCRETO	15
2.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS	15
2.2.1 Trabalhabilidade	15
2.2.2 Tenacidade	16
2.2.3 Resistência a Compressão Uniaxial	17
2.2.4 Resistência a Tração	17
2.4 PROPRIEDADES DO PET.....	18
2.5 TIPOS DE FIBRAS.....	18
2.6 MICROFIBRA E MACROFIBRA.....	20
2.7 INTERAÇÃO FIBRA-MATRIZ	20
2.8 ENSAIO DE FLEXÃO DE PRISMAS.....	21
2.9 ENSAIO DE DUPLO PUNÇONAMENTO	23
2.10 COMPARAÇÃO ENTRE O ENSAIO BARCELONA E ENSAIO DE FLEXÃO ...	27
3. MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1 MATERIAIS	29
3.1.1 Cimento	29
3.1.2 Agregados	29
3.1.3 Traço do concreto	29
3.2 MÉTODOS	30
3.2.1 Dosagem do concreto	31
3.2.2 Agregados	32
3.3 FIBRAS DE PET	34
3.4 MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA	35
3.5 ENSAIO DE CONSISTÊNCIA	37
3.6 ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO	37
3.7 ENSAIO DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	38

3.8 ENSAIO DE DUPLO PUNÇIONAMENTO	38
3.9 TRATAMENTO DE DADOS	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....	40
4.2 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS	40
4.2.1 Trabalhabilidade	40
4.2.2 Resistência à compressão axial	41
4.2.3 Resistência à tração.....	44
4.2.4 Tenacidade.....	52
5. CONCLUSÃO	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61
APÊNDICE A	64

1. INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais comuns no meio da construção civil. Sua plasticidade no estado fresco garante fácil aplicação e quando endurecido possui boa resistência. Além disso, os materiais constituintes são de fácil acesso e baixo custo comercial, dando mais acesso a este composto no mercado (LI, 2011).

As pesquisas por novas tecnologias para solucionar certos problemas ocorre em todas as áreas profissionais, dentro da engenharia civil não seria diferente. Pesquisadores desta área tentam encontrar novos materiais para melhorar algumas características do concreto, tornando-o mais acessível e resistente.

O concreto reforçado com fibras (CRF) seria um dos exemplos de pesquisa e aplicação de novos materiais. A adição das fibras confere, principalmente, em um ganho de resistência residual, resistência a fadiga e controle de fissuração da mistura, podendo também aumentar sua resistência a compressão e tração. Existem fibras de vários tipos, como: aço, fibras sintéticas, naturais e vidro, por exemplo. Cada tipo de fibra possui uma aplicação, conferindo características específicas à mistura.

A grande difusão do material PET pelo mundo, torna este tipo de fibra de fácil obtenção e custo extremamente baixo. Além disso, sabemos que uma boa parte das garrafas plásticas não são recicladas, ocorrendo desperdício de material e poluição do globo. Portanto, encontrar uma nova aplicação deste material é importante, uma vez que seria possível reduzir o desperdício e permitiria a reutilização do PET na construção civil.

Estudos mostram que o comportamento pós rompimento do CRF é diferente do observado em concreto sem reforço. O concreto com fibras resiste ao esforço mesmo após sua fissuração, isto ocorre devido a transferência de tensões da matriz para as fibras que passam a suportar a carga aplicada, conferindo ao concreto um comportamento menos frágil.

Um dos métodos mais utilizados para o controle tecnológico do concreto reforçado com fibras no Brasil é o ensaio de flexão de prismas. A necessidade de utilização de vigas de ensaio, eleva o consumo de material, como também a utilização do transdutor LVDT para medir a deformação, torna este ensaio de certa

complexidade (FIGUEIREDO, 2011).

Como alternativa, Chen (1970) desenvolveu um ensaio chamado de ensaio de duplo puncionamento ou ensaio Barcelona. Este ensaio utiliza-se de corpos de prova de menor dimensão, discos de aço e uma prensa. Para aferir a deformação do elemento, Pujadas *et al.* (2013) relacionaram o deslocamento vertical da prensa com a abertura circunferencial do corpo de prova, descartando o uso de um extensômetro circunferencial.

Para o estudo em questão, serão feitos corpos de prova com concreto de referência e concreto reforçado com fibras de PET. Para avaliar a influência desse tipo de fibras no compósito, foram realizados ensaios de compressão axial, tração por compressão e o ensaio Barcelona.

1.1 JUSTIFICATIVA

O PET é bastante difundido pelo mundo, sendo usado, especialmente, em garrafas de refrigerante. Ou seja, este tipo de material é de fácil acesso e encontrado em abundância. Portanto, quanto maior acervo sobre a aplicabilidade deste material na construção civil, seria mais uma válvula de escape para a redução na poluição e um novo material inserido na área de engenharia.

Entretanto, a utilização do CRF no Brasil ainda é utilizada em pequena escala. Este fator se deve a complexidade de realização para o controle tecnológico deste tipo de concreto. Este controle, normalmente, é feito por ensaio de flexão de prismas, o qual exige certa experiência para sua correta realização e demanda materiais específicos, dificultando sua execução (FIGUEIREDO, 2011).

Nesse contexto, é interessante avaliar a aplicação de um material reciclável como reforço ao concreto, bem como validar a dispersão dos dados obtidos por um outro tipo de ensaio, visando sua maior inserção para controle tecnológico do CRF. Desta forma, o ensaio Barcelona entra em destaque, uma vez que possui menor complexidade de realização, podendo facilitar a maior utilização do concreto reforçado com fibras na construção civil.

1.2 OBJETIVO GERAL

Tendo como objetivo geral, este trabalho visa a utilização do ensaio Barcelona para controle tecnológico do concreto reforçado com fibras de PET.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Avaliar a influência da fibra PET na consistência da mistura;
- Verificar a resistência a compressão axial, tração por compressão diametral do concreto reforçado com fibras de PET;
- Comparar os resultados obtidos pela tração por compressão diametral e o ensaio de duplo puncionamento;
- Avaliar a influência do teor das fibras de PET na tenacidade e resistência residual do concreto pelo ensaio Barcelona.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCRETO

O concreto se dá pela mistura do cimento Portland, com agregados e água. Os agregados são subdivididos em dois grupos: agregado graúdo e miúdo, normalmente usadas as pedras britas e areia, respectivamente. A proporção de cada compósito, chamada de traço, é definida pela finalidade do concreto e pela propriedade mecânica que se deseja alcançar. Ainda pode-se colocar aditivos nas misturas, como o superplastificante, por exemplo, para que melhore a trabalhabilidade do concreto (LI, 2011).

A fim de que o concreto possua diferentes características para diferentes funções, tem sido utilizada a adição de fibras a mistura. Essa adição confere mudanças no comportamento da mistura tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Este tipo de concreto está sendo cada vez mais utilizado, e atualmente é empregado em pavimentos, túneis e estruturas com carregamentos cíclicos (FIGUEIREDO, 2000).

2.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS

2.2.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade do concreto é definida como o esforço e a facilidade em manipular a mistura de concreto. A importância desta propriedade está diretamente relacionada com sua resistência e durabilidade. Não há um método universal para medir a trabalhabilidade do concreto, entretanto é usado o slump-test para mensurar a consistência do concreto (LI, 2011).

Este ensaio é realizado a partir do uso de tronco de cone de Abrams. O concreto é inserido dentro deste cone e compactado em camadas. Após realizado este procedimento, o tronco é então retirado e é aferido o valor do abatimento do concreto. Quanto maior o valor do abatimento obtido, menor é a consistência do concreto.

De acordo com Figueiredo (2011), as fibras alteram a consistência do concreto e, conseqüentemente, sua trabalhabilidade. A redução na plasticidade da mistura é

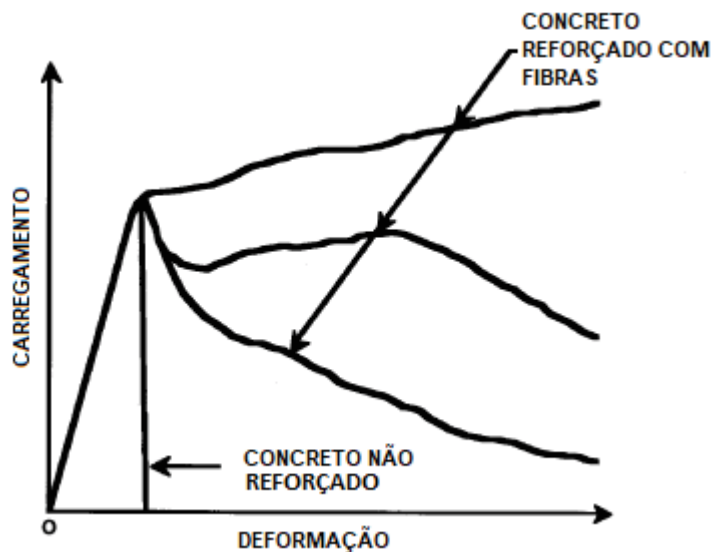
reduzida pela dificuldade da movimentação dos compósitos com a fibra em seu meio. Outro fator, seria a área superficial adicionada a mistura, sendo necessária água de molhagem para esta superfície, o que resultaria em maior coesão entre os compósitos do concreto. Estes fatores tem relação direta com o tipo da fibra, sua geometria e teor.

2.2.2 Tenacidade

“Esta propriedade representa a capacidade que o material possui em absorver energia até sua ruptura. É definida como a área sob a curva do gráfico tensão x deformação” (CALLISTER, 2002).

Conforme destaca ACI 544.1R-96 (1996), a incorporação das fibras sintéticas em maiores teores (0,4% a 0,7% do volume de concreto) acarretam em um aumento significativo da tenacidade pós ruptura da matriz. A Figura 1, apresenta esta característica do concreto reforçado com fibras (CRF).

Figura 1: Comportamento ao carregamento do concreto reforçado e não reforçado com fibras



Fonte: Adaptado de ACI 544.1R-96 (1996).

Para a obtenção da tenacidade do concreto reforçado com fibras, existem diferentes metodologias aplicáveis. Os mais utilizados são feitos com corpos de prova prismáticos submetidos a flexão em quatro pontos (FIGUEIREDO, 2000).

2.2.3 Resistência a Compressão Uniaxial

A adição das fibras ao concreto não objetiva o aumento de resistência a compressão axial, sendo esta uma característica secundária. Um dos possíveis fatores para redução da resistência a compressão seria a má compactação da mistura, devido a menor trabalhabilidade do concreto com fibras (FIGUEIREDO, 2000).

A resistência a compressão é alterada significativamente quanto maior o teor de PET do compósito. A adição de 5% de fibra resultou em uma redução a resistência a compressão de 33%. Para teores ainda maiores, como 15% de fibra, essa redução chegou a 63% (SCHETTINO, 2015).

A adição de fibras de aço com 0,5% e 1,0% resultaram reduções de resistência a compressão. Entretanto, apenas o concreto com adição de 1,0% obteve redução significativa de resistência, sendo esta de 12,4%. Esta redução é atribuída ao alto fator de forma da fibra utilizada, a qual pode ter favorecido a orientação das fibras serem paralelas a força aplicada (LANZARIN, 2018).

2.2.4 Resistência a Tração

A adição de fibras em teores mais baixos (menor que 1%) ao concreto, não resulta em um ganho expressivo na resistência a tração. O ganho nesta adição está no aumento significativo de tenacidade, durabilidade, resistência a fadiga e ao impacto. O aumento da resistência a tração do compósito é alcançado em teores maiores de adição de fibra. (ACI 544.1R-96, 1996).

Para adições de 5% de fibra de PET, o aumento a resistência de tração por compressão diametral, em relação ao concreto sem reforço, foi significativo, cerca de 67%. A resistência foi elevada ainda mais quando realizado o ensaio com espécimes com maior teor da fibra (SCHETTINO, 2015).

Na pesquisa realizada por Lanzarin (2018), o aumento da resistência a tração obtida no ensaio Barcelona, pela adição de fibras de aço em porcentagens de 0,5% e 1,0%, mostrou-se insignificante quando comparado ao concreto sem adição das fibras.

2.4 PROPRIEDADES DO PET

O Polietileno Tereftalato ou PET, é um polímero termoplástico da família dos poliésteres. Este polímero tem alta resistência ao impacto e é inerte. Possuindo uma excelente barreira para gases e odores. Por isso, é bastante utilizado no mercado como embalagem para conter diversos produtos com higiene e segurança (ABIPET, 2012).

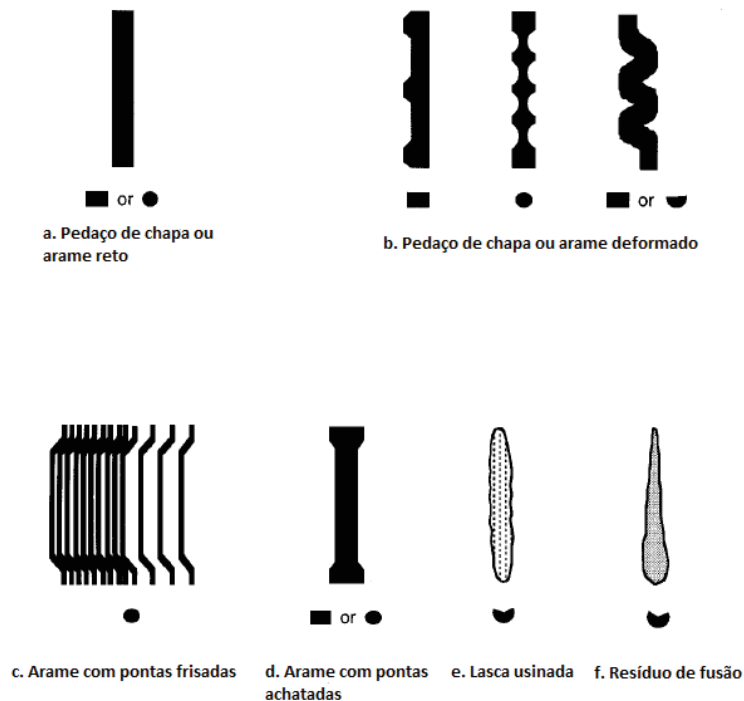
Este polímero pode ser transparente, em seu estado amorfo, ou translúcido em estado semicristalino. Estas duas vertentes do material dependem do seu processo de fabricação e tratamento térmico. O PET pode ser semirrígido ou rígido dependendo da sua espessura. Este material é encontrado em diversas aplicações, como: fibras, peças automotivas e películas de janela (LEPPOITTEVIN; ROGER, 2011).

2.5 TIPOS DE FIBRAS

Segundo a ACI 544.1R-96 (1996), há quatro diferentes tipos de fibras adicionadas ao concreto para conferir-lhe distintas propriedades. São elas: fibras de aço, de vidro, sintéticas e naturais.

As fibras de aço utilizadas como reforço no concreto são classificadas como curtas, possuindo um fator forma (comprimento/diâmetro) entre 20 a 100 e encontrado com diferentes formas (Figura 2).

Figura 2: Tipos de fibras de aço



Fonte: Adaptado de ACI 544.1R-96 (1996).

Já as fibras de vidro, no início de seu uso, existiam apenas as fibras do tipo “A” e tipo “E”, essas fibras perdiam resistência no decorrer do tempo, pois não suportavam a alta alcalinidade da matriz do cimento. Após pesquisas, foi desenvolvida a fibra AR (alkali resistant), um novo tipo de fibra de vidro resistente a alcalinidade, que promoveu a durabilidade a longo prazo (ACI 544.1R-96, 1996).

As fibras naturais podem ser não processadas ou processadas. As fibras naturais não processadas estão disponíveis em maiores quantidades e representam um recurso renovável. São fibras naturais não processadas: fibra de coco, sisal, bagaço de cana, bambu, juta, madeira e fibras vegetais (ACI 544.1R-96, 1996).

Quanto as fibras sintéticas, existem diversos tipos dessa fibra, como as acrílicas, poliamida, carbono, nylon, polietileno, polipropileno e poliéster. A fibra utilizada na presente pesquisa é do tipo poliéster, denominado de polietileno tereftalato, encontrado em garrafas de refrigerante, também chamadas de “PET”. Por serem termoplásticos são sensíveis a elevadas temperaturas, alterando suas características (ACI 544.1R-96, 1996).

2.6 MICROFIBRA E MACROFIBRA

Segundo Purnell (2010), existem as microfibras e as macrofibras para o reforço do concreto. As microfibras não costumam ser como um único filamento, sendo normalmente agrupadas. Por serem agrupadas, nem todas as fibras entram em contato direto com a mistura, dando flexibilidade ao conjunto de fibras. São classificadas como microfibras, filamentos com diâmetro menor que 0,1mm.

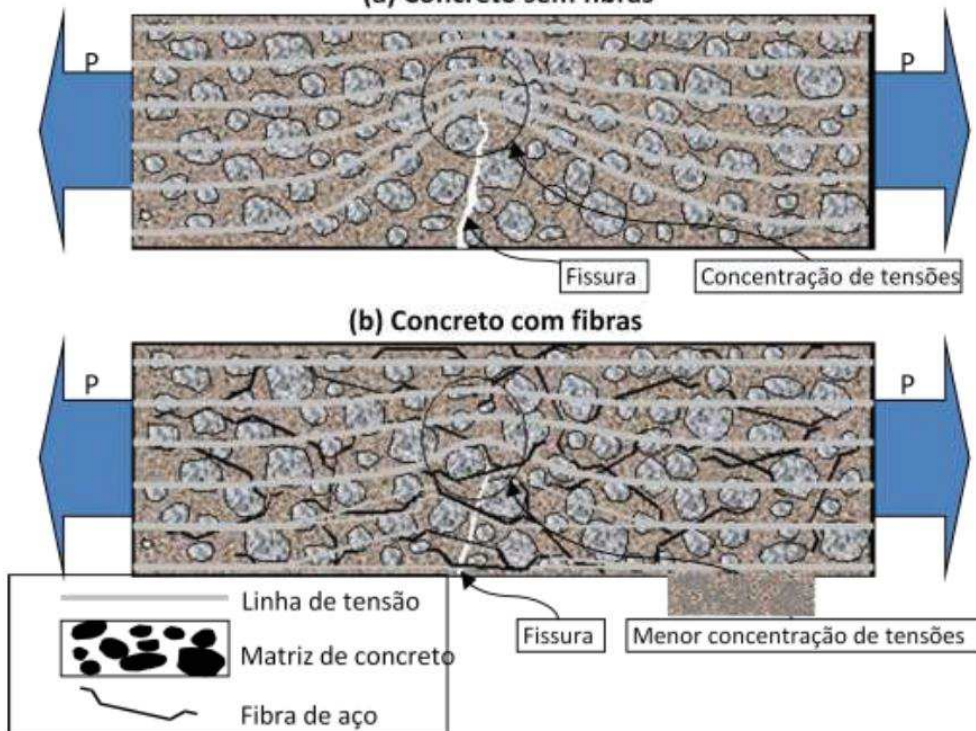
A situação da macrofibra é diferente, visto que a matriz do concreto permeia toda sua extensão, conferindo maior aderência da fibra ao concreto. Por não possuírem qualquer ligação entre os monofilamentos, as fibras ficam mais dispersas. As macrofibras são utilizadas regularmente com as fibras de aço e poliméricas e possuem diâmetro maior que 0,1mm (PURNELL, 2010).

2.7 INTERAÇÃO FIBRA-MATRIZ

O concreto não reforçado com fibras, quando submetido a tensão, inicia-se o processo de fissuração. As fissuras começam a aparecer, tornando-se um obstáculo para a propagação das tensões, ocorrendo as concentrações de tensões. A fissura é estendida até que as tensões concentradas sejam maiores que a resistência do concreto. Este processo ocorre até o completo rompimento da peça, caracterizando o comportamento frágil do concreto (FIGUEIREDO, 2000).

Já o processo de fissuração no CRF é diferente. A concentração de tensões é reduzida na extremidade da fissura, devido a dispersão das tensões provocadas pelas fibras. Portanto, é presenciada uma maior quantidade de fissuras no elemento, entretanto apresentam menor largura. Após a fissuração da matriz, a fibra passa a resistir a tensão, caracterizando um comportamento pseudo-dúctil do elemento (Figura 3). O rompimento do compósito fibroso depende da resistência a ruptura da fibra ou ao arrancamento. A resistência da fibra ao arrancamento da matriz está diretamente relacionada com seu fator forma (comprimento/diâmetro), sua geometria e tipo de material (FIGUEIREDO, 2000).

Figura 3: Fissuração em concreto reforçado e não reforçado com fibras
(a) Concreto sem fibras



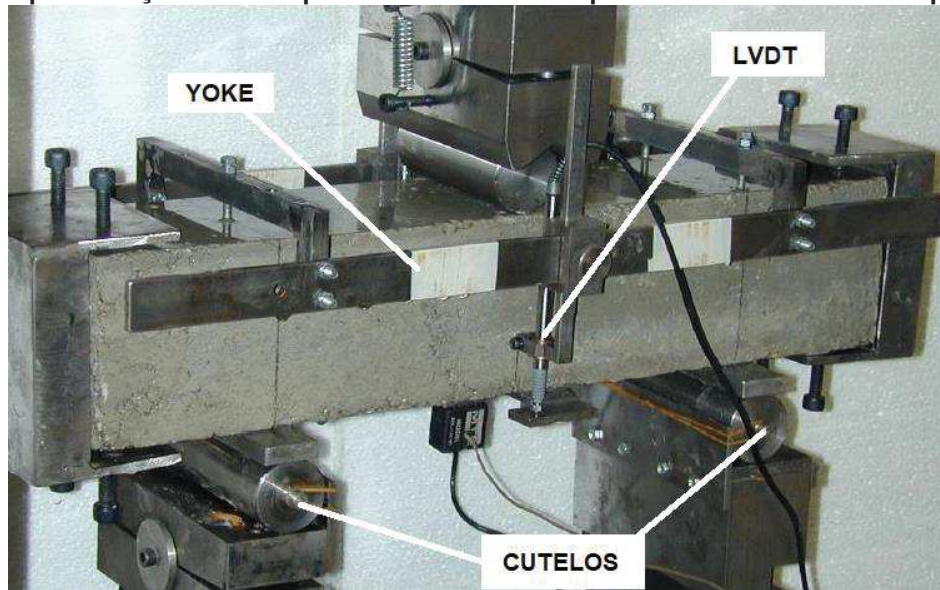
Fonte: FIGUEIREDO (2011).

2.8 ENSAIO DE FLEXÃO DE PRISMAS

Com diferentes tipos de ensaios de flexão de prismas, o JSCE-SF4 é o mais utilizado no Brasil para obtenção da resistência a tração na flexão do CRF. É possível, também, obter a tenacidade do material a partir da área abaixo da curva tensão x deformação (FIGUEIREDO, 2011).

O corpo de prova deste ensaio possui dimensão de 10x10x40cm, com 30cm de vão ou 15x15x50cm, com 45cm de vão. Para aferir a deformação do corpo de prova com a aplicação de carga, é necessário o uso de um transdutor do tipo LVDT, apoiado em um suporte denominado “yoke” (FIGUEIREDO, 2011). A Figura 4, a seguir, ilustra esse ensaio.

Figura 4: Representação dos componentes necessários para o ensaio de flexão de prismas



Fonte: Adaptado de AIRE; AGUADO; MOLINS (2013)

Para o cálculo da resistência a tração na flexão é utilizada a Equação 1:

$$\sigma_b = \frac{P \times l}{b \times h^2} \quad (1)$$

Onde:

σ_b = Resistência a flexão (MPa);

P = Carga máxima aplicada (N);

l = Comprimento do vão (mm);

b = Largura do corpo de prova (mm);

h = Altura do corpo de prova (mm).

Nesse ensaio é obtido também o fator de tenacidade (Equação 2), a partir da área abaixo da curva tensão x deformação (Figura 5) até a deformação máxima usada de acordo com o vão utilizado (L), a deformação máxima considerada é dada por L/150 (JSCE-SF4, 1984).

$$FT = \frac{Tb}{\delta_{tb}} \times \frac{l}{b \times h^2} \quad (2)$$

Onde:

FT = Fator de tenacidade (MPa);

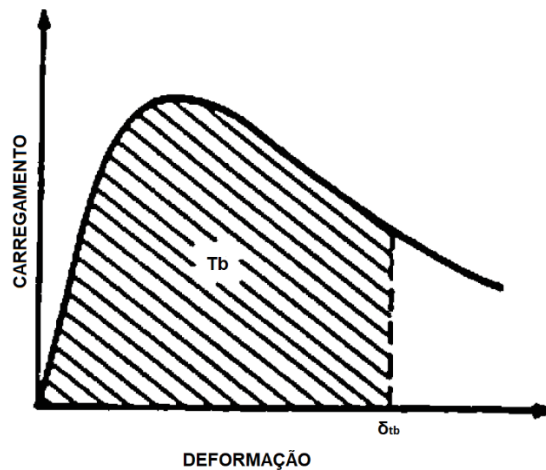
Tb = Tenacidade (J);

δ_{tb} = Deformação de L/150 do vão (mm);

b = Largura do corpo de prova (mm);

h = Altura do corpo de prova (mm).

Figura 5: Curva Carregamento x Deformação



Fonte: Adaptado de JSCE-SF4 (1984).

Uma crítica a este ensaio é a instabilidade pós pico, obtida assim que há o rompimento da matriz do concreto. Com a fissuração do concreto, a carga aplicada é transferida as fibras, as quais acabam sofrendo grandes deformações, levando a um impacto ao LVDT. Este processo ocasiona uma descontinuidade na formação da curva tensão x deformação, resultando em elevados coeficientes de variação para um grupo de corpos de prova. (FIGUEIREDO, 2000).

2.9 ENSAIO DE DUPLO PUNÇIONAMENTO

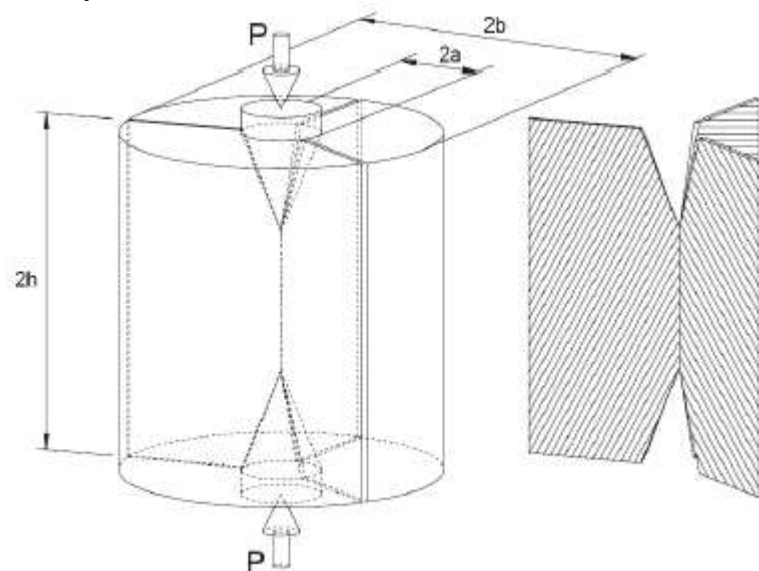
Este ensaio veio como alternativa de controle tecnológico do CRF ao ensaio de flexão em vigas. De realização simples e similar ao ensaio de tração pelo método brasileiro, o ensaio de duplo puncionamento foi proposto por Chen (1970).

Baseado no ensaio de duplo puncionamento, Aguado *et al.* (2005) realizaram uma pesquisa na Universidade Politécnica de Catalunha, desenvolvendo o ensaio Barcelona. Este ensaio é validado na Espanha pela norma AENOR UNE 83515 para

obtenção da resistência a tração, ductilidade e resistência residual do CRF (AIRE; AGUADO; MOLINS, 2013).

Para realização deste ensaio, utilizam-se corpos de prova cilíndricos (15x15cm) que são alocados na prensa com sua face circular voltada para cima, então é colocado um disco de metal ($\varnothing 3,75\text{cm}$) em cada extremidade do corpo de prova. A carga aplicada ao corpo de prova deve ser controlada, com valor de 0,5 mm/min. Deve ser acoplado um extensômetro ao corpo de prova para aferir a abertura circunferencial do corpo de prova (TCOD). (AIRE; AGUADO; MOLINS, 2013). É possível ver algumas dessas características do ensaio na Figura 6, a seguir:

Figura 6: Ensaio de Duplo Puncionamento



Fonte: AIRE; AGUADO; MOLINS (2013).

A partir da compressão, formam-se duas cunhas de formato cônico na parte superior e inferior do elemento, que induzem a tração. As fissuras se dão de forma radial, podendo romper em mais de dois planos (AIRE; AGUADO; MOLINS, 2013). Diferentemente do ensaio de tração por compressão diametral, os planos de rompimento do corpo de prova não são predefinidos pelo posicionamento do corpo de prova na prensa e ocorrem onde a interação fibra-matriz são mais frágeis. Logo, os resultados obtidos no ensaio Barcelona são mais precisos (CHEN, 1973).

Através de estudos experimentais, Saludes *et al.* (2007), a partir do modelo de bielas e tirantes, desenvolveram a Equação 3 para calcular a resistência a tração do CRF:

$$f_t = \frac{4 \times P}{9 \times \pi \times a \times H} \quad (3)$$

Onde:

F_t = Resistência à tração pelo ensaio Barcelona (MPa);

P = Carga máxima resistida (N);

a = Diâmetro do disco de aço (mm);

H = Altura do corpo de prova (mm).

Para o cálculo da resistência residual é usada a Equação 4, prescrita na norma AENOR UNE 83515 referente a um TCOB.

$$f_{t,TCOD} = \frac{4 \times P_{TCOD}}{9 \times \pi \times a \times H} \quad (4)$$

Onde:

$F_{t,TCOD}$ = Resistência residual a um referente TCOB (MPa);

P_{TCOD} = Carga aplicada em determinado TCOB (N);

a = Diâmetro do disco de aço (mm);

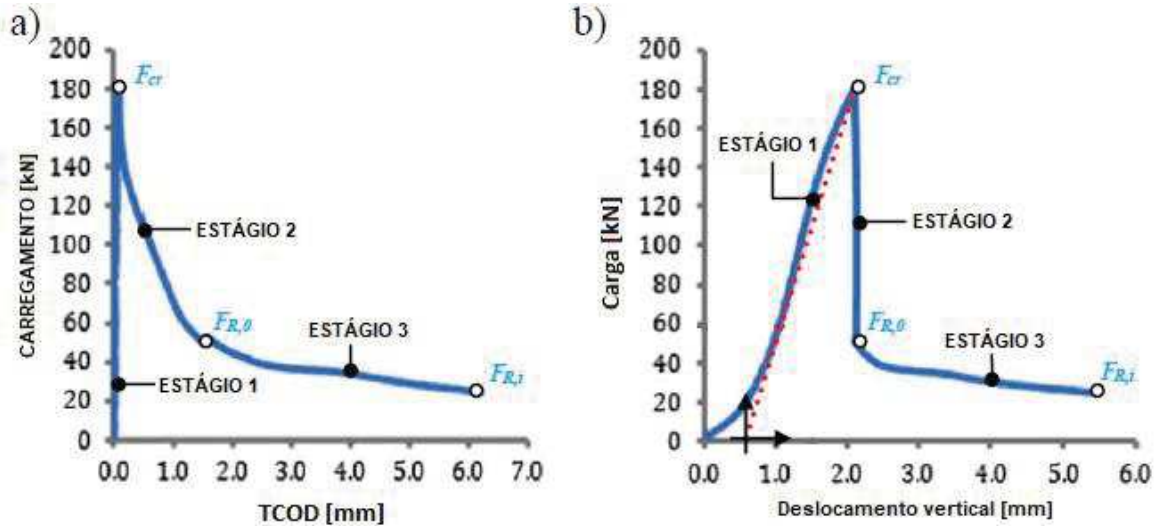
H = Altura do corpo de prova (mm).

A obtenção do TCOB é o único fator que torna este ensaio não tão simples, pois é necessário o uso de um extensômetro circunferencial, o qual não é facilmente encontrado em muitos laboratórios. Para solucionar este problema, Pujadas *et al.* (2013) propuseram o estudo do ensaio Barcelona em três diferentes estágios para obtenção de TCOB a partir do deslocamento vertical da prensa, demonstrado na Figura 7.

- Estágio 1: Seria quando a prensa começa a exercer a força de compressão e não ocorre qualquer deformação do corpo de prova, até o início das fissuras radiais do corpo de prova e atinge o valor limite de carga (F_{cr}).
- Estágio 2: Ocorre quando a matriz do concreto passa a resistir ao esforço de tração, com fissuras radiais e formação das rupturas cônicas nas faces circulares.

- Estágio 3: A matriz do concreto já foi rompida e o esforço de tração é totalmente resistido pelas fibras da mistura.

Figura 7: Gráfico de representação dos três estágios de a) Carregamento x TCOD, b) Carga x Deslocamento vertical



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

A partir deste estudo, formularam-se as Equações 5 a 7 para transformação do deslocamento vertical para o TCOD:

$$TCOD = 0 \quad \delta \leq \delta_{cr} \quad (5)$$

$$TCOD = n \times \frac{a\delta_{r,0}}{2l} \times \text{sen} \frac{\pi}{n} \times \left(1 - \frac{F_{r,0}}{F_{cr}}\right) \quad \delta_{cr} < \delta < \delta_{R,0} \quad (6)$$

$$TCOD = n \times \frac{a}{2l} \times \text{sen} \frac{\pi}{n} \times \left(\delta - \delta_{cr} + \delta_{r,0} \left(1 - \frac{F_{r,0}}{F_{cr}}\right)\right) \quad \delta \geq \delta_{R,0} \quad (7)$$

Onde:

n = Número de fissuras radiais;

a = Diâmetro dos discos de aço;

l = Comprimento da cunha formada;

F = Força aplicada no ponto calculado;

δ = Deslocamento vertical no ponto calculado;

F_{cr} = Força máxima aplicada;

δ_{cr} = Deslocamento no ponto de carga máxima;

$F_{R,0}$ = Força aplicada no ponto de resistência residual;

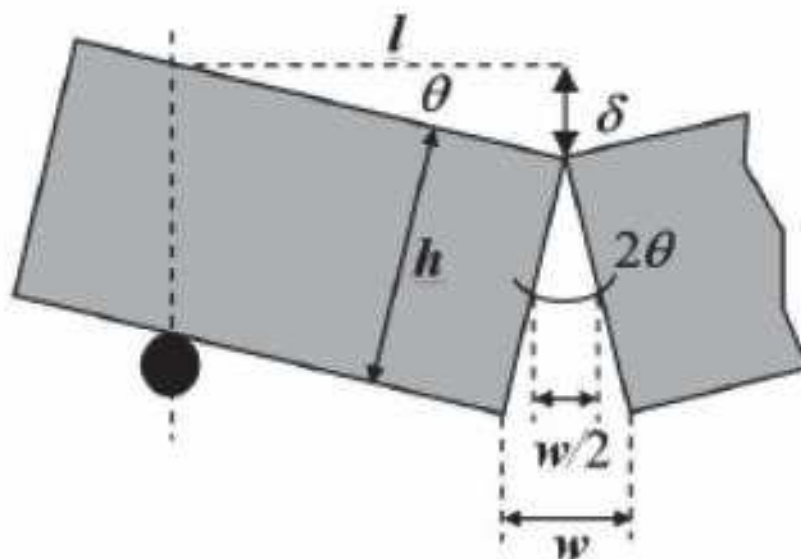
$\delta_{R,0}$ = Deslocamento vertical no ponto de resistência residual.

Posto isso, fica claro a simplicidade deste tipo de ensaio quando comparado ao ensaio de flexão de prismas. A quantidade de material necessário, tanto quanto a complexidade para realização do ensaio é totalmente reduzida no ensaio Barcelona, mostrando sua viabilidade e reprodutibilidade. Além disso, Nogueira *et al.* (2017) chegaram à conclusão de que seis corpos de prova para realização do ensaio Barcelona são suficientes para determinação confiável de valores de dispersão de dados.

2.10 COMPARAÇÃO ENTRE O ENSAIO BARCELONA E ENSAIO DE FLEXÃO

Para fim de validação do ensaio Barcelona, Saludes *et al.* (2007) estabeleceram uma correlação entre este ensaio e o ensaio de flexão de prismas da norma belga NBN B 15-238 (NBN, 1992), similar ao ensaio JSCE-SF4. A comparação é feita entre a abertura circunferencial do elemento no ensaio Barcelona e da fissura no elemento em flexotração. O modelo proposto por Saludes *et al.* (2007) está apresentado na Figura 8 que segue:

Figura 8: Modelo proposto de estudo e parâmetros utilizados



Fonte: Molins *et al.* (2009)

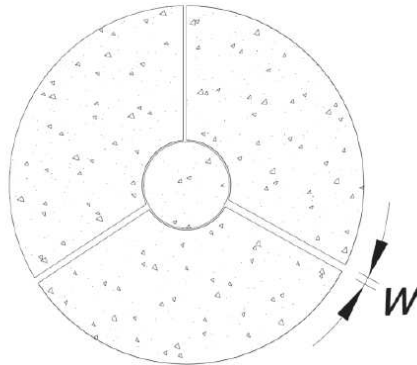
A suposição é realizada com uma única fissura no centro da viga de ensaio. Os parâmetros utilizados são: “h” como altura do corpo de prova, “w/2” ou “w_{nbn}” é a abertura média da fissura, “l” é a metade do comprimento total do vão, “δ” a deformação vertical e “θ” o ângulo de rotação do corpo de prova. A partir da análise geométrica formulou-se a Equação 8:

$$\theta = \frac{\delta}{l} = \frac{w}{2h} \longrightarrow w_{nbn} = \frac{h}{l} \times \delta \quad (8)$$

Para o ensaio Barcelona, foi proposto que haveria o rompimento em três planos radiais, com aberturas iguais (w_{bcn}) e que estes estariam distanciados igualmente (Figura 9), obtendo a Equação 9:

$$TCOD = 3 \times w_{bcn} \quad (9)$$

Figura 9: Modelo de análise do ensaio Barcelona



Fonte: AIRE; AGUADO; MOLINS (2013).

Finalmente, sendo igualada as duas larguras de fissuras, é possível ter a relação entre a deformação dos dois ensaios:

$$w_{nbn} = \frac{h}{l} \times \delta = w_{bcn} = \frac{TCOD}{3} \quad (10)$$

Sendo os valores das dimensões da viga de flexão inseridos na fórmula, com “h” de 15cm e “l” de 22,5cm, a relação entre a abertura total do corpo de prova no ensaio Barcelona e a deformação da viga na flexão de prisma é de 2:1.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão apresentados os materiais necessários e as técnicas utilizadas para a realização dos ensaios. Está contido também, o traço do concreto empregado, bem como suas características.

As propriedades do concreto, como caracterização de seus agregados e resistência a compressão, tração por compressão e o ensaio Barcelona foram realizados no Laboratório de Materiais da UTFPR-TD.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado na presente pesquisa foi adquirido em estabelecimento comercial local, sendo este o CP II Z – 32 da marca VOTORANTIN.

3.1.2 Agregados

Como agregado graúdo utilizou-se apenas da brita 1 de origem basáltica para este fim. Para agregado miúdo foi utilizada a areia, ambos agregados foram disponibilizados pela universidade.

3.1.3 Traço do concreto

O traço utilizado na pesquisa foi 1: 2,09: 3,09: 0,57 (cimento, areia, brita 1, água/cimento), este traço obteve como resistência a compressão aos 28 dias de 29 MPa. Além disso, foi necessário a utilização de superplastificante Adiment para uma melhor trabalhabilidade do concreto, de 1,5% da massa de cimento utilizado.

Foram realizadas três betonadas com diferentes adições de PET à mistura para fim de pesquisa. O concreto de referência, sem adição de fibras de PET, foi nomeado de R e os outros dois traços com 3,5kg/m³ e 7,0kg/m³ de fibras de PET foram nomeados de CRF1 e CRF2, respectivamente. Para cada traço foram necessários a

produção de 40L de concreto, totalizando 120L de concreto para o estudo. A quantidade dos materiais utilizados nos traços está representada na Tabela.

Tabela 1 - Quantidade de material em kg utilizado para produção de 40L de concreto para cada teor de fibras

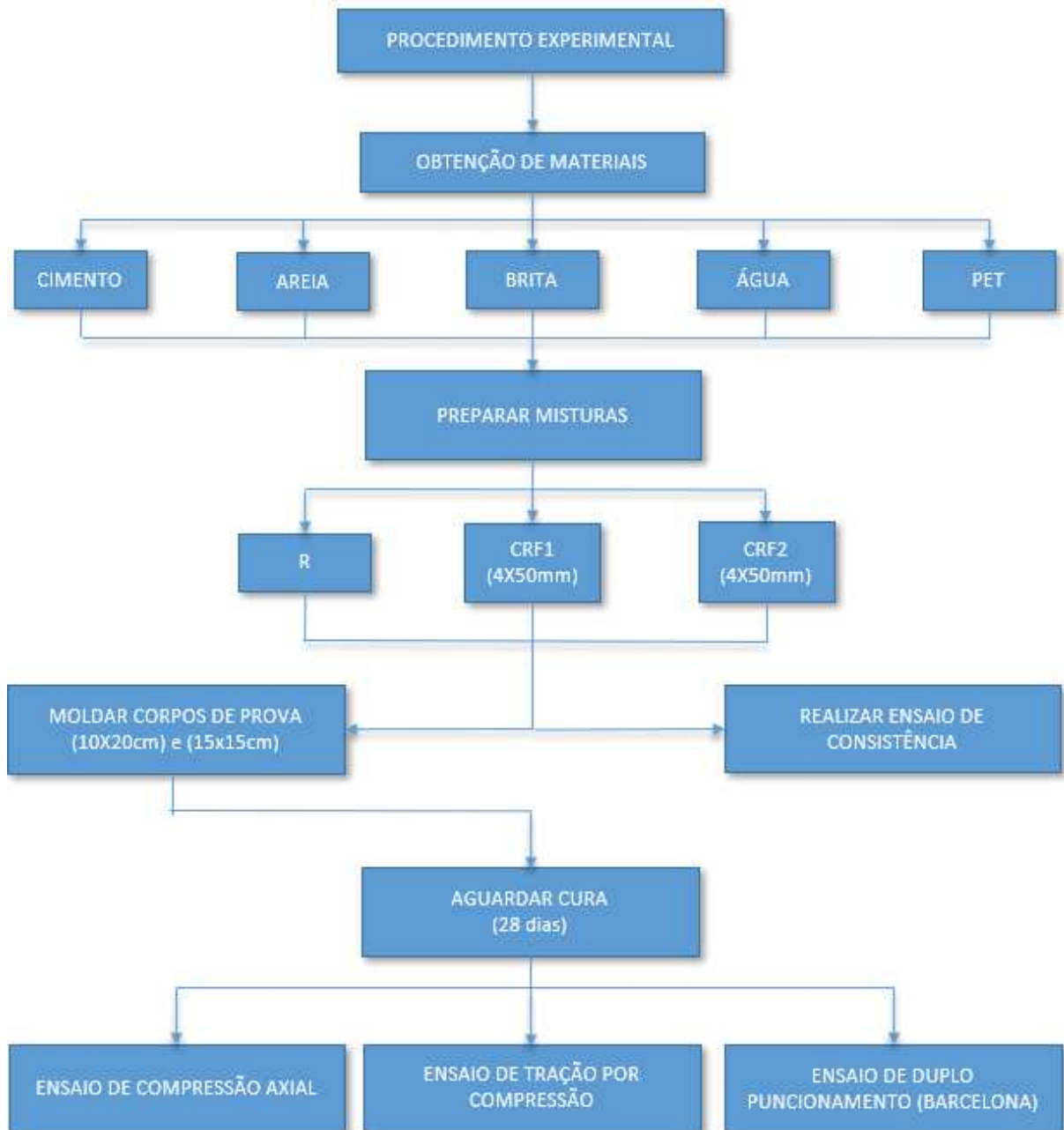
Material	R	CRF1	CRF2
Cimento	14,74	14,74	14,74
Areia	30,75	30,75	30,75
Brita 1	45,5	45,5	45,5
Água	8,4	8,4	8,4
Fibra de PET	0,00	0,14	0,28

Fonte: Autor (2019).

3.2 MÉTODOS

A seguir serão apresentados os ensaios realizados para caracterização dos materiais utilizados na pesquisa. O procedimento experimental se iniciou com a obtenção de cada material, posteriormente, realizou-se a mistura, sendo feita a divisão em três traços distintos com adição da fibra sintética de PET. Moldados os corpos de prova, foi esperado o tempo de cura necessário para realização dos ensaios. Para melhor entendimento, o fluxograma (Figura 10) mostra o passo a passo adotado para realização do experimento e obtenção de dados.

Figura 10: Fluxograma da metodologia adotada



Fonte: Autor (2019).

3.2.1 Dosagem do concreto

O concreto da presente pesquisa foi dosado assim como recomenda a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). Sendo escolhido um valor esperado de resistência à compressão axial aos 28 dias de cura, o próximo passo foi dosar o consumo de água, este diretamente proporcional ao slump desejado para a

mistura. Com essas variáveis fixadas, foi possível obter o consumo de cimento, brita e areia.

3.2.2 Agregados

Para o concreto usado neste ensaio utilizou-se brita 1, de origem basáltica, como agregado graúdo e areia como agregado miúdo. Foi necessário a realização do ensaio de peneiramento do agregado graúdo para plotagem da curva granulométrica e deste modo, conhecer a distribuição granulométrica do material. Este conceito é importante, uma vez que a distribuição granulométrica do agregado graúdo influencia no consumo de cimento e resistência final do concreto.

Também foi obtido através destes ensaios o valor da dimensão máxima dos agregados (DMC). Este valor é a abertura da peneira em que o material ficou retido em 5% ou imediatamente superior a este valor.

Para a correta dosagem dos agregados à mistura de concreto, necessitou-se realizar os ensaios de massa unitária e massa específica. Para o agregado graúdo, o ensaio de massa específica foi feito como rege a NBR NM53/2009. O agregado é submerso na água por 24h, então é retirado e seco. Após este processo o agregado é chamado de agregado saturado de superfície seca (SSS). Feito isto, a amostra é inserida na balança hidrostática e mensurada. Com os valores obtidos é realizado o cálculo para obtenção da massa específica.

$$ds = \frac{ms}{ms - ma} \quad (11)$$

Onde:

ds = massa específica do agregado SSS, em g/cm^3 ;

ms = massa da amostra seca ao ar, em g;

ma = massa da amostra obtida na balança hidrostática, em g.

O processo de obtenção da massa unitária compactada está prescrito na NBR NM45/2006. Este ensaio requer que a amostra esteja em seu estado seco, portanto a

brita teve que ser colocada em estufa antes da realização do experimento.

Neste ensaio, foi utilizado um recipiente com volume conhecido, este volume foi preenchido em três camadas, das quais cada uma sofreu um adensamento de 25 golpes com haste metálica e por fim realizou-se o arrasamento com a borda superior do recipiente. Para se conhecer a massa unitária, bastou dividir a massa de agregado contida no recipiente pelo volume do mesmo.

O ensaio de peneiramento também foi realizado com a areia, a fim de se obter o módulo de finura. Esta propriedade é obtida através da soma dos percentuais acumulados do material retido nas peneiras de série normal, sendo dividido por cem.

Para obtenção da massa específica do agregado miúdo foi realizado o ensaio como prescrito na NBR NM52/2009. Este ensaio foi realizado três vezes para validação dos valores obtidos. Primeiramente, cerca de 1kg de areia ficou submersa em água durante 24h, aproximadamente. Então, foi retirada a água excedente e secou-se a areia até que atingisse a condição de SSS.

Para saber se o agregado miúdo estava pronto para o ensaio, era realizado um teste com um pequeno tronco de cone e um bastão para adensar, após a retirada deste tronco, o material deveria permanecer com o formato do tronco. Após esta etapa, foi pesado o picnômetro seco, depois adicionou-se água e pesou-se novamente. Retirou-se a água e foi pesado o picnômetro apenas com a areia, e finalmente, pesou-se o picnômetro com areia e água. O cálculo para obtenção da massa específica esta apresentada pela Equação 13.

$$Me = \frac{b - a}{(d - a) - (c - b)} \quad (13)$$

Onde:

Me = Massa específica da areia, em g/cm³;

a = Massa do picnômetro vazio e seco, em g;

b = Massa do picnômetro mais amostra, em g;

c = Massa do picnômetro mais amostra e água, em g;

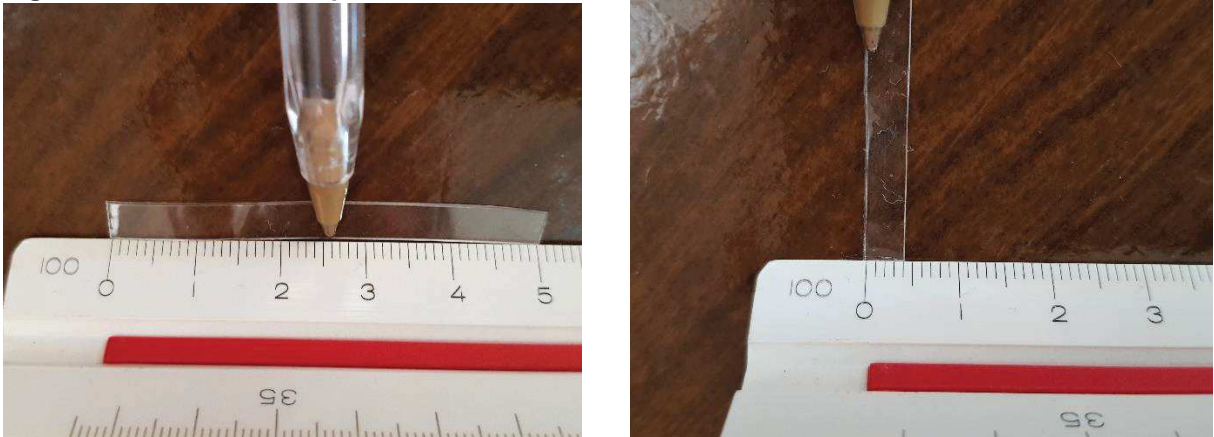
d = Massa do picnômetro com água, em g.

3.3 FIBRAS DE PET

O PET utilizado no experimento, é proveniente de garrafas de refrigerante de 3 litros, sendo adicionado ao concreto em duas diferentes quantidades, 3,5 e 7,0 kg/m³. Foi realizada a correta higienização das garrafas com esponja e sabão neutro, a fim de que não ocorresse contaminação do concreto. Devido ao diferente material, a tampa, o anel e o rótulo foram descartados.

A fabricação das fibras se deu de forma manual, primeiramente sendo cortadas em tiras de 4mm e após isso foram cortadas com o comprimento de 50mm. As figuras 11 e 12 ilustram as fibras e o filetador utilizado para a fabricação das fibras.

Figura 11 - Fibras de PET produzidas manualmente utilizadas na pesquisa



Fonte: Autor (2019).

Figura 12 - Filetador utilizado para fabricação das fibras



Fonte: Autor (2019).

3.4 MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA

Foram produzidos doze corpos de prova cilíndricos (10Øx20h cm) para cada teor de fibra, sendo seis para o ensaio de compressão axial e seis para tração a compressão. Já para o ensaio Barcelona foram produzidos sete corpos de prova com 15cm de diâmetro e 15cm de altura para cada teor. Portanto, foram produzidos um total de 57 corpos de prova. A Figura 13 apresenta o término do processo de separação e passagem do desmoldante nos corpos de prova utilizados na pesquisa.

Figura 13 - Corpos de prova com desmoldante



Fonte: Autor (2019).

Os corpos de prova com dimensão de 10Øx20h cm foram moldados conforme NBR 5738 (ABNT, 2015). O concreto foi colocado em pelo menos duas camadas no molde, recebendo 12 golpes em cada camada para que ocorra um adensamento adequado. A camada final recebeu maior volume que o necessário, podendo assim ser feito o arrasamento mesmo após realizado o adensamento.

Para produção dos corpos de prova com 15Øx15h cm foram usados canos de PVC cortados na altura desejada com base de madeira, também sendo adensado em duas camadas com 12 golpes cada para garantir a homogeneidade.

Após o endurecimento do concreto, realizou-se o desmolde e a cura inicial do concreto, deixando-o por 24h em superfície horizontal, sem perturbações. Com a cura inicial completa, o corpo de prova foi inserido em tanque para cura de 28 dias em temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ para adquirir sua resistência desejada.

Durante o período de cura os corpos de prova com dimensão 10Øx20h cm foram capeados com máquina retifica, entretanto o mesmo não pôde ser realizado com os corpos de prova de maior dimensão. A máquina retifica não suportava o diâmetro de 15cm, portanto foi necessário realizar o capeamento utilizando argamassa com cimento CPV-ARI para a uniformização das duas superfícies do corpo de prova.

3.5 ENSAIO DE CONSISTÊNCIA

A norma regente deste ensaio é a NBR NM67. Este ensaio foi realizado para cada traço de concreto, a fim de verificar a influência do PET na consistência da massa.

Utilizou-se o tronco de cone e foi inserido o concreto em três camadas de alturas aproximadamente iguais, realizando 25 golpes em cada camada para adensar o concreto.

3.6 ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO

A norma que rege este ensaio é a NBR 5739 (ABNT, 2007), o corpo de prova é colocado na prensa com velocidade de carregamento de 0,45 MPa/s. A resistência é calculada pela Equação 14:

$$f_c = \frac{4F}{\pi \times D^2} \quad (14)$$

Onde:

f_c = Resistência à compressão (MPa);

F = Força máxima resistida (N);

D = Diâmetro do corpo de prova (mm).

3.7 ENSAIO DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Assim como prescrito na NBR 7222 (ABNT, 2011), este ensaio utiliza-se de corpos de prova de dimensão 10x20 cm. Coloca-se o corpo de prova de forma que sua maior extensão fique sobre o prato da prensa, com tiras metálicas ou de madeira sobre toda geratriz superior e inferior do corpo de prova para distribuição uniforme da força.

A força de compressão é aplicada a uma velocidade de $0,05 \pm 0,02$ MPa/s. O ensaio é interrompido até o momento de ruptura do elemento por tração indireta. O cálculo da força é obtido a partir da Equação 15:

$$f_{ct,sp} = \frac{2.F}{\pi.d.l} \quad (15)$$

Onde:

$f_{ct,sp}$ = Resistência à tração por compressão diametral (MPa);

F = Força de ruptura expressa em Newtons;

D = Diâmetro do corpo de prova (mm);

L = Comprimento do corpo de prova (mm);

3.8 ENSAIO DE DUPLO PUNÇIONAMENTO

O ensaio foi realizado com a colocação de discos sobre as faces superior e inferior do corpo de prova (15Øx15h cm) e só então, foi inserido na prensa. A velocidade de deslocamento do pistão da prensa ocorreu com 0,5mm/min. Para simplificação do experimento, não foi usado o extensômetro circunferencial e para obtenção do TCO, sendo utilizado a proposição de Pujadas *et al.*, assim como proposto no item 2.9.

3.9 TRATAMENTO DE DADOS

Os resultados obtidos a partir dos ensaios foram tratados pelo critério de Chauvenet, a fim de que se retire qualquer valor discrepante, possivelmente obtido por erro na fabricação do corpo de prova ou erro na realização do ensaio. Após isso, aplicou-se o teste de hipótese de análise de variância (ANOVA), com nível de significância $\alpha = 5\%$, para avaliar se houve influência significativa da adição de fibra de PET na resistência da mistura. Entretanto, a ANOVA não dá como resultado qual teor terá efetivamente alterado a resistência do concreto, sendo necessário a realização do teste Tukey para essa finalidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Foram realizados os ensaios de caracterização dos agregados de acordo com as normas vigentes, NBR NM45 (ABNT, 2006), NBR NM46 (ABNT, 2003), NBR 9939 (ABNT, 2011), NBR NM52 (ABNT, 2009) e NBR NM248 (ABNT, 2003). Estes ensaios se tornam importante para conhecer as propriedades do material utilizado e então ser realizada a correta dosagem do concreto a ser estudado. As granulometrias da brita e da areia utilizados se encontram no Apêndice A. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos em laboratório.

Tabela 2 - Caracterização dos materiais utilizados

Material	DMC (mm)	MF	Massa Específica (g/cm³)	Massa Unitária Compactada (g/cm³)
Areia	-	2,65	2,64	-
Brita 1	19	-	3,05	1,65

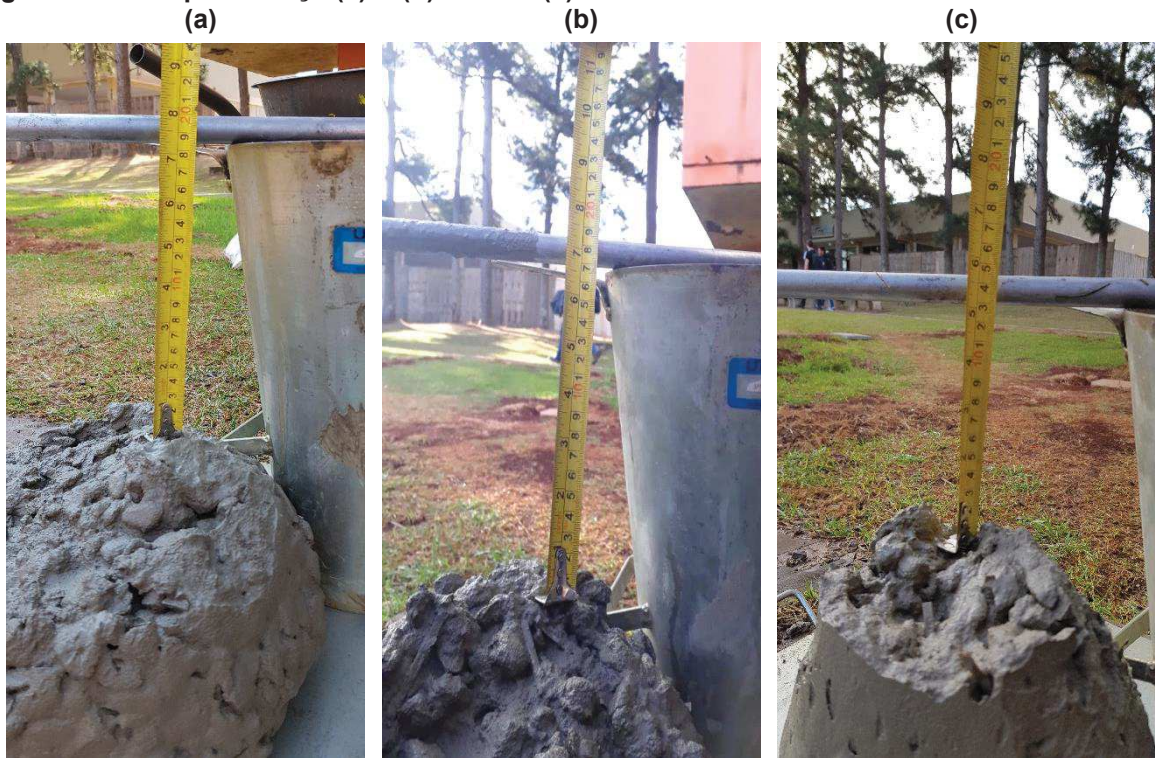
Fonte: Autor (2019).

4.2 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS

4.2.1 Trabalhabilidade

Devido a adição de fibras a mistura, era esperado que ocorresse a redução de slump conforme fosse aumentado o teor de fibras. O concreto de referência obteve um slump de 18,5cm, enquanto o CRF1 e CRF2, tiveram 17cm e 13cm de abatimento, respectivamente. A Figura 14 demonstra esses valores aferidos.

Figura 14 - Slump test traço (a) R (b) CRF1 e (c) CRF2



Fonte: Autor (2019).

4.2.2 Resistência à compressão axial

Após passados os 28 dias de cura do concreto, foram realizados os ensaios de compressão axial, a fim de verificar se a adição das fibras causou alguma influência nessa propriedade.

As Tabelas 3 a 6 informam os resultados obtidos em laboratório para cada traço, demonstrando os valores da média da resistência a compressão, desvio padrão e coeficiente de variação. O critério de Chauvenet será aplicado aos dados para que seja retirado qualquer valor discrepante, sendo desconsiderado nos cálculos.

Tabela 3 - Resistência à compressão axial referente ao traço R

Id.	Força Máxima (kN)	f_c (MPa)	$f_{c,m}$ (MPa)	s	CV (%)	Critério Chauvenet	
						T	T (Máx)
1	234,44	29,85				0,414	
2	206,27	26,26				1,384	
3	248,61	31,65	29,02	2,00	6,88	1,319	1,732
4	236,84	30,16				0,567	
5	228,06	29,04				0,007	
6	213,48	27,18				0,924	

Fonte: Autor (2019).

Tabela 4 - Resistência à compressão axial referente ao traço CRF1

Id.	Força Máxima (kN)	f_c (MPa)	$f_{c,m}$ (MPa)	s	CV (%)	Critério Chauvenet	
						T	T (Máx)
1	219,19	27,91				0,325	
2	221,34	28,18				0,000	
3	215,88	27,49				0,827	
4	232,95	29,66	28,18	0,84	2,99	1,755	1,732
5	214,80	27,35				0,990	
6	223,91	28,51				0,388	

Fonte: Autor (2019).

Como o CRF1 apresentou discrepância em um dos resultados, mostrado pelo critério de Chauvenet, o CP4 foi retirado da tabela e todos os cálculos foram refeitos para um novo teste.

Tabela 5 – Retirada do CP4 do traço CRF1

Id.	Força Máxima (kN)	f_c (MPa)	$f_{c,m}$ (MPa)	s	CV (%)	Critério Chauvenet	
						T	T (Máx)
1	219,19	27,91				0,045	
2	221,34	28,18				0,614	
3	215,88	27,49	27,89	0,48	1,72	0,833	1,65
5	214,80	27,35				1,119	
6	223,91	28,51				1,294	

Fonte: Autor (2019).

Tabela 6 - Resistência à compressão axial referente ao traço CRF2

Id.	Força Máxima (kN)	f_c (MPa)	$f_{c,m}$ (MPa)	s	CV (%)	Critério Chauvenet	
						T	T (Máx)
1	202,78	25,82				1,251	
2	217,78	27,73				0,385	
3	211,41	26,92				0,753	
4	250,35	31,88	28,58	2,21	7,72	1,495	1,732
5	228,64	29,11				0,242	
6	235,76	30,02				0,653	

Fonte: Autor (2019).

Com os valores das resistências a compressão axial normalizadas, foi realizado o cálculo de análise de variância (ANOVA) com nível de significância $\alpha = 5\%$. Esse passo se deu com o auxílio do software *Action*, para averiguar se a adição das fibras de PET alterou de forma considerável a resistência à compressão do concreto referência (Tabela 7).

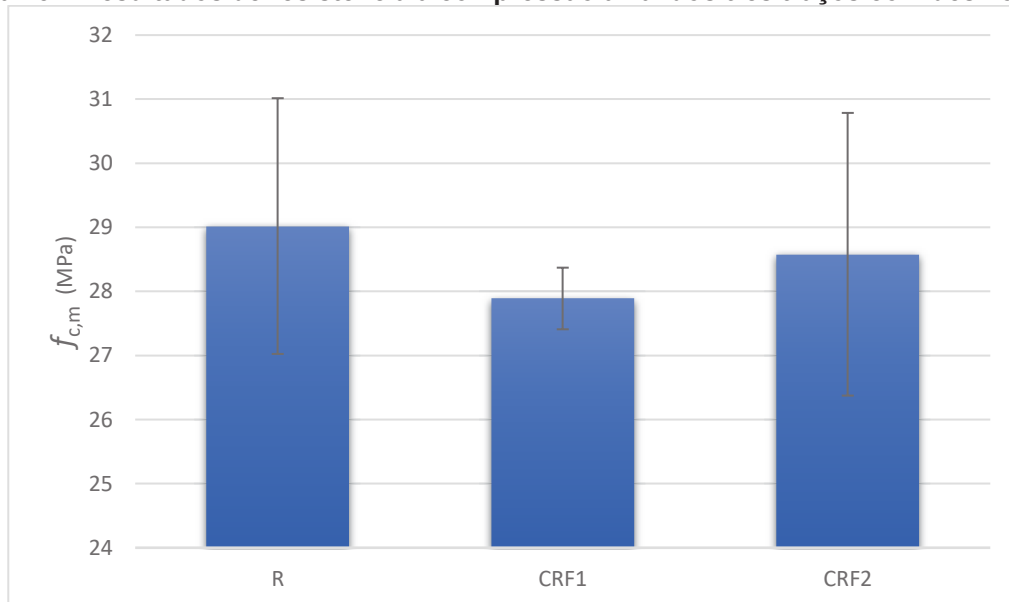
Tabela 7 - Resultado ANOVA de resistência à compressão axial para diferentes teores de fibras de PET

Grupo	G.L.	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F	P
Tratamento	2	3,540	1,7704	0,548	0,5895
Resíduo	14	45,158	3,2255		

Fonte: Autor (2019).

Como o valor retornado de P é maior que 5%, constata-se que tanto a adição de 3,5kg/m³ quanto a de 7,0kg/m³ de fibra de PET ao concreto não alteraram significativamente a resistência a compressão aos 28 dias. A Figura 15 ilustra os valores de cada traço obtido no ensaio de compressão axial com o desvio padrão aplicado.

Figura 15 – Resultados de resistência à compressão axial dos três traços com desvio padrão



Fonte: Autor (2019).

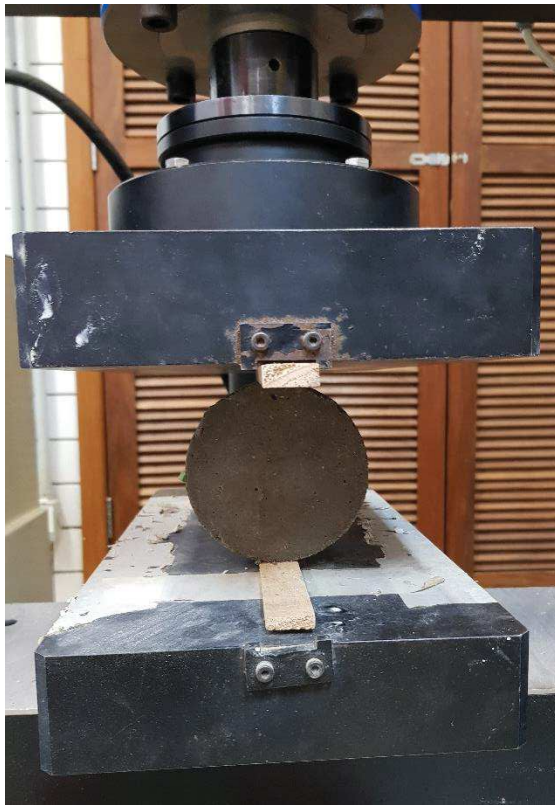
Segundo Figueiredo (2000), a redução a resistência a compressão causada pela adição de fibras se dá pela redução na trabalhabilidade, causando um mal adensamento do composto. Entretanto, na presente pesquisa, foi utilizado um elevado valor de slump, sendo este de mais de 13cm para todos os teores, o que explicaria a baixa influência da fibra na resistência à compressão do concreto.

Outro ponto a ser considerado, seria a quantidade de fibra utilizada. Nos ensaios realizados por Schettino (2015) foi observado uma redução de até 63% da resistência a compressão, utilizando uma quantidade superior de fibras de PET. Portanto, pode ser considerado que a baixa influência da adição de fibra de PET na resistência a compressão seria o baixo teor de fibras utilizado na pesquisa.

4.2.3 Resistência à tração

Essa propriedade foi ensaiada e será comparada em dois diferentes testes, sendo estes: tração por compressão diametral e tração pelo ensaio Barcelona (Figura 16).

Figura 16 - Ensaio (a) Tração por compressão diametral (b) Barcelona



(a)



(b)

Fonte: Autor (2019).

É importante ressaltar que um corpo de prova do traço CRF1 foi desconsiderado devido a um erro durante a realização do ensaio Barcelona. As Tabelas 8 a 14 apresentam os resultados obtidos.

Tabela 8 - Resistência à tração por compressão diametral referente ao traço R

Id.	Força Máxima (kN)	f_t (MPa)	$f_{t,m}$ (MPa)	s	CV (%)	Critério Chauvenet	
						T	T (Máx)
1	71,80	2,29				1,155	
2	78,40	2,50				0,539	
3	76,10	2,42				0,753	
4	100,70	3,21	2,68	0,34	12,72	1,544	1,732
5	88,00	2,80				0,358	
6	90,00	2,86				0,545	

Fonte: Autor (2019).

Tabela 9 - Resistência à tração pelo ensaio Barcelona referente ao traço R

Id.	Força Máxima (kN)	$f_{t,BCN}$ (MPa)	$f_{t,m}$ (MPa)	s	CV (%)	Critério Chauvenet	
						T	T (Máx)
1	104,34	2,62				0,646	
2	106,72	2,68				0,240	
3	108,83	2,74				1,022	
4	106,50	2,68	2,67	0,07	2,53	0,156	1,803
5	106,51	2,68				0,159	
6	108,63	2,73				0,949	
7	101,02	2,54				1,879	

Fonte: Autor (2019).

Para este primeiro traço, o critério de Chauvenet demonstrou um corpo de prova com resultado discrepante, sendo retirado da tabela e todos os cálculos foram reconsiderados.

Tabela 10 – Retirada do CP7 do ensaio Barcelona referente ao traço R

Id.	Força Máxima (kN)	$f_{t,BCN}$ (MPa)	$f_{t,m}$ (MPa)	s	CV (%)	Critério Chauvenet	
						T	T (Máx)
1	104,34	2,62				1,564	
2	106,72	2,68				0,120	
3	108,83	2,74				1,156	
4	106,50	2,68	2,69	0,04	1,54	0,257	1,732
5	106,51	2,68				0,251	
6	108,63	2,73				1,037	

Fonte: Autor (2019).

Tabela 11 - Resistência à tração por compressão diametral referente ao traço CRF1

Id.	Força Máxima (kN)	f_t (MPa)	$f_{t,m}$ (MPa)	s	CV (%)	Critério Chauvenet	
						T	T (Máx)
1	66,60	2,12				1,181	
2	84,80	2,70				0,569	
3	65,00	2,07				1,335	
4	85,00	2,71	2,51	0,33	13,19	0,588	1,732
5	82,40	2,62				0,338	
6	89,50	2,85				1,021	

Fonte: Autor (2019).

Tabela 12 - Resistência à tração pelo ensaio Barcelona referente ao traço CRF1

Id.	Força Máxima (kN)	$f_{t,BCN}$ (MPa)	$f_{t,m}$ (MPa)	s	CV (%)	Critério Chauvenet	
						T	T (Máx)
1	96,34	2,42				0,032	
2	97,62	2,46	2,42	0,06	2,28	0,619	1,732
3	93,74	2,36				1,151	

Id.	Força Máxima (kN)	$f_{t,BCN}$ (MPa)	$f_{t,m}$ (MPa)	s	CV (%)	Critério Chauvenet	
						T	T (Máx)
4	97,05	2,44				0,032	
5	99,18	2,49	2,42	0,06	2,28	0,619	1,732
6	93,67	2,36				1,151	

Fonte: Autor (2019).

Tabela 13 - Resistência à tração por compressão diametral referente ao traço CRF2

Id.	Força Máxima (kN)	f_t (MPa)	$f_{t,m}$ (MPa)	s	CV (%)	Critério Chauvenet	
						T	T (Máx)
1	79,00	2,51				0,782	
2	78,80	2,51				0,806	
3	76,50	2,44				1,078	
4	91,10	2,90	2,72	0,27	9,86	0,652	1,732
5	96,20	3,06				1,256	
6	92,00	2,93				0,758	

Fonte: Autor (2019).

Tabela 14 - Resistência à tração pelo ensaio Barcelona referente ao traço CRF2

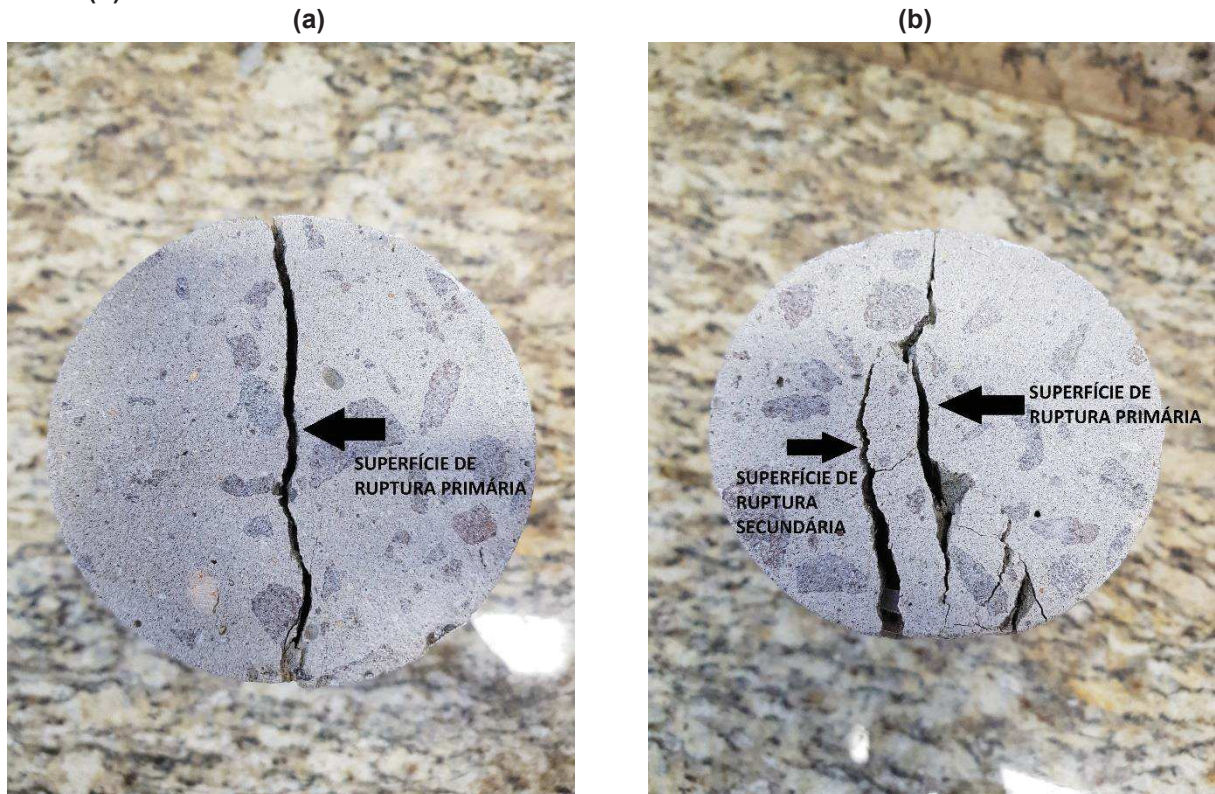
Id.	Força Máxima (kN)	$f_{t,BCN}$ (MPa)	$f_{t,m}$ (MPa)	s	CV (%)	Critério Chauvenet	
						T	T (Máx)
1	95,59	2,40				0,458	
2	89,31	2,25				1,367	
3	92,86	2,34				0,335	
4	93,83	2,36	2,36	0,09	3,66	0,054	1,803
5	90,45	2,27				1,035	
6	98,37	2,47				1,263	
7	97,70	2,46				1,069	

Fonte: Autor (2019).

Com posse destas tabelas, é notável a diferença dos resultados dos desvios padrões e coeficientes de variação entre os ensaios, tendo resultados com coeficiente de variação do ensaio Barcelona cerca de 80% menor que o obtido pelo outro método. Conforme Chen (1973), estes resultados são reflexos da predeterminação do plano de ruptura pelo posicionamento do corpo de prova na prensa que ocorre no ensaio de tração por compressão diametral.

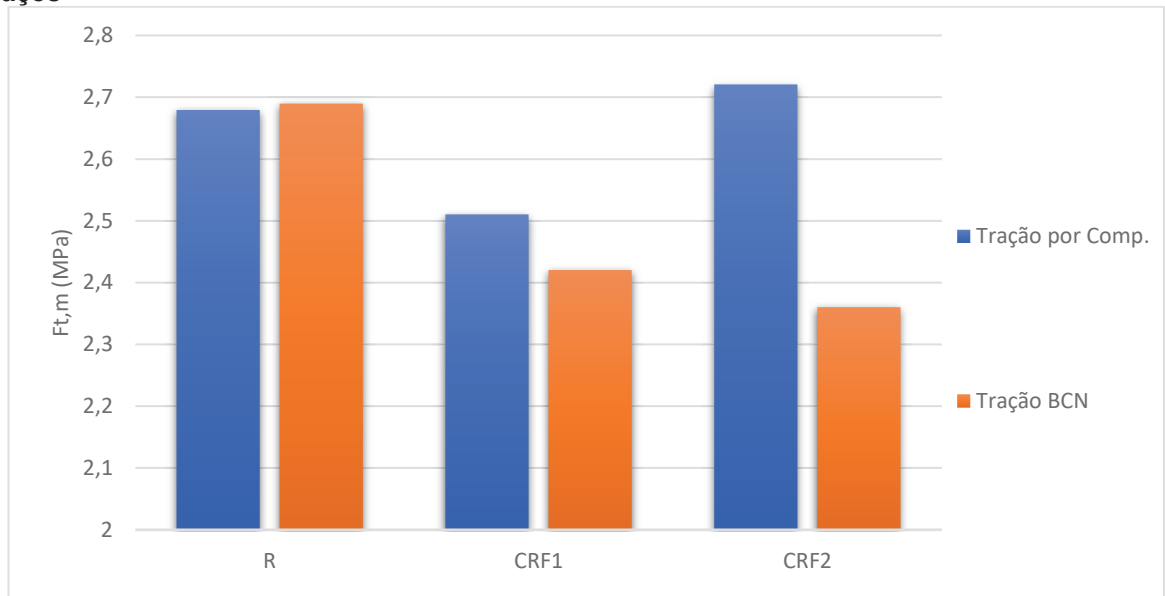
Goaiz *et al.* (2018) realizaram ensaios de tração por compressão diametral, ensaio de duplo puncionamento e ensaio de tração direta em concretos reforçados com fibras de aço em diferentes teores. Neste estudo, os autores afirmam que o ensaio de tração por compressão diametral tende a apresentar resultados de tração superiores ao que o concreto com adição de fibras resiste. Isso acontece pois, a ruptura do concreto sem reforço de fibras, ocorre em uma única ruptura exatamente no centro do corpo de prova e que o corta em dois pedaços espelhados, entretanto com a adição de fibras ocorre a distribuição da tensão na superfície vertical, criando linhas de rupturas secundárias (Figura 17), sendo esperado um resultado de tração maior do que o real (Figura 18).

Figura 17 – Planos de rupturas pelo ensaio de tração por compressão com concreto (a) sem fibras (b) com fibras



Fonte: Autor (2019).

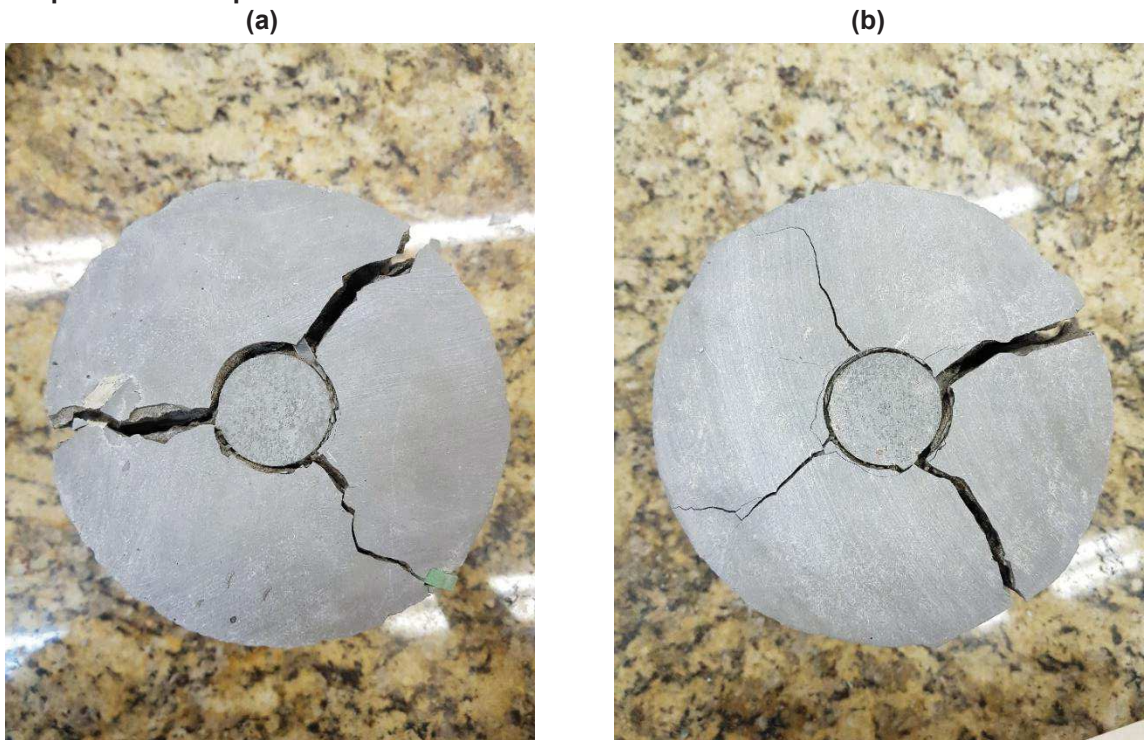
Figura 18 – Resistência a tração por compressão diametral e pelo ensaio Barcelona dos três traços



Fonte: Autor (2019).

Como descrito no item 2.9, o rompimento dos corpos de prova pelo ensaio Barcelona, em sua maioria, ocorreu em três planos, ocorrendo também casos de quatro planos de rompimento (Figura 19), observou-se também as cunhas cônicas que induzem a tração no elemento (Figura 20).

Figura 19 – Corpo de prova rompido pelo ensaio Barcelona (a) três planos de rompimento (b) quatro planos de rompimento



Fonte: Autor (2019).

Figura 20 – Cunha cônica formada no corpo de prova pelo ensaio Barcelona



Fonte: Autor (2019).

Assim como na resistência à compressão, o teste ANOVA será realizado para a resistência à tração por compressão diametral para aferir se a adição da fibra alterou esta propriedade significativamente (Tabela 15).

Tabela 15 - Resultado ANOVA de resistência à tração por compressão diametral para diferentes teores de fibras de PET

Grupo	G.L.	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F	P
Tratamento	2	0,152	0,0760	0,765	0,4823
Resíduo	15	1,490	0,0993		

Fonte: Autor (2019).

Com o valor de P maior que 5%, a hipótese nula de que a média de duas ou mais amostras são iguais é verdadeira, ou seja, nenhuma das composições com adição de fibra teve sua resistência à tração alterada significativamente quando comparada ao traço de referência.

O teste ANOVA também será realizado para o ensaio Barcelona, a fim de comparação dos resultados entre os ensaios. A Tabela 16 apresenta os valores obtidos.

Tabela 16- Resultado ANOVA de resistência à tração pelo ensaio Barcelona para diferentes teores de fibras de PET

Grupo	G.L.	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F	P
Tratamento	2	0,376	0,1879	43,68	0,000000329
Resíduo	16	0,069	0,0043		

Fonte: Autor (2019).

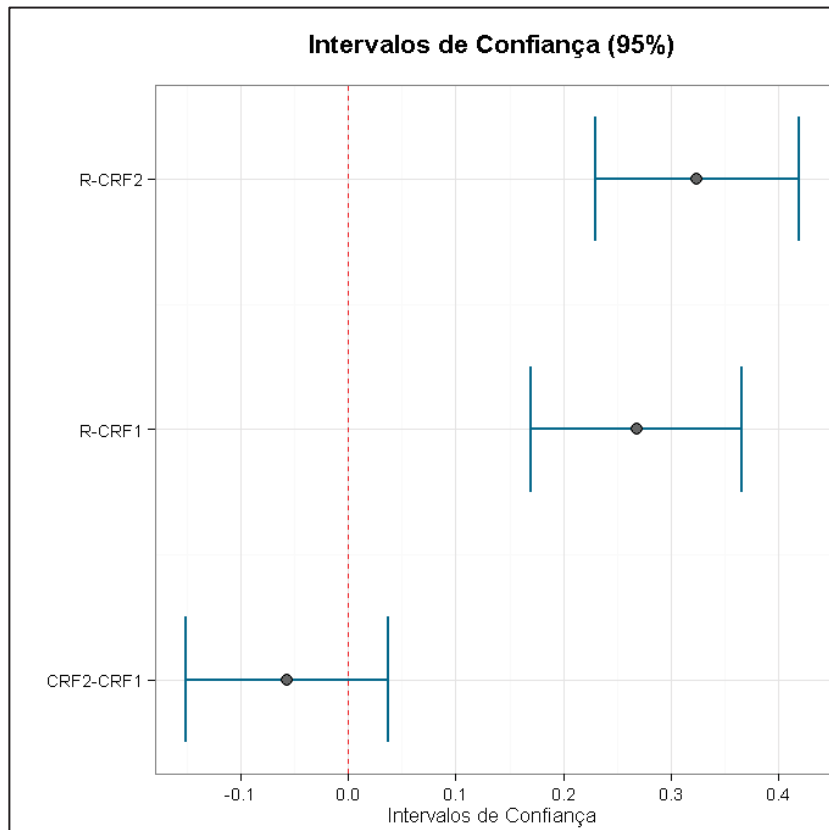
Neste teste, o valor retornado de P é menor que 5%, portanto a hipótese nula de que a média de duas ou mais amostras são iguais é falsa, isto é, a adição das fibras ao concreto mostrou alteração significativa à resistência a tração pelo ensaio Barcelona. Para descobrir em qual composição essa alteração ocorreu, foi realizado o teste Tukey (Tabela 17) e também representado a comparação par a par (Figura 21).

Tabela 17 - Teste Tukey de resistência à tração pelo ensaio Barcelona

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
CRF2-CRF1	-0,05659	-0,15077	0,03759	0,29493
R-CRF1	0,26797	0,17024	0,36570	7,4884E-06
R-CRF2	0,32456	0,23038	0,41874	3,93609E-07

Fonte: Autor (2019).

Figura 21 - Comparação entre os pares dos traços de resistência a tração pelo ensaio Barcelona



Fonte: Autor (2019).

Conforme apresentado, os dois traços com fibra apresentaram mudanças significativas de resistência à tração quando comparado ao traço de referência. Entretanto, vale ressaltar que, o par CRF1-CRF2 não apresentaram diferenças significantes de resistência a tração entre si, mostrando que essa maior adição de fibras não influenciou negativamente nessa propriedade.

A partir do ensaio com diferentes teores de fibras de aço, Garcez (2005) obteve como resultado em seu estudo que para baixos teores de fibra no compósito, foi observado uma redução na resistência a tração. Enquanto que para maiores teores essa propriedade era melhorada, portanto é possível que o presente estudo tenha sido realizado com um baixo teor para fibra de PET.

Após a ruptura dos corpos de prova, ficou evidenciado que grande maioria das fibras presentes foram arrancadas da matriz e não seccionadas, mostrando que não ocorreu aderência suficiente das fibras ao concreto (Figura 22). Sugere-se que para futuras pesquisas sejam moldados corpos de prova com a utilização de fibras de PET com maiores comprimentos e seções menores para que se encontre um equilíbrio entre a resistência ao arrancamento e secção do material.

Figura 22 – Evidência do arrancamento das fibras da matriz



Fonte: Autor (2019).

De posse desses resultados, é possível avaliar que o ensaio Barcelona se sobressaiu perante ao ensaio de tração por compressão diametral, tratando-se de concreto reforçado com fibras. Sendo levado em conta, tanto a predeterminação do plano de ruptura, quanto superfícies de rupturas secundárias que levam a dispersão de dados maiores no ensaio de tração brasileiro. Além disso, a realização do ensaio Barcelona é de simples realização e não requer aparatos complexos, tornando-o de fácil reprodutibilidade e sobretudo verossímil em seus resultados.

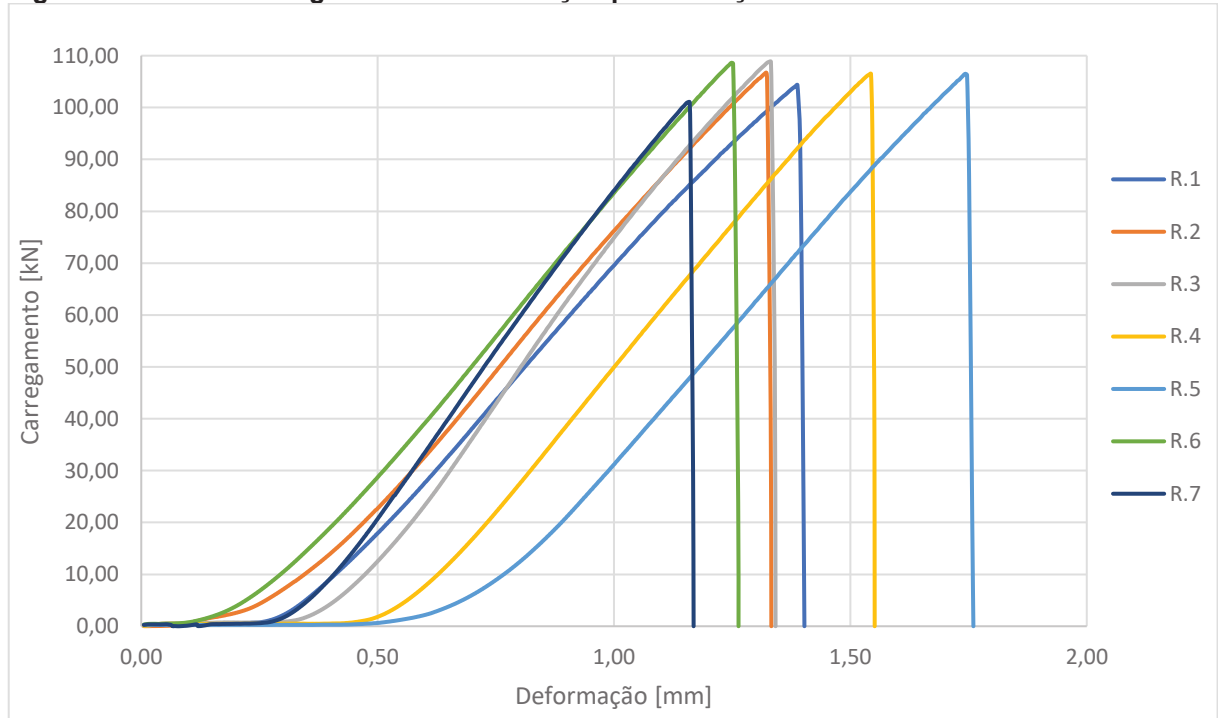
4.2.4 Tenacidade

O ensaio Barcelona permite a obtenção da propriedade de tenacidade do material, a partir da área do gráfico abaixo da curva de carregamento x TCO. Para tal, utilizou-se as equações propostas por Pujadas *et al.* (2013), assim como explicitado no item 2.9.

Primeiramente, com os resultados registrados automaticamente pela prensa, plotou-se os gráficos carregamento x deformação de cada traço especificado. O

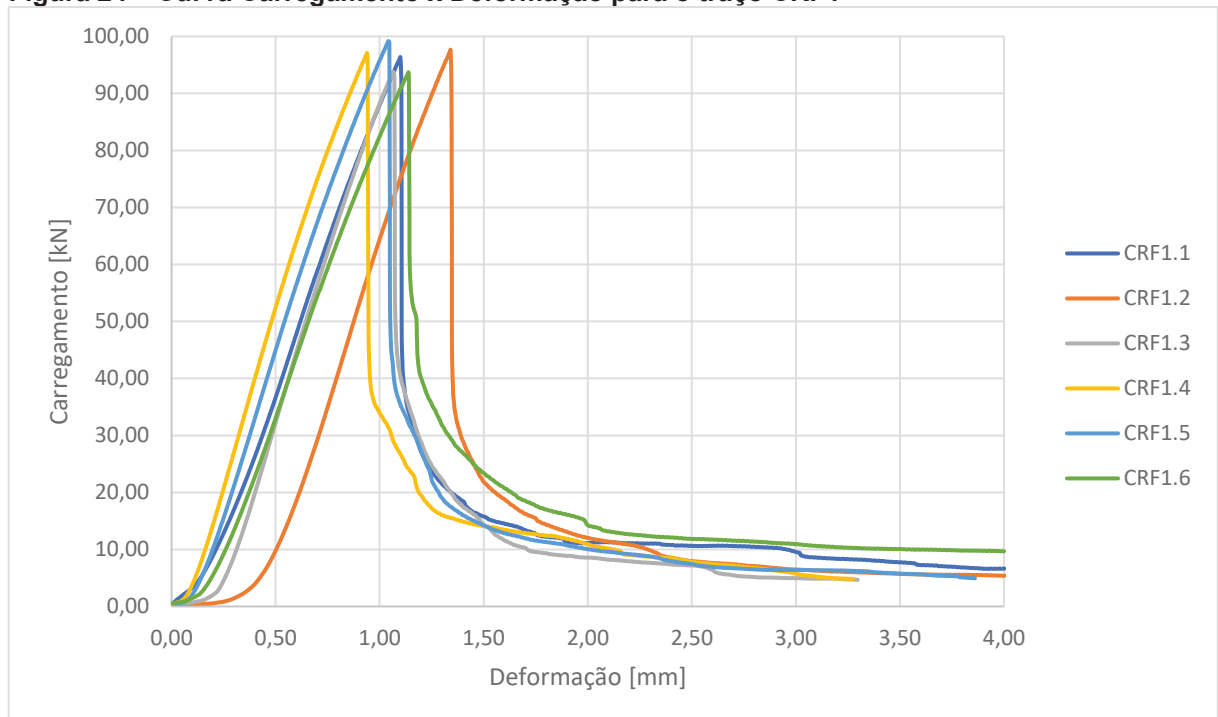
gráfico do traço sem fibras demonstra claramente o comportamento frágil que o concreto possui, rompendo a partir do momento que é atingido a sua carga máxima resistida (Figura 23). As Figuras 24 e 25 representam as curvas de carga para o CRF1 e CRF2, respectivamente.

Figura 23 – Curva Carregamento x Deformação para o traço R



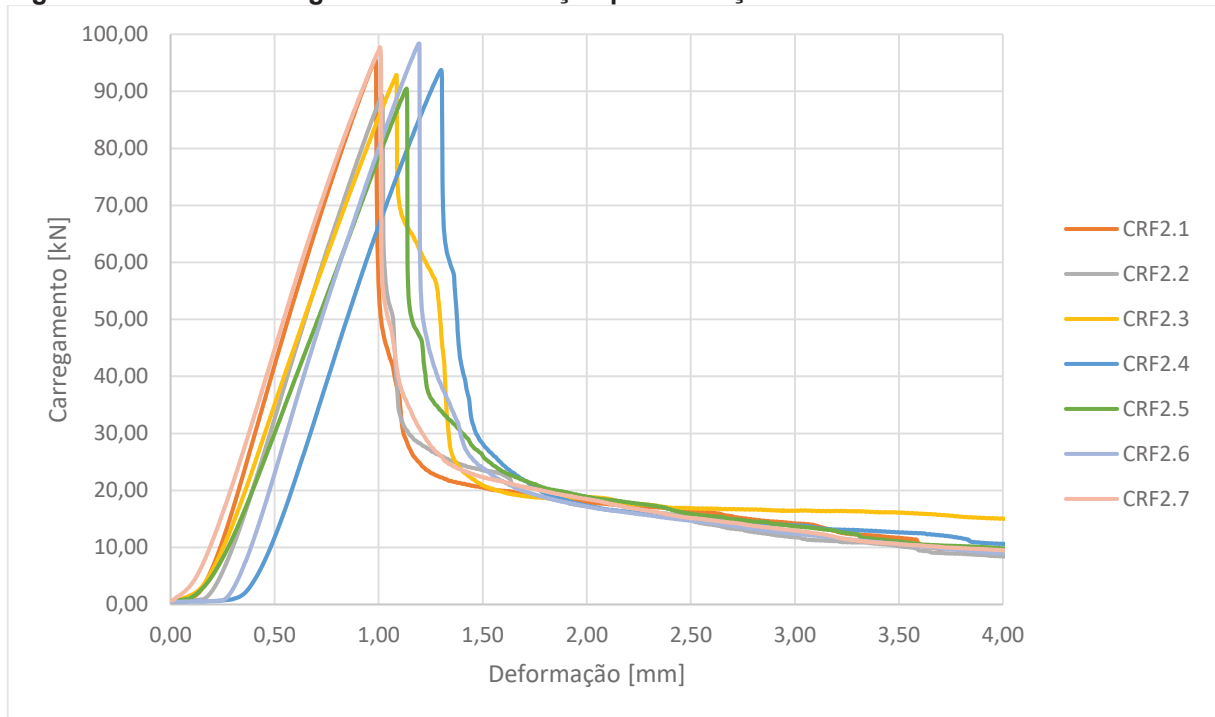
Fonte: Autor (2019).

Figura 24 – Curva Carregamento x Deformação para o traço CRF1



Fonte: Autor (2019).

Figura 25 – Curva Carregamento x Deformação para o traço CRF2

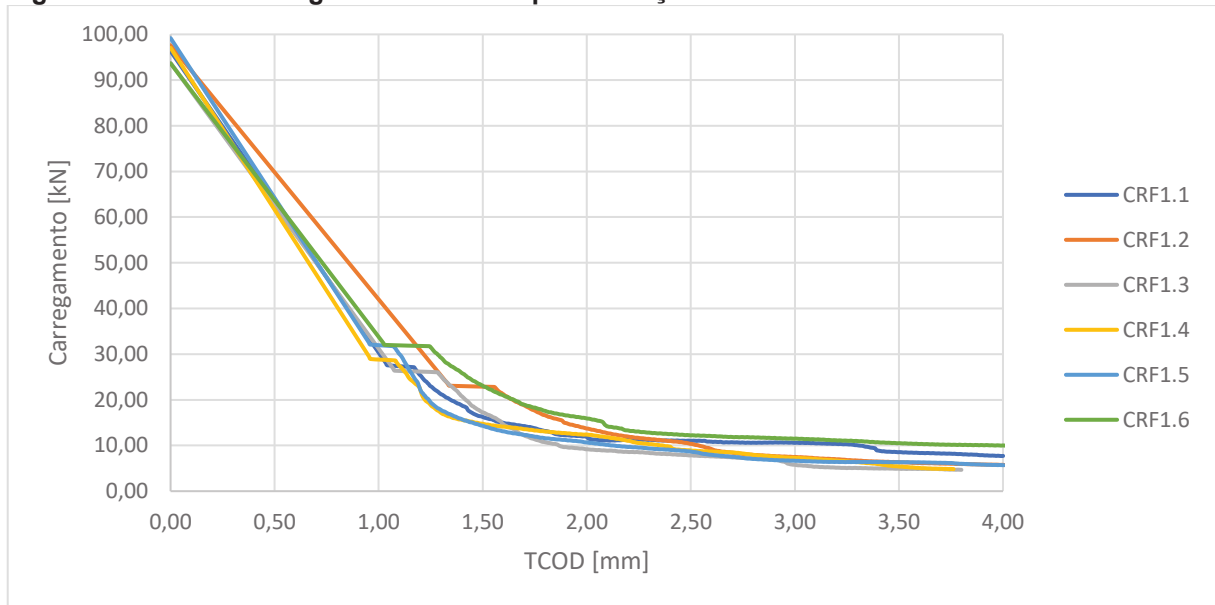


Fonte: Autor (2019).

O cálculo de tenacidade usando a norma JSCE-SF4 (1984), utiliza-se da deformação do corpo de prova de até 2mm, portanto partindo da relação de 2:1 do ensaio na norma japonesa com o ensaio Barcelona, será calculado a área do gráfico até 4mm de TCOD.

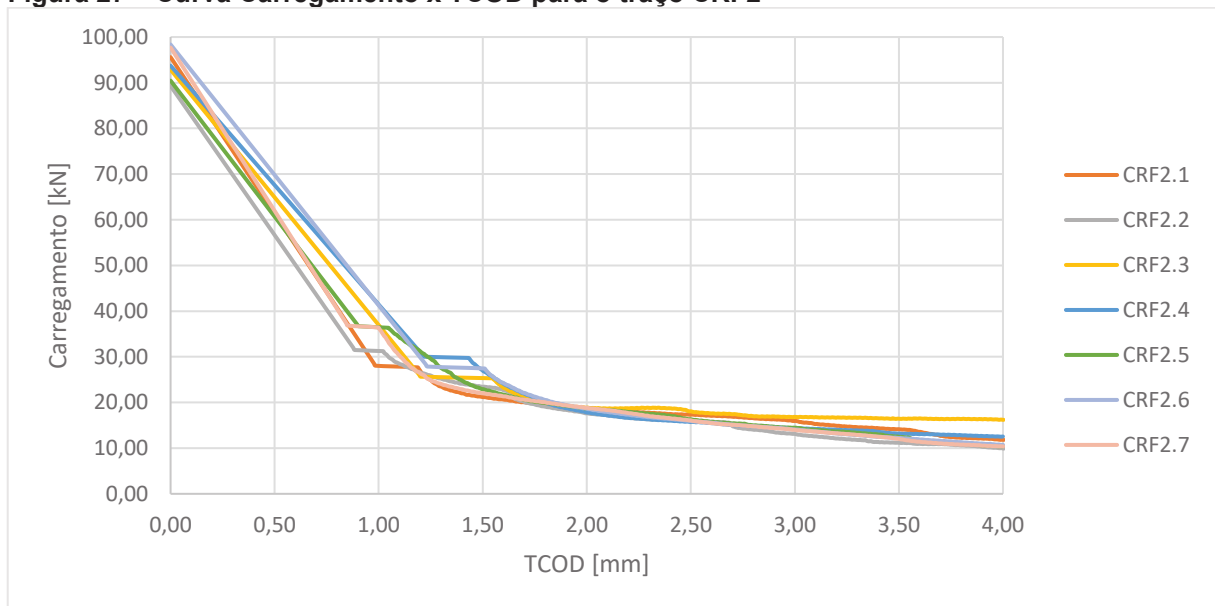
Como não foi utilizado o extensômetro circunferencial, tanto os dados de carregamento quanto os de deformação vertical da prensa foram inseridos nas equações de 5 a 7 para a transformação destes em TCOD, e então, foram plotados os novos gráficos (Figuras 26 e 27).

Figura 26 – Curva Carregamento x TCOD para o traço CRF1



Fonte: Autor (2019).

Figura 27 – Curva Carregamento x TCOD para o traço CRF2



Fonte: Autor (2019).

Vale ressaltar que dois corpos de prova do traço CRF1 não atingiram a marca necessária de 4mm para o TCOD, entretanto este problema não influenciou significativamente no resultado, segundo o critério de Chauvenet apresentado na Tabela 18, a seguir.

Tabela 18 - Tenacidade dos corpos de prova para o traço CRF1

Id.	Tb (kN.mm)	Tb,m (kN.mm)	s	CV (%)	Critério Chauvenet	
					T	T (Máx)
1	101,70				0,122	
2	110,10				1,131	
3	92,62	100,69	8,33	8,27	0,969	1,732
4	92,71				0,959	
5	96,01				0,562	
6	111,00				1,238	

Fonte: Autor (2019).

Já para o traço com maior teor de fibras, todos os corpos de prova atingiram a marca necessária de 4mm de TCO, sendo calculado também a tenacidade, tenacidade média, desvio padrão e coeficiente de variação para o traço CRF2 (Tabela 19).

Tabela 19 - Tenacidade dos corpos de prova para o traço CRF2

Id.	Tb (kN.mm)	Tb,m (kN.mm)	s	CV (%)	Critério Chauvenet	
					T	T (Máx)
1	114,86				0,421	
2	107,29				1,579	
3	123,98				0,973	
4	123,57	117,61	6,54	5,56	0,911	1,803
5	114,78				0,433	
6	124,50				1,054	
7	114,31				0,506	

Fonte: Autor (2019).

A partir dos resultados obtidos, observa-se que a adição do dobro de teor de fibras de PET se mostrou eficaz no incremento de tenacidade ao compósito, aumentando em cerca de 17% dessa propriedade em comparação ao traço CRF1. O autor Leite (2018) realizou um experimento em concreto convencional reforçado com fibras poliméricas em 0,5% e 1,0% de teor, tendo sido constatado um aumento de 21,8% da tenacidade quando dobrou-se o teor de incorporação das fibras à mistura, resultado semelhante ao obtido na presente pesquisa.

Além da tenacidade, a norma japonesa de flexão de prismas recomenda o cálculo de resistência residual para 0,5mm e 2,0mm, portanto, utilizando-se da relação proposta por Saludes *et al.* (2007), foram calculadas as resistências residuais em

1,0mm e 4,0mm para o ensaio Barcelona. As tabelas 20 a 23 apresentam estes resultados.

Tabela 20 - Resistência residual em 1,0mm para o traço CRF1

Id.	Força (kN)	$f_{t,TCOD1,0}$ (MPa)	$f_{t,m}$ (Mpa)	s	CV (%)
1	29,96	0,75			
2	41,23	1,04			
3	31,03	0,78			
4	28,62	0,72	0,82	0,11	13,78
5	31,75	0,80			
6	33,64	0,85			

Fonte: Autor (2019).

Tabela 21 - Resistência residual em 1,0mm para o traço CRF2

Id.	Força (kN)	$f_{t,TCOD1,0}$ (MPa)	$f_{t,m}$ (Mpa)	s	CV (%)
1	27,69	0,70			
2	31,23	0,79			
3	36,67	0,92			
4	41,31	1,04	0,90	0,12	13,79
5	36,35	0,91			
6	41,08	1,03			
7	36,12	0,91			

Fonte: Autor (2019).

Tabela 22 - Resistência residual em 4,0mm para o traço CRF1

Id.	Força (kN)	$f_{t,TCOD4,0}$ (MPa)	$f_{t,m}$ (Mpa)	s	CV (%)
1	7,72	0,19			
2	5,75	0,14			
3	-	-			
4	-	-	0,18	0,05	28,05
5	5,69	0,14			
6	10,02	0,25			

Fonte: Autor (2019).

Para o traço de CRF1 não foi possível atingir a marca de 4,0mm de TCOd para dois corpos de prova, resultado da baixa resistência residual, ocasionando a parada do ensaio antes do esperado.

Tabela 23 - Resistência residual em 4,0mm para o traço CRF2

Id.	Força (kN)	$f_{t,TCOD4,0}$ (MPa)	$f_{t,m}$ (Mpa)	s	CV (%)
1	11,81	0,30			
2	9,90	0,25			
3	16,20	0,41			
4	12,55	0,32	0,29	0,05	18,64
5	10,41	0,26			
6	10,73	0,27			
7	10,38	0,26			

Fonte: Autor (2019).

A partir da análise das Figuras 26 e 27 e posterior apresentação das Tabelas 20 a 23, é evidente a redução na resistência residual em ambos os teores ao passo que o TCOd é aumentado, caracterizando um comportamento de softening do compósito com a adição das fibras de PET. Resultado semelhante foi encontrado por outros autores como Lanzarin (2018) com fibras de aço e Monte *et al.* (2014) que avaliou este comportamento com fibras de polipropileno e aço em diferentes teores ao concreto pelo ensaio Barcelona.

Além disso, quando comparado as resistências residuais das duas concentrações, não há um elevado incremento dessa propriedade em 1,0mm de TCOd. Entretanto, a adição do dobro de teor de fibra de PET alterou significativamente a resistência residual do concreto para um TCOd de 4,0mm. Esse aumento na resistência residual ocasionado pelo maior teor de fibra incorporado a mistura foi de cerca de 61% quando comparado ao traço CRF1.

5. CONCLUSÃO

Após a realização dos ensaios e obtenção dos resultados, foi possível chegar a algumas conclusões referentes ao uso da fibra de PET no concreto convencional:

- O uso da fibra reduziu significativamente a trabalhabilidade do compósito, assim como ocorre com a utilização de outros tipos de fibras. Portanto, é aconselhado que para o uso de fibras seja considerado a aplicação de aditivo para um slump maior.

- A quantidade de fibra de PET da presente pesquisa não foi suficiente para alterar a resistência a compressão axial do compósito. Assim sendo, é necessária uma averiguação da influência dessa fibra nesta propriedade para maiores teores.

- As fibras de PET em baixo teor de aplicação reduzem a resistência à tração do compósito, assim como foi investigado por Garcez (2005) para CRF com baixo teor de fibras de aço.

- O ensaio Barcelona apresentou dados mais precisos e menos dispersos quando comparado ao ensaio de tração brasileiro, assim como já esperado. O ensaio de duplo puncionamento mostrou um comportamento de resistência diferente do obtido pelo ensaio de tração por compressão diametral. Foi observada um aumento na resistência a tração obtido pelo método brasileiro, enquanto que houve uma redução a tração pelo outro ensaio. Este fato, demonstra a influência da incorporação das fibras ao compósito, ocasionando uma maior transferência de tensões no plano de ruptura do corpo de prova, levando a formação de um plano de ruptura secundário no ensaio de tração por compressão diametral. Outro fator para a maior dispersão de dados do ensaio de tração brasileiro, seria a predeterminação do plano de ruptura, conforme explica Chen (1973). Deste modo, não se recomenda o ensaio de tração por compressão diametral para obtenção da resistência a tração de concretos reforçados com fibras, uma vez que foi observado uma superestimação nos valores dessa resistência obtidas na pesquisa.

- As fibras de PET conferiram ao concreto a propriedade de tenacidade, suportando grandes deformações mesmo após sua ruptura. Essa característica adquirida resultou em uma ruptura diferente da observada no traço de referência, sendo esta menos frágil. A adição do dobro de teor de fibras influenciou positivamente na tenacidade do concreto, ocasionando um aumento de 17% desta propriedade ao material. Isso leva a crer que para maiores teores da fibra de PET o concreto reagiria

melhor a maiores deformações, também aumentando sua tenacidade, até atingir o teor limite de fibra.

- Com os resultados da resistência residual, conclui-se que a fibra de PET confere ao compósito o comportamento de softening, caracterizando uma redução significativa na capacidade de carga e uma maior deformação do elemento conforme a aplicação de força. A adição de maior teor de fibras de PET conferiu maior resistência residual para o TCO de 4,0 mm, cerca de 61% quando comparados os traços CRF2 e CRF1.

A realização desta pesquisa contribuiu com maiores dados sobre a utilização de fibras de PET ao concreto, entretanto ainda há poucas informações acerca da utilização desse tipo de fibra. Portanto, aconselha-se para futuros trabalhos que seja realizado ensaios de compressão, tração e Barcelona com teores maiores dessa fibra e em diferentes fatores forma, para que seja averiguado sua influência ao compósito.

Além disso, um estudo realizado por Quinino (2015) averiguou que a mistura em diferentes proporções das fibras de aço com fibras de polipropileno alterou positivamente as propriedades do concreto. Portanto, a hibridização de fibras de PET com fibras de aço também seria interessante de ser pesquisada, pois as fibras de polipropileno são fibras sintéticas assim como o PET, podendo possuir comportamento semelhante e ambas contribuírem para as propriedades do concreto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira dos Fabricantes de Embalagens PET. 2012. Disponível em: <www.abipet.org.br>. Acesso em: 08 abr. 2019.

Associação Brasileira de Cimento Portland. **Guia Básico de Utilização de Cimento Portland**. Boletim Técnico BT-106. 7 ed. São Paulo, 2002. 28 p.

Asociación Española de Normalización y Certificación. **UNE 83515: Hormigones con fibras - Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción – Método Barcelona**. Barcelona, 2010. 10 p.

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

AIRE, C.; AGUADO, A.; MOLINS, C. **Método de doble punzonamiento de tracción indirecta para concreto reforzado con fibra: Ensayo Barcelona**. 1 ed. México. Instituto de Ingeniería - UNAM. 2013. 111 p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Report on fiber reinforced concrete (ACI 544.1R-96). In: **Manual of concrete Practice**. Detroit, Michigan. v. 93. 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM53: Agregado Graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM45: Agregados – Determinação da massa unitária e volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM46: Determinação do teor de material pulverulento**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 9939: Agregado Graúdo - Determinação do teor de umidade total – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR NM52: Agregado Miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009.

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

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

_____. **NBR 5738: Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto**. Rio de Janeiro, 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222: Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.

BUREAU OF NORMALIZATION. **NBN B 15-238: Tests on fiber reinforced concrete - Bending test on prismatic sample**. Brussels, 1992.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5 ed. LTC – Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro, 2002. 620 p.

CHEN, W. F. **Double punch test for tensile strength of concrete**. Fritz Laboratory Reports. Pennsylvania, 1970. 13 p.

CHEN, W. F. **Double punch test for tensile strength of concrete**. Fritz Laboratory Reports. Pennsylvania 1973. 21 p.

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

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. 248p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil II. São Paulo, 2011.

GARCEZ, E. O. **Análise Teórico-Experimental do Comportamento de Concretos Reforçados com Fibras de Aço Submetidos a Cargas de Impacto**. 2005. 141p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

GOAIZ, H. A.; YU, T.; HADI, M. N. S. **Quality Evaluation Tests for Tensile Strength of Reactive Powder Concrete**. Journal of Materials in Civil Engineering. 2018. 30 p.

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

LANZARIN, R. A. H. **Avaliação do ensaio Barcelona como controle tecnológico do concreto reforçado com fibras de aço**. 2018. 73p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2018.

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

LEPOITTEVIN, B.; ROGER, P. Poly(ethylene terephthalate). In: THOMAS, S.; VISAKH, P. M. **Handbook of Engineering and Specialty Thermoplastics**. Scrivener. 2011. p. 97-126.

LI, Z. **Advanced Concrete Technology**. John Wiley & Sons, Inc. 2011. p 94-138.

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

NOGUEIRA, A. B.; SIMAO, L.; MONTE, R.; FIGUEIREDO, A. D. Avaliação da reprodutibilidade do ensaio Barcelona para controle do concreto reforçado com fibras. In: 59º Congresso Brasileiro do Concreto, Bento Gonçalves, 2017. **Anais...**Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON. São Paulo, 2017.

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

PURNELL, P. Fiber-reinforced cements and concrete. In: DOMONE, P.; ILLSTON, J. **Construction Materials: their nature and behaviour.** 4. ed. 2010. p. 367-368.

QUININO, U. C. M. **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras.** 2015. 243p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SALUDES, S.; AGUADO A.; MOLINS, C. **Ensayo de doble punzonamiento aplicado al hormigón reforzado com fibras (Ensayo Barcelona).** 338p. Cátedra BMB Innovación en Tecnología del Hormigón. Barcelona, 2007.

SCHETTINO, R. M. **Concreto com adição de fibras de politereftalato de etileno.** 2015. 66p. Tese (Mestrado em Materiais). Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2015.

APÊNDICE A – Curvas granulométricas

