



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS DE PALMAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

RUAN VICTOR SANTOS COSTA

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO CONCRETO REFORÇADO COM
FIBRAS DE POLIETILENO TEREFALATO (PET)**

Palmas/TO

2019

RUAN VICTOR SANTOS COSTA

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO CONCRETO REFORÇADO COM
FIBRAS DE POLIETILENO TEREFALATO (PET)**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Tocantins, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, sob orientação do Prof. Dr. Fábio Henrique de Melo Ribeiro

Palmas/TO

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

- C837a Costa, Ruan Victor Santos .
Avaliação do Comportamento do Concreto Reforçado com Fibras de Polietileno Tereftalato (PET). / Ruan Victor Santos Costa. – Palmas, TO, 2019.
93 f.
- Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Civil, 2019.
Orientador: Fábio Henrique de Melo Ribeiro
1. Concreto. 2. Concreto com fibras. 3. Fibras PET. 4. Polietileno Tereftalato. I. Título

CDD 624

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

RUAN VICTOR SANTOS COSTA

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO CONCRETO REFORÇADO COM
FIBRAS DE POLIETILENO TEREFALATO (PET)**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Tocantins, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, sob orientação do Prof. Dr. Fábio Henrique de Melo Ribeiro

Data de aprovação: 12 / 07 / 2019

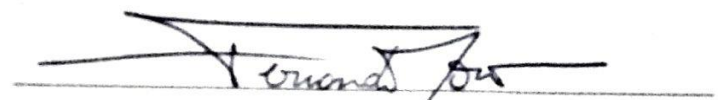
Banca Examinadora



Prof. Dr. Fábio Henrique de Melo Ribeiro, UFT



Prof. MSc. Bibiana Zanella Ribeiro, UFT



Prof. MSc. Fernando Moreno Duarte Júnior, CEULP/ULBRA

Palmas/TO

2019

*Aos meus Avós Paternos e Maternos e a
Mariela Fernandes da Silva*

AGRADECIMENTOS

A toda a minha família que me apoiou imensuravelmente na realização dessa pesquisa, a minha avó materna, Raimunda, e meu avô materno, Waldir (*in memoriam*), que contribuíram de forma colossal na minha educação e criação, aos meus avós paternos, Jeci e Luciana (*in memoriam*), que mesmo a distância sempre acreditaram existir “grandeza” no meu ser.

A Neusita dos Santos Silva, a quem considero como uma mãe, que também contribuiu de forma singular para a minha criação e sempre esteve comigo nos momentos de maiores adversidades, sem a qual essa pesquisa não seria possível.

A minha Tia Suélen Silva Santos que sempre foi uma das maiores apoiadoras na minha decisão de realizar essa graduação, que também considero como uma mãe, que sempre ouviu de forma inacreditavelmente paciente os meus relatos de problemas, que sempre me incentivou nos momentos de angústia, e não foram poucos.

A minha mãe Noely da Silva Santos que não mediu esforços para ajudar a realizar essa pesquisa, que mesmo a distância sempre compartilhou incentivo e confiança nas minhas capacidades, as vezes até maior do que as realmente existentes. Ao meu padrasto João, que mesmo cansado, conseguia encontrava energia para me ajudar em algo, e que também compartilhou de incentivo e confiança.

A minha irmã Anna Caroline Santos Costa, e os meus primos: Jorge, Marysse e Lucas, com quem compartilhei minha infância, pelo incentivo e apoio na realização desse trabalho.

A minha tia Mariela (*in memoriam*), minha Madrinha Ana Neri e minha tia Lourdes que sempre me incentivaram e acreditaram em mim.

A técnica do laboratório de Materiais, Jéssica Viana Ferreira, pela incrível paciência e ajuda na realização dos ensaios.

Ao meu amigo Lucas de Oliveira Macedo, por sempre se mostrar solícito em momentos de dificuldade.

Ao meu amigo Rafael Henriques de Camargo Ferreira, pelo incentivo e pela incrível paciência e solícitude com as minhas dúvidas no decorrer do trabalho.

A todos os colegas que em algum momento participaram na realização dos ensaios da pesquisa: Mariely Cesár, Daniel Barreto Rebeschini.

RESUMO

No presente estudo foi analisado o comportamento do concreto com a adição de fibras de polietileno tereftalato (PET), um polímero utilizado, geralmente, na produção de garrafas. As fibras foram obtidas de forma artesanal e foi realizada a caracterização geométrica e mecânica delas. A análise da incorporação de fibras foi realizada para o concreto no estado fresco e endurecido para fibras PET para os teores de fibra equivalentes a 1000g/m^3 ; 2000g/m^3 ; 3000 g/m^3 , foi utilizada uma dosagem de com fibras de aço de forma a obter um parâmetro do comportamento das fibras artesanais em relação as fibras de aço normatizadas. Os ensaios para o concreto endurecido foram realizados aos 28 dias de cura, exceto para a resistência a compressão axial onde os corpos de prova foram analisados aos 3, 7 e 28 dias. No estado fresco os resultados dos ensaios mostraram que tanto a adição de fibras tanto PET quanto as de Aço resultaram em redução no abatimento do concreto, sendo o resultado mais expressivo para o maior teor de fibra PET. No estado endurecido, verificou-se queda da resistência a compressão axial conforme o aumento dos teores de fibra PET e também para a dosagem com fibras de Aço, aos 28 dias, o menor teor de PET apresentou resistência maior que a dosagem com Aço. Verificou-se um declínio na resistência a tração conforme o aumento dos teores de PET. Para os ensaios de tenacidade e tração na flexão foi possível observar os efeitos decorrentes da compatibilidade entre o agregado graúdo e a fibra e da instabilidade pós-pico.

Palavras Chave: Concreto, Concreto com fibras, Fibras PET, Polietileno Tereftalato.

ABSTRACT

In the present study it was analyzed the behavior of concrete with the addition of polyethylene terephthalate (PET) fibers, a polymer generally used in the production of bottles. The fibers were obtained manually, and the geometric and mechanical characterization of the fibers was performed. The fiber incorporation analysis was performed for the fresh and hardened state of concrete, for the PET fibers for fiber contents equivalent to 1000g/m³; 2000 g/m³; 3000 g/m³, a dosage of steel fibers was used to obtain a parameter of the behavior of the craft fibers in relation to the normalized steel fibers. The hardened concrete tests were performed at 28 days of curing, except for the axial compression strength, where the specimens were analyzed at 3, 7 and 28 days. In the fresh state, the results of the tests showed that both the addition of PET and Steel fibers resulted in loss of the concrete workability being the more expressive result for the higher PET fiber content. In the hardened state, there was a decrease in the axial compressive strength as the PET fiber contents increased, the steel fiber dosage showed the same behavior, at 28 days, the lower PET content presented higher resistance than the dosage with Steel fiber. The tensile strength decreased as the fiber content increased. For the toughness and flexural toughness tests, it was possible to observe the effects of the compatibility between the large aggregate and the length of the fiber and the post-peak instability behavior.

Keywords: Concrete, Fiber Reinforced concrete, PET fiber, Polyethylene Terephthalate

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Esquema de concentração de tensões para um concreto sem (a) e com fibras (b) ..	28
Figura 2- Curvas médias de carga por deslocamento obtidas no ensaio de tração na flexão de concretos de $f_{ck} = 20\text{MPa}$ e com diferentes consumos de fibra de aço	32
Figura 3 - Perfis tensão posição quando o comprimento da fibra é igual (a), maior (b), menor (c) que o comprimento crítico, para um compósito reforçado com fibras que está submetido a uma tensão de tração igual o limite de resistência à tração da fibra.....	33
Figura 4 - representação esquemática de compósitos reforçados com fibras (a) contínuas e alinhadas. (b) descontínuas e alinhadas, (c) descontínuas e orientadas aleatoriamente.....	34
Figura 5- CRF em que há compatibilidade dimensional entre estas e o agregado graúdo (A) e onde não há (B)	36
Figura 6 - Classificação e geometria das fibras de aço para reforço de concreto	38
Figura 7- Produção de plástico ao longo dos anos	44
Figura 8– Resíduos plásticos encontrados na barriga de uma Baleia.....	45
Figura 9- Garrafas PET no leito do rio Tiête em Salto (SP)	46
Figura 10- Produção de garrafas PET ao longo dos anos.....	46
Figura 11- PET triturado para utilização na “creponeira” (a), Tijolo com resíduo de garrafas PET (b)	48
Figura 12- Fluxograma da utilização de garrafas Pet na construção de paredes.....	48
Figura 13 - Garrafas PET na vertical utilizadas na construção de paredes do Kouk Khleang Youth Center	49
Figura 14- – Garrafas PET na horizontal utilizadas na construção de paredes da “Bottle School”	49
Figura 15- Corte Inicial das Garrafas	51
Figura 16- Obtenção do tamanho das fibras.....	52
Figura 17- Garrafas utilizadas para representar a amostra	53
Figura 18 - Variação das características geométricas das fibras	53
Figura 19- Esquema de caracterização das fibras.....	54
Figura 20- Geometria dos corpos de prova I (a) e máquina utilizada no ensaio (b)	55
Figura 21- Fibras de aço utilizadas na pesquisa	56
Figura 22- Cimento utilizado na pesquisa	58
Figura 23- Abatimento para a dosagem PET 3 (a) e AÇO (b).....	64

Figura 24 - Ensaio de Tração por compressão diametral	69
Figura 25 - Seção de ruptura para o ensaio de tração na flexão para PET 3 (a) e Aço (b)	73
Figura 26 - Rupturas apresentadas pelos corpos de prova para as dosagens PET 1 (a) e AÇO (b), no ensaio de Tenacidade	75

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Resistência a compressão axial em função das dosagens	66
Gráfico 2 - Resistência a tração por compressão diametral aos 28 dias em função das dosagens	67
Gráfico 3 - Resistência a tração média de acordo com a resistência a compressão axial aos 28 dias.....	68
Gráfico 4- Módulo de Elasticidade aos 28 dias em função das dosagens	71
Gráfico 5 - Resistência a tração na flexão aos 28 dias em função das dosagens.....	72
Gráfico 6- Tenacidade aos 28 dias em função das dosagens.....	74
Gráfico 7- Absorção de água por imersão	77
Gráfico 8- Índice de vazios.....	77
Gráfico 9- Massa específica seca.....	79
Gráfico 10- Massa específica saturada	79

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1- Tipos básicos de Cimento Portland	22
Quadro 2- Influência do uso de diferentes tipos de cimento em características do concreto .	23
Quadro 3- Constituintes da pasta de cimento hidratada.....	25
Quadro 4- Classificação das fibras de aço quanto a conformação geométrica	39
Quadro 5- Classificação das fibras de aço quanto ao aço de origem	39
Quadro 6- Especificações técnicas das fibras de Aço	55
Quadro 7- Ensaio utilizados na caracterização dos agregados	57
Tabela 1- Propriedades típicas de fibras	29
Tabela 2- Eficiência do reforço de compósitos reforçados com fibras para diferentes orientações das fibras e em várias direções da aplicação da Tensão.....	35
Tabela 3- Propriedades das fibras PET e PP utilizadas por Fraternali et al (2011).....	42
Tabela 4- Caracterização do agregado miúdo	57
Tabela 5- Caracterização do agregado graúdo.....	58
Tabela 6- Traço utilizado.....	59
Tabela 7- Ensaio para o concreto endurecido	60
Tabela 8- Caracterização Mecânica das fibras PET artesanais	61
Tabela 9 - Valores de Módulo de Elasticidade e Resistência a tração para fibras de Polipropileno produzidas artesanalmente utilizada por Mitt (2016) e Lopez (2017).....	62
Tabela 10 – Parâmetros mecânicos e geométricos da fibra utilizada	63
Tabela 11- Abatimento do concreto de acordo com as dosagens	64
Tabela 12- Caracterização geométrica das fibras PET artesanais	89
Tabela 13- Resultados do ensaio de compressão axial em MPa	90
Tabela 14- Resultados do ensaio de tração por compressão diametral	91
Tabela 15 - Resistência a tração através da relação com o ensaio de compressão axial	91
Tabela 16- Resultados do ensaio de Módulo de Elasticidade	91
Tabela 17- Resultados do ensaio de Tração na flexão e Tenacidade	91
Tabela 18- Absorção de água por imersão, Índice de vazios, Massa específica	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABCP- Associação Brasileira de Cimento Portland

ACI – *American Concrete Institute*

Cop – Corpo de prova.

CP- Cimento Portland

CRF – Concreto Reforçado com Fibras

Fck – Resistência característica do concreto

FIHP - Federación Iberoamericana de Hormigón Premesclado

FRC- *Fibre Reinforced Concrete*

GPA- Giga-Pascal

$Lim_{sup,inf}$ - Limite superior e inferior;

Mi - Massa do corpo de prova saturado, imerso em água

MPa- Mega-Pascal

M_{sat} - Massa do corpo de prova saturado

M_s - Massa do corpo de prova seco em estufa;

NBR - Norma Brasileira Regulamentadora

PET – Politereftalato de Etileno

PP- Polipropileno

LISTA DE SÍMBOLOS

A (%) - absorção

a/c – Relação água cimento

cm – Centímetro

d - Diâmetro

d_e - diâmetro equivalente

e - Menor dimensão da seção transversal

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

g/m^3 - gramas por metro cúbico

I (%) - Índice de vazios

L - Comprimento da fibra (mm)

lc- comprimento crítico de Fibra

mm – Milímetro

MPa – Mega Pascal

Sd- Desvio padrão

w - Maior dimensão da seção transversal

μm – Micrômetro

σ_f - Limite de resistência a tração da fibra

τ_c - Menor valor entre resistência da ligação fibra matriz ou tensão de escoamento ao cisalhamento da matriz

λ - fator de forma da fibra

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Justificativa	18
1.2 Objetivos	19
1.2.1 Objetivo geral	19
1.2.2 Objetivos específicos.....	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 Concreto	20
2.1.1 Componentes do Concreto	20
2.1.1.1 Agregados	20
2.1.1.2 Água.....	22
2.1.1.3 Cimento	22
2.2 Microestrutura do Concreto	24
2.2.1 Microestrutura da fase agregado	24
2.2.2 Microestrutura da fase pasta de cimento hidratada	24
2.2.2.1 Resistência na fase pasta de cimento hidratada.....	25
2.2.2.2 Estabilidade na fase pasta de cimento hidratada	25
2.2.2.3 Durabilidade na fase pasta de cimento hidratada	26
2.2.3 Microestrutura da fase zona de transição	26
2.2.3.1 Resistência da fase zona de transição.....	26
2.2.3.2 Influência da fase zona de transição na durabilidade do concreto	27
2.3 Concreto com Fibras.....	27
2.3.1 Propriedades	30
2.3.1.1 Trabalhabilidade.....	30
2.3.1.2 Resistência.....	30
2.3.1.3 Tenacidade e Resistência ao impacto.....	30
2.3.1.4 Módulo de elasticidade, fluência e retração por secagem	31
2.3.1.5 Durabilidade.....	31
2.3.2 Teor de Fibras.....	31
2.3.3 Comprimento das Fibras	32
2.3.4 Orientação das Fibras	34
2.3.5 Influência da dimensão do agregado graúdo	35
2.3.6 Fator de Forma	36

2.4 Fibras de aço	37
2.4.1 Resistência a Compressão	39
2.4.2 Resistência à tração	39
2.4.3 Resistencia à Flexão	40
2.5. Fibras Poliméricas	40
2.5.1 Fibras de Polipropileno	40
2.5.2 Fibras PET	41
2.6. Resíduos Plásticos e o Ambiente	43
2.7. O PET e a construção civil	47
3. METODOLOGIA	50
3.1 Fibras	50
3.1.1 Fibras PET	50
3.1.1.1 Processo de Produção das fibras	50
3.1.1.2 Processos para caracterização das fibras	52
3.1.1.2.1 Fator de forma.....	53
3.1.1.2.2 Módulo de elasticidade e resistência à tração	54
3.1.2 Fibra de aço	55
3.1.3 Teor de Fibras.....	56
3.2 Agregados	57
3.2.1 Agregado Miúdo	57
3.2.1 Agregado Graúdo	58
3.3 Cimento	58
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
4.1 Caracterização das Fibras PET	61
4.2 Abatimento	63
4.3 Resistência a compressão axial	65
4.4 Resistência a tração	67
4.5 Módulo de Elasticidade	70
4.6 Tração na Flexão	71
4.7 Tenacidade	74
4.8 Absorção de água por imersão e Índice de Vazios	76
4.9 Massa específica	78
5. CONCLUSÃO	81
REFERÊNCIAS	83
ANEXOS	88

1. INTRODUÇÃO

O concreto é o material estrutural difundido de forma mais expressiva na construção civil, sua utilização engloba construções dos mais diversos usos, isto é, podemos encontrá-lo em casas, ferrovias, edifícios, pontes, usinas hidrelétricas, plataformas de extração de petróleo e etc (PEDROSO, 2009, p.14).

Diante do exposto, pode-se levantar o questionamento “*Por que o concreto é tão empregado na construção civil?*” A utilização em ampla escala do concreto, entre outros fatores, se dá pela facilidade que o concreto apresenta para a execução de diferentes elementos estruturais, podendo assumir diferentes formas e tamanhos, além disso, é um material relativamente barato; de fácil acesso no mercado e não é necessária uma mão de obra especializada.

Em contraste com o exposto acima, de acordo com Carvalho e Figueiredo Filho (2007, p.17) a utilização do concreto sozinho como material estrutural é problemática, haja vista que, este apresenta boa resistência à compressão, mas, pouco resiste à tração (cerca de 1/10 da resistência a compressão).

Nesse contexto, devido à deficiência que o concreto apresenta a esforços de tração seu uso como material estrutural é associado geralmente ao aço, que, por sua vez, possui alta resistência à tração. Dessa forma, a utilização conjunta dos materiais antes citados é o que se conhece, comumente, por concreto armado.

Bastos (2006, p.7) complementa que para que se possa existir concreto armado é imprescindível que haja o fenômeno da aderência entre os materiais constituintes de maneira que o trabalho de resistência aos esforços seja realizado de forma conjunta. Assim, pode-se constatar que a adição de aço no concreto pode ser configurada como uma forma de reforçar o concreto para que este adquira características desejadas de acordo com a sua utilização.

Outrossim, o concreto simples apresenta várias restrições de utilização devido à sua atuação de caráter frágil. Dessa forma, sendo o concreto um material heterogêneo durante seu emprego se não tomadas as devidas precauções nas fases de projeto, execução e manutenção este pode não apresentar o desempenho esperado frente ao clima, microclima e esforços (CARMONA FILHO; CARMONA, 2013, p.4).

O processo de fissuração é uma das adversidades encontradas quanto ao uso do concreto, este comportamento pode decorrer de fatores como efeito de modificações internas de comportamento ao longo do tempo denominadas efeitos reológicos, da própria constituição do material ou por efeito de esforços aplicados às peças (CARMONA FILHO; CARMONA, 2013, p.4).

Nesse contexto, cada vez mais, buscam-se novas tecnologias de reforço para o concreto que auxiliem em melhorias de características específicas como combate ao fissuramento, plasticidade, trabalhabilidade, resistência e etc. Dessa maneira, com o passar dos anos, uma das tecnologias que veem sendo desenvolvidas é o chamado Concreto Reforçado com Fibras (CRF) ou *Fibre Reinforced Concrete* (FRC).

Góis (2010), explicita que a adição de fibras no concreto implica em um retardamento do aumento de fissuras, dessa maneira, as fibras atuam como pontes de ligação, transferindo solicitações de um lado para o outro da matriz minimizando as tensões nas extremidades das fissuras.

De acordo com Mehtha e Monteiro (2008, p. 502) dentro do conjunto das fibras utilizadas em aplicações estruturais as fibras de aço são aquelas que são mais utilizadas, sendo que, ainda, são levadas em consideração em muitas aplicações não estruturais.

Não obstante, outras fibras, além das de aço, podem ser utilizadas no concreto considerando que características almeja-se obter. Nesse sentido, pode-se destacar dentro do grupo de fibras sintéticas: fibras de nylon, kevlar, poliéster, polietileno (PET) e polipropileno (PP).

As fibras plásticas como as de PET apresentam vantagens em relação às fibras de aço usualmente empregadas como: peso significativamente menor para um mesmo volume; custos mais baixos de transporte; maior resistência à corrosão, maior impermeabilidade do concreto reforçado com fibras; compatibilidade aprimorada com aditivos; menor condutividade térmica; maior trabalhabilidade; menor desgaste de máquinas e equipamentos para material utilizado (FRATERNALI; SPADEA; BERARDI; 2014, p. 293).

De acordo com Bentur e Midness (2007, p. 396) há grande interesse na utilização de fibras PET, isso se deve em grande parte ao fato a essas fibras poderem ser facilmente misturadas ao concreto utilizando dosagens convencionais e técnicas de mistura em volume de fibra de até 4%. Outrossim, as fibras PET apresentam bons desempenhos no que tange o controle pós-fissuração.

A incorporação de fibras PET ao concreto ainda demanda mais estudo para que seu emprego seja mais bem difundido, haja vista que, a fibra PET caracteriza-se como um

material que carece de normatização específica e os estudos desenvolvidos na área ainda apresentam resultados conflitantes. Além disso, o desenvolvimento de novas pesquisas contribuirá para o avanço tecnológico no que tange o emprego de materiais alternativos para incorporação em concreto. Nesse sentido, no presente trabalho será avaliado o comportamento físico- mecânico de um concreto reforçado com fibras de garrafas PET.

1.1. Justificativa

De acordo com dados expostos em matéria publicada pelo jornal Britânico *The Guardian*, apenas em 2016 mais de 48 bilhões de garrafas plásticas foram vendidas no mundo inteiro. Não obstante, para exemplificar a magnitude do consumo de garrafas, o jornal destaca que se colocadas de ponta a ponta as garrafas cobririam uma distância equivalente a mais da metade da distância entre a Terra e o sol. Outrossim, é reforçado que a maioria das garrafas plásticas são feitas de PET que, por sua vez, é um material 100% reciclável, sendo um apelo global coletar e reciclar as garrafas para evitar a poluição dos oceanos. Contudo, menos da metade das garrafas compradas em 2016 foram coletadas para reciclagem, ainda, das que foram coletadas apenas 7% retornaram como novas garrafas, sendo que o restante das garrafas acabaram no fundo do oceano (LAVILLE; TAYLOR, 2017).

Dentro do âmbito da construção civil cada vez mais se procura associar materiais ecologicamente corretos aos empreendimentos. Nesse contexto, a utilização de fibras PET pode implicar em melhorias das propriedades físico mecânicas de materiais, no que se refere ao controle de fissuração, aumento da carga pós- ruptura e ao aumento da durabilidade e resistência do concreto à ruptura (CORÓ, 2002, p.4).

Diante do exposto, pode-se constatar que a utilização de fibras PET para incorporação no concreto denota além de inovação tecnológica um apelo ambiental, haja vista que, contribuirá para a utilização de um material que vem sendo abundantemente desperdiçado e que contribui para a degradação de recursos naturais. Ademais, analisando em um viés econômico, a utilização de fibras PET, pode implicar em redução de custos na construção, haja vista que, o PET é um material de baixo custo e fácil acesso.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Analisar o efeito da adição de fibras de Politereftalato de Etileno (PET), produzidas de forma artesanal, nas propriedades físico-mecânicas do Concreto.

1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar o efeito das fibras de PET, obtidas de forma artesanal, no concreto no estado fresco: Trabalhabilidade.
- Avaliar o efeito das fibras de PET, obtidas de forma artesanal, no concreto no estado endurecido: Resistência à tração, compressão e flexão; Absorção de água e módulo de deformação.
- Caracterizar a fibra PET obtida.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Concreto

De acordo com Neville e Brooks (2010a, p.2), de forma sucinta, o concreto é qualquer produto ou massa produzido a partir de um meio cimentante. Outrossim, no que tange os materiais constituintes, Coró (2002, p.9) destaca que: “O concreto é composto basicamente pela mistura de cimento Portland, agregado miúdo, agregado graúdo, água e eventualmente adições ou aditivos químicos, composto e adensado de forma a não reter quantidade de ar acima daquela incorporada intencionalmente”.

O concreto é o material mais utilizado no âmbito da construção civil, para se ter uma ideia da magnitude da sua utilização Pedroso (2009, p.14) afirma, com base em dados da *Federación Iberoamericana de Hormigón Premesclado (FIHP)*, que, até o ano de 2009, foram consumidas 11 bilhões de toneladas de concreto, o que equivale a 1,9 toneladas de concreto por habitante por ano, valor inferior somente ao consumo de água.

Uma das razões para o emprego em grande escala do concreto é a resistência que o concreto possui a ação da água, fazendo com que o emprego deste seja ideal para estruturas destinadas a controlar, estocar e transportar água (MEHTA; MONTEIRO, 2005, p.4).

Além disso, pode-se atribuir a popularidade do concreto, também, o fato desse ser um material barato e mais facilmente disponível no canteiro de obras. Os principais componentes do concreto, o cimento Portland e os agregados, são relativamente baratos e comumente disponíveis na maior parte do mundo (CORÓ, 2002, p.6).

2.1.1 Componentes do Concreto

2.1.1.1 Agregados

De acordo com Neville e Brooks (2010b, p.40) três quartos do volume do concreto é ocupado pelo agregado. Além disso, os autores evidenciam que do ponto de vista econômico é vantajoso utilizar uma mistura que utilize volumes maiores de agregado e pequenos volumes de cimento quanto possível, mas que o custo benefício tem que ser balanceado de acordo com as propriedades desejadas para o concreto no estado fresco e no estado endurecido.

O agregado não é um componente inerte na pasta, sendo que suas propriedades físicas, térmicas e, algumas vezes químicas afetam a durabilidade e a desempenho estrutural do concreto. (NEVILLE; BROOKS, 2010b, p.40)

De acordo com a norma NBR 7211 (2005), entende-se por agregado miúdo aqueles cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 μ m e por agregados graúdos aqueles cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm.

Nesse contexto, Mehta e Monteiro (2005, p. 11) destacam que o agregado miúdo que, geralmente, é utilizado para compor o concreto é a areia, esta advém da desintegração natural e da abrasão de rochas ou processamento de rochas arenosas friáveis. Ademais, agregado graúdo é, normalmente, a pedra britada, que trata-se do produto resultante da britagem industrial de rochas, seixos rolados ou pedras arredondadas graúdas.

Martins (2008) estudou a influência da granulometria do agregado miúdos na trabalhabilidade do concreto conseguiu constatar que para o ensaio de abatimento de cone utilizando um mesmo traço variando somente o tipo de agregado miúdo, o abatimento decrescia na medida em que se utilizavam agregados miúdos com maior teor de finos. Além disso, o autor ressalva que embora tenha tido imperfeições na moldagem dos corpos de prova utilizado foi possível constatar, novamente mantendo os outros parâmetros (agregado graúdo relação água/cimento e etc.) e variando somente a granulometria do agregado miúdo, que ocorreram diferentes valores de resistência à compressão final.

Katayama (2016) estudou a influência da granulometria do agregado graúdo nas propriedades do concreto de alto desempenho utilizando brita 0; brita 1 e brita 2 com dimensões características respectivamente de 9,5 mm; 19mm e 31,5 mm comercialmente disponíveis em Campo Mourão, todas de origem basáltica e uma de suas conclusões consiste em que concretos produzidos com uma maior proporção de britas menores do que 9,5 mm apresentam resistência à compressão mais elevada. Contudo, a autora ressalva que: “A diferença da resistência em concretos produzidos com uma maior proporção de britas 1 ou 2 não é tão considerável”.

A forma e a textura superficial dos agregados tem impacto direto na resistência do concreto, especialmente para concretos de alta resistência, ainda, a resistência à flexão do concreto é mais afetada que a resistência a compressão. Outrossim, características como a textura áspera, uma grande área superficial e um agregado mais angular implicam,

geralmente, em uma boa ligação entre as partículas e a matriz cimentícia (NEVILLE; BROOKS, 2010b, p.46).

2.1.1.2 Água

A água é responsável pelas propriedades aglomerantes do cimento, ou seja, são as reações de hidratação do cimento que vão permitir a ligação entre os diferentes componentes do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2005, p.34).

2.1.1.3 Cimento

De acordo com Bauer (2000, p.35) o cimento é um material que advém do processo de pulverização do cliker, ainda, é composto em grande parte por silicatos hidráulicos de cálcio, e uma certa parcela de sulfato de cálcio natural. Além disso, pode conter adições de algumas substâncias que modificam sua propriedade e facilitam seu emprego.

No Brasil são produzidos diferentes tipos de Cimento Portland (quadro 1), os tipos básicos normatizados são para classes de resistência de 25, 32 e 40 MPa. Contudo, o cimento de classe 25 não é mais produzido desde os anos 90, assim como o CPI, geralmente, só disponível por encomenda (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2018).

Quadro 1- Tipos básicos de Cimento Portland

Pó de Cimento	Adições	Sigla
Cimento Portland Comum	Escória, pozolana (até 5%) ou Fíler calcário (6-10%)	CP I CP I-S
Cimento Portland Composto	Escória (6-34%)	CP II-E
	Pozolana (6-14%)	CP II-Z
	Fíler (11-25%)	CP II-F
Cimento Portland de Alto-Forno	Escória (35-75%)	CP III
Cimento Portland Pozolânico	Pozolana (15-50%)	CP IV
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	Fíler (até 10%)	CP V-ARI

Fonte: ABCP (2018)

O emprego de diferentes tipos de cimento tem impacto direto nas características do concreto obtido. Dessa forma, o quadro 2 elucida a influência do emprego de diferentes tipos de cimento em argamassas e concretos de função estrutural com eles constituídos, considerando como padrão de referência os cimentos Portland comuns e compostos de aplicações gerais

Quadro 2- Influência do uso de diferentes tipos de cimento em características do concreto

Propriedade	Tipos de cimento Portland						
	Comum e composto	Alto forno	Pozolânico	Alta resistência Inicial	Resistente aos sulfatos	Branco estrutural	Baixo calor de Hidratação
Resistência à compressão	Padrão	Menor nos primeiros dias e maior no final da cura	Menor nos primeiros dias e maior no final da cura	Muito maior nos primeiros dias	Padrão	Padrão	Menor nos primeiros dias e maior no final da cura
Calor gerado na relação do cimento com a água	Padrão	Menor	Menor	Maior	Padrão	Maior	Menor
Impermeabilidade	Padrão	Maior	Maior	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão
Resistência aos agentes agressivos (água do mar e de esgotos)	Padrão	Maior	Maior	Menor	Maior	Menor	Maior
Durabilidade	Padrão	Maior	Maior	Padrão	Maior	Padrão	Maior

Fonte: ABCP (2018)

2.2 Microestrutura do Concreto

De acordo com Mehta e Monteiro (2008, p.21-27) “o tipo; a quantidade; a forma e a distribuição presentes em um sólido constituem a sua microestrutura”. Ainda, no que tange o concreto, os autores elucidam que a constituição da sua microestrutura pode ser dividida em zona de transição na interface, pasta de cimento hidratada e agregados, sendo que a zona de transição na interface geralmente é menos resistente que os demais componentes do concreto.

Outrossim, as três fases entre si possuem comportamento multifásico e à revelia dos demais materiais da construção civil a microestrutura do concreto não é uma característica inerente ao material, pois, a zona de transição da interface e a pasta de cimento hidratada estão sujeitas a alterações com o tempo umidade e temperatura ambientes (LI, 2011, p.153)

2.2.1 Microestrutura da fase agregado

A fase agregado é a responsável pela massa unitária, pelo módulo de elasticidade e pela estabilidade dimensional do concreto, essas características são influenciadas de forma mais substancial pelas propriedades físicas do agregado do que pelas características químicas. Além disso, embora a fase agregado seja mais resistente que as fases zona de transição na interface e pasta de cimento hidratada, esta geralmente não tem impacto direto na resistência do concreto normal, com exceção de agregados altamente porosos e quebradiços (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 25).

2.2.2 Microestrutura da fase pasta de cimento hidratada

De acordo com Mehta e Monteiro (2008, p.27) quanto à pasta de cimento de hidratada pode-se afirmar que:

“Quando o cimento é disperso em água, o sulfato de cálcio e os compostos de cálcio formados alta temperatura começam a entrar em solução, e a fase líquida se torna rapidamente saturada com várias espécies de íons. Como resultado da interação entre cálcio, sulfato, aluminato e íons hidroxilas, e dentro de poucos minutos da hidratação do cimento, começam a aparecer cristais aciculares de trissulfoaluminato de cálcio hidratado, conhecido com etringita. Poucas horas mais tarde grandes cristais prismáticos de hidróxido de cálcio e pequenos cristais fibrosos de silicato de cálcio hidratado começam a preencher os vazios antes ocupados por água e partículas de cimento em dissolução. Depois de alguns dias dependendo da relação alumina-sulfato do cimento Portland, a etringita pode se tornar instável e se decompor para formar o monossulfoaluminato hidratado” (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 27).

O quadro 3 elucida os constituintes da pasta de cimento hidratada

Quadro 3- Constituintes da pasta de cimento hidratada

Sólidos na pasta de cimento Hidratada	Silicato de sódio Hidratado (C-S-H)
	Hidróxido de Cálcio
	Sulfoaluminatos de Cálcio
	Grão de Clinquer não hidratados
Vazios na pasta de cimento Hidratada	Espaço interlamelar no C-S-H
	Vazios Capilares
	Ar Incorporado
Água na pasta de cimento Hidratada	Água Capilar
	Água Adsorvida
	Água interlamelar
	Água quimicamente combinada

Fonte: Mehta e Monteiro (2008, p. 29-35) (adaptado)

2.2.2.1 Resistência na fase pasta de cimento hidratada

A resistência dos produtos sólidos na fase pasta de cimento hidratada está atrelada a existência das forças de Van der Waals, ainda, é de conhecimento geral que há uma relação inversa entre a existência de vazios (porosidade) e a resistência nos sólidos. Contudo, de acordo com Mehta e Monteiro (2008, p. 36):

“O espaço intermolecular da estrutura do C-S-H e os pequenos vazios que estão sob influência das forças de atração de Van der Waals não são considerados prejudiciais à resistência, porque a concentração de tensão e a subsequente ruptura quando da aplicação de carga começam nos grandes vazios capilares e nas microfissuras invariavelmente presentes” (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 36).

2.2.2.2 Estabilidade na fase pasta de cimento hidratada

A pasta de cimento hidratada é suscetível à alteração da umidade relativa. Nesse contexto, quando submetida à umidade relativa do ambiente menor que 100% da umidade do material praticamente nenhuma variação dimensional ocorrerá, contudo, o material pode perder água livre retida nas grandes cavidades, todavia, como essa água não está associada a

microestrutura dos produtos de hidratação por intermédio de qualquer ligação física- química sua perda não está associada a retração. Ademais, na medida em que toda água livre é evaporada qualquer perda a mais de água implica em retração (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 39).

2.2.2.3 Durabilidade na fase pasta de cimento hidratada

A Durabilidade na fase pasta de cimento hidratada está relacionada à impermeabilidade do material, haja vista que, a pasta de cimento é alcalina e o contato com águas ácidas é prejudicial ao material. O tamanho e a continuidade dos poros na microestrutura do sólido determinam sua permeabilidade. A relação entre permeabilidade e resistência é norteadada pela porosidade capilar ou à relação sólido/espaco (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 40).

2.2.3 Microestrutura da fase zona de transição

Zona de transição ou zona interfacial em tecnologia do concreto é região constituída pela interface entre o agregado graúdo e a pasta de cimento hidratada, está presente em uma camada de casca fina de aproximadamente 10 a 50 μm de espessura ao redor do agregado graúdo. Não obstante, a zona de transição é geralmente mais fraca que as demais fases do concreto (LI, 2011, p. 153)

2.2.3.1 Resistência da fase zona de transição

De acordo com Gois (2010, p.63) devido à exposição à ação de cargas externas, mudanças de temperatura na umidade do meio ambiente e principalmente pelo efeito da retração hidráulica, o concreto apresenta em sua superfície a presença de microfissuras na zona de transição entre a matriz e os agregados graúdos, que, por sua vez, não dispõem de muita energia para que haja aumento dessas fissuras.

Nesse contexto, Mehta e Monteiro (2008, p. 44) complementam elucidando que as microfissuras podem surgir na zona de transição do concreto antes mesmo que este seja submetido a carregamento, além disso, cargas de impacto de curta duração, retração por secagem e cargas mantidas em altos níveis de tensão propiciarão o aumento do tamanho e o número de microfissuras.

Li (2011, p. 156) explicita que quando o material é submetido a níveis de tensão de cerca de 70% da resistência última, as tensões nos grandes vazios se tornam suficientemente grandes para iniciar o processo de fissuração. Além disso, o aumento da tensão contribui para que as fissuras da matriz se espalhem até que encontrem as fissuras originadas na zona de transição da interface, dessa forma, quando a união das fissuras se torna contínua o material se rompe, pois, a direção da fissura é geralmente paralela à carga compressiva.

Outrossim, o autor elucida que para cargas de compressão é necessário dispender muita energia para que haja a formação e extensão de fissuras na matriz, contudo, para esforços de tração as fissuras se propagam rapidamente para um nível de tensão bem menor, sendo esta a razão pela qual a resistência a tração é muito menor que a resistência a compressão.

2.2.3.2 Influência da fase zona de transição na durabilidade do concreto

A durabilidade do concreto também é influenciada pela zona de transição. Elementos de concreto armado e protendido são afetados de forma negativa pela corrosão do aço embutido, ainda, a corrosão no aço é fortemente influenciada pela permeabilidade do concreto. Nesse contexto, a presença de grandes poros e microfissuras na zona de transição na interface aço agregado graúdo implicam em um concreto mais permeável que a pasta de cimento hidratada ou a argamassa. Dessa forma, o oxigênio e a umidade podem penetrar no concreto elevar a corrosão do aço mais facilmente (LI, 2011, p. 156)

2.3 Concreto com Fibras

Como discutido alhures, o desenvolvimento do processo de fissuração pode implicar na perda da capacidade do concreto em resistir a esforços de tração. Assim, o surgimento de alternativas tecnológicas se fez necessário para a utilização do concreto como material estrutural. Dessa forma, pode-se destacar a utilização de barras de aço para o reforço do concreto processo comumente conhecido como concreto armado. Não obstante, nas últimas décadas, surgiu uma nova possibilidade de reforço do concreto através do uso de fibras.

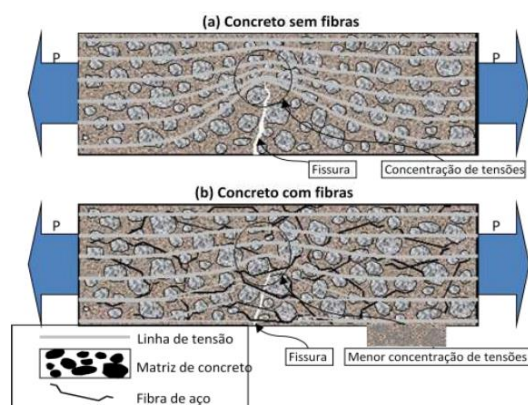
De acordo com Figueiredo (2011, p.9), as fibras constituem-se como elementos descontínuos, cujo comprimento é bem maior que a seção transversal, além disso, o autor destaca que as fibras destinadas a reforçar o concreto são denominadas macro fibras que, por

sua vez, podem ser de aço ou poliméricas e que há também microfibras, poliméricas em geral, cujo o emprego não foca o reforço do concreto.

O concreto com fibras e o concreto armado fazem parte de uma classe de compósitos (materiais com mais de uma fase) que é constituída por uma matriz frágil e algum tipo de reforço.

No concreto simples o surgimento de uma fissura constitui um empecilho à distribuição de tensões de tração, ainda, essa distribuição ineficiente dos esforços implica em uma concentração de tensão nas extremidades da fissura que se ultrapassada a tensão crítica resultará na ruptura abrupta do material. Nesse contexto, a adição de fibras de resistência e módulo de elasticidade adequados e com teor apropriado auxilia o concreto a melhorar suas características resistivas, isto é, deixando de apresentar um comportamento notavelmente frágil. Essa “melhora” decorre devido a fibras atuarem como “pontes de transferência” de tensões pelas fissuras implicando em redução de concentração de tensões nas extremidades (FIGUEIREDO, 2011, p.29). A figura 1 ilustra a ação das fibras no controle do processo de fissuração

Figura 1- Esquema de concentração de tensões para um concreto sem (a) e com fibras (b)



Fonte: Figueiredo (2011, p.30)

De acordo com Figueiredo (2011, p.30) uma particularidade benéfica na utilização de fibras é que estas propiciam reforço para o material como um todo, haja vista que, podem ser distribuídas aleatoriamente em uma peça, em contraste com a as armaduras convencionais que apenas reforçam uma posição. Ainda, o autor elucida que essa característica torna-se interessante em aplicações que envolvem estruturas contínuas, como é o caso dos pavimentos, onde as tensões de tração variam de posição na peça ao longo de um dia.

Contudo, o autor, ressalva que em caso de peças onde os esforços sejam aplicados em locais específicos como lajes suspensas apoiadas em vigas, onde as tensões ficam concentradas na parte inferior do material, a utilização de fibras torna-se impraticável, pois o seu emprego não conseguiria substituir as barras de aço de maneira rentável.

Não obstante, uma subdivisão razoável para as fibras de reforço do concreto pode ser: **Fibras poliméricas** (polipropileno, poliéster, polietileno, poliamida), **Fibras metálicas** (aço), **Fibras vegetais** (babaçu, arroz, buriti etc.), **Fibras minerais** (vidro, carbono, amianto) (CORÓ, 2002, p.8-13), sendo que o emprego de uma em detrimento da outra irá depender das características de melhora do concreto que se deseja alcançar. A Tabela 1 mostra propriedades típicas de fibras incorporadas para reforço do concreto.

Tabela 1- Propriedades típicas de fibras

Fibra	Diâmetro (μm)	Peso específico	Modulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Alongamento último (%)
Aço	5-500	7,84	200	0,5-2	0,5 - 3,5
Vidro	9-15	2,6	70-80	2-4	2 - 3,5
Crocidolite (amianto)	0,02-0,4	3,4	196	3,5	2,0 - 3,0
Crisolita (amianto)	0,02-0,4	2,6	164	3,1	2,0 - 3,0
Polipropileno	20-400	0,9-0,95	3,5-10	0,45-0,76	15-25
Kevlar	10-12	1,44	63-120	2,3 - 3,5	2 – 4,5
Carbono (Alta Resistência)	8-9	1,6-1,7	230-380	2,5-4	0,5 – 1,5
Nylon	23-400	1,14	4,1-5,2	0,75-1	16,0 – 20,0
Celulose	-	1,2	10	0,3-0,5	-
Acrílica	18	1,18	14-19,5	0,4-1	3
Polietileno	25-1000	0,92-0,96	5	0,08-0,6	3-100
Fibra de madeira	-	1,5	71	0,9	-
Sisal	10-50	1,5	-	0,8	3

Fonte: Bentur e Mindess (2007, p.2) (adaptado)

2.3.1 Propriedades

2.3.1.1 Trabalhabilidade

De acordo com Mehta e Monteiro (2005, p.508) a incorporação de quaisquer fibras no concreto implica em redução da trabalhabilidade que é proporcional ao volume e concentração das fibras no concreto. Dessa forma, devido à estabilidade que as fibras conferem ao concreto no estado fresco o valor do slump pode sofrer reduções.

Mishra (2019) expõe, utilizando as fibras de aço como comparativo, que a adição das fibras causa uma queda considerável na trabalhabilidade do concreto, afetando negativamente a consolidação do concreto no estado fresco. Além disso, a baixa trabalhabilidade implica em uma distribuição heterogênea das fibras. Geralmente, o padrão de trabalhabilidade e compactação da mistura é melhorado através do aumento da relação água / cimento.

2.3.1.2 Resistência

Para um teor de fibra pequeno e moderado, a contribuição mais significativa das fibras não é a resistência, mas a tenacidade à flexão. Não obstante, aumento do comprimento das fibras pode aumentar a resistência assim como a tenacidade. Contudo, o incremento na tenacidade é muito mais significativo que em relação à resistência (MEHTA; MONTEIRO, 2005, p. 512-513)

Li (2011, p.252) complementa que além de melhorar a rigidez e a resistência a tração, a adição de fibras pode também aprimorar a resistência a flexão dos compósitos. No entanto, a incorporação de fibras tem pouco impacto na resistência a compressão, dessa forma, quanto menor o volume de fibras quase não é possível aferir qualquer resultado para esse parâmetro. Assim, a adição de fibras com o propósito de melhoria de desempenho quanto a resistência a compressão não traz muitos benefícios. Não obstante, de acordo com o autor, a ordem de aprimoramento da adição de fibras é: Tenacidade>Resistência a flexão> Resistência a tração> Resistência a compressão.

2.3.1.3 Tenacidade e Resistência ao impacto

A maior contribuição do reforço com fibras é em relação à tenacidade à flexão (energia total absorvida no rompimento de um corpo de prova à flexão), essa propriedade está

relacionada à resistência ao impacto e à fadiga do concreto, que, além da tenacidade a flexão, também demonstram aumentos consideráveis (MEHTA; MONTEIRO, 2005, p. 514).

De acordo com Bentur e Mindess (2007, p. 204) a resistência do concreto comum é relativamente baixa a carga de impacto. No entanto, o reforço proporcionado pelas fibras é particularmente eficaz na melhoria do desempenho do concreto sob carga dinâmica, às vezes em mais de uma ordem de grandeza. Esse comportamento ocorre principalmente devido à maior capacidade de deformação e capacidade de carga residual do concreto reforçado com fibras na zona de pós – craking.

2.3.1.4 Módulo de elasticidade, fluência e retração por secagem

Segundo Mehta e Monteiro (2005, p.516), a incorporação de fibra no concreto tem baixa influência no módulo de elasticidade; retração por secagem e fluência de compressão. Contudo, os autores afirmam que a fluência a tração pode ser significativamente reduzida, quando utilizadas fibras de carbono muito rijas. Contudo, em pesquisas desenvolvidas, geralmente, constata-se que as fibras agem simplesmente como inclusões rígidas na matriz sem produzirem muito efeito na estabilidade dimensional do compósito.

2.3.1.5 Durabilidade

A durabilidade dos concretos reforçados com fibras irá depender do tipo de fibra utilizada. Não obstante, o concreto reforçado com fibras é geralmente feito com um alto teor de cimento e um baixo fator água/cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2005, p. 516).

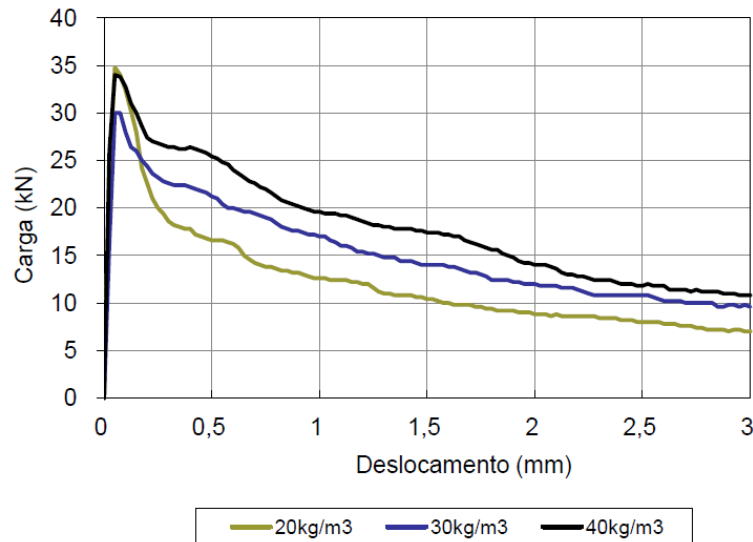
2.3.2 Teor de Fibras

Em ensaio de tração flexão com deslocamento controlado, figura 2, realizado por Figueiredo, Nunes e Tanesi (2000, apud FIGUEIREDO, 2011, p.33), utilizando fibras de aço, foi constatado que a carga resistida após a fissuração da matriz aumenta como o incremento no consumo de fibras, isto é, quanto maior o teor de fibras maior o reforço pós fissuração do concreto

Analisando a Figura 2 percebe-se que no trecho elástico inicial onde a matriz resiste aos esforços o concreto fica praticamente estável, ou seja, não sofre influência significativa do teor de fibras. Não obstante, após o deslocamento de cerca de 0,04 mm, pós fissuração, o

consumo de 40 kg/m³ de fibras proporciona uma resistência residual mais elevada que o consumo de 30 kg/m³, o qual, por sua vez, supera o consumo de 20 kg/m³.

Figura 2- Curvas médias de carga por deslocamento obtidas no ensaio de tração na flexão de concretos de $f_{ck} = 20\text{MPa}$ e com diferentes consumos de fibra de aço



Fonte: Figueiredo, Nunes e Tanesi (2000, apud FIGUEIREDO, 2011, p.33)

2.3.3 Comprimento das Fibras

De acordo com Bentur e Mindess (2007, p.109) o comprimento crítico de fibra pode ser definido como o comprimento mínimo necessário para que a fibra consiga receber o carregamento e atuar como “dissipadora” de tensão. Ainda, esse parâmetro é obtido por meio da equação 1:

$$L_c = \frac{\sigma_f d}{2\tau_c} \quad (1)$$

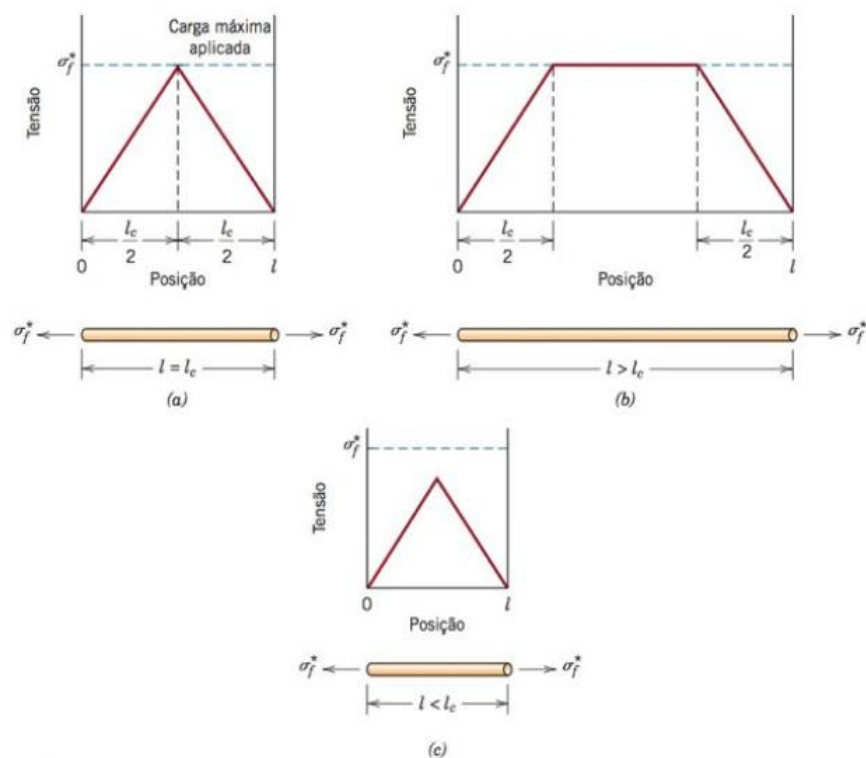
σ_f = limite de resistência a tração da fibra;

d = diâmetro da fibra;

τ_c = menor valor entre resistência da ligação fibra matriz ou tensão de escoamento ao cisalhamento da matriz;

Não obstante, quando aplicada uma tensão igual a σ_f na fibra pode-se obter diferentes diagramas perfil tensão posição a depender se o comprimento da fibra (L) é igual ($L=L_c$) maior ($L>L_c$) ou menor ($L_c>L$) que o comprimento crítico. Para um comprimento de fibra igual ao crítico a carga máxima na fibra é obtida somente no ponto médio dessa, Figura 3 (a). Ainda, com o aumento do comprimento L o reforço proporcionado pela fibra torna-se mais efetivo, Figura 3 (b). Além disso, para as fibras descontínuas com $L_c \gg L$ a matriz deforma-se ao redor da fibra tal que virtualmente não existe nenhuma transferência de tensão e há apenas um pequeno reforço devido à fibra, Figura 3 (c) (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2012, p.542).

Figura 3 - Perfis tensão posição quando o comprimento da fibra é igual (a), maior (b), menor (c) que o comprimento crítico, para um compósito reforçado com fibras que está submetido a uma tensão de tração igual o limite de resistência à tração da fibra.



Fonte: Callister Junior e Rethwisch (2012, p.542)

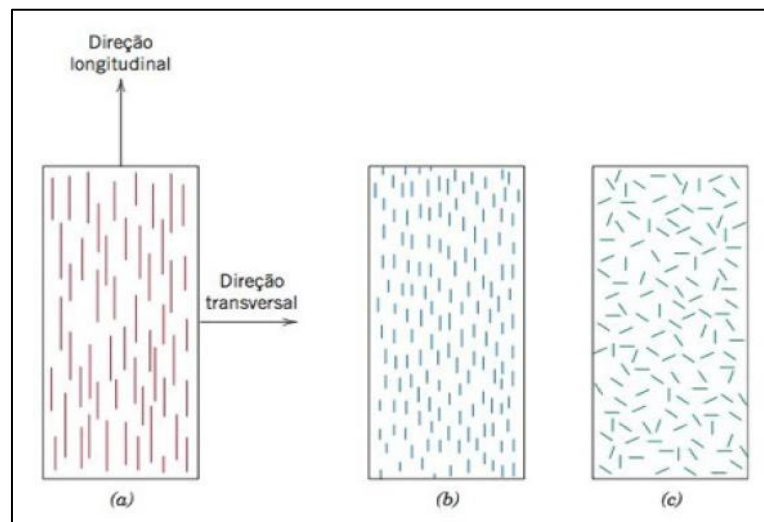
Diante do exposto, pode-se levar a conclusão que quanto maior o comprimento da fibra maior seu embutimento e maior a sua capacidade resistente pós-fissuração conferida pela fibra ao concreto. Todavia, de acordo com Figueiredo (2011, p.40):

“[...] a utilização de elevados comprimentos de fibras irá produzir dois grandes inconvenientes. O primeiro é a grande dificuldade gerada pelas fibras à mobilidade da mistura. O segundo problema de ultrapassar o comprimento crítico é que a fibra acabará por se romper no momento em que a fissura surge, o que reduz a resistência residual. Com isto, perde-se uma das principais contribuições das fibras às matrizes cimentícias, que é a redução de sua fragilidade. Por essa razão, as fibras normalmente disponibilizadas no mercado para o reforço do concreto de resistência convencional possuem comprimentos menores que o crítico e o mecanismo de reforço passa a ser governado pelo processo de arrancamento da fibra garantindo assim a tenacidade do compósito (FIGUEIREDO,2011, p.40)

2.3.4 Orientação das Fibras

A orientação das fibras umas em relação às outras, e sua distribuição são aspectos que influenciam de forma significativa sobre a resistência e outras propriedades dentro de um material compósito. Dessa forma, no que tange a orientação das fibras são possíveis dois extremos: (1) um alinhamento paralelo ao eixo longitudinal das fibras em uma única direção, (2) um alinhamento totalmente aleatório. Além disso, as fibras podem ser contínuas ou descontínuas, sendo que as fibras contínuas, normalmente, são alinhadas e as descontínuas podem ser alinhadas ou orientadas aleatoriamente, a Figura 4 elucida o exposto (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2012, p.542).

Figura 4 - representação esquemática de compósitos reforçados com fibras (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas, (c) descontínuas e orientadas aleatoriamente.



Fonte: Callister Junior e Rethwisch (2012, p.543)

De acordo com Bentur e Mindess (2007, p.114) na maioria dos casos de aplicação de concreto reforçado com fibras estas são orientadas aleatoriamente em duas ou três dimensões. Ainda, os autores explicitam que a eficiência do reforço depende da direção da tensão e da

orientação das fibras. A Tabela 2 expõe a eficiência do reforço para diferentes orientações e direções.

Tabela 2- Eficiência do reforço de compósitos reforçados com fibras para diferentes orientações das fibras e em várias direções da aplicação da Tensão

Orientação	Direção da Tensão	Eficiência do reforço
Todas as fibras paralelas	Paralela às fibras	1
	Perpendicular às fibras	0
Fibras distribuídas aleatória e uniformemente em um plano específico	Qualquer direção no plano das fibras	3/8
Fibras distribuídas aleatória e uniformemente nas três dimensões do espaço	Qualquer direção	1/5

Fonte: H. Krenchel, 1964 apud Callister Junior e Rethwisch, 2012, p. 550.

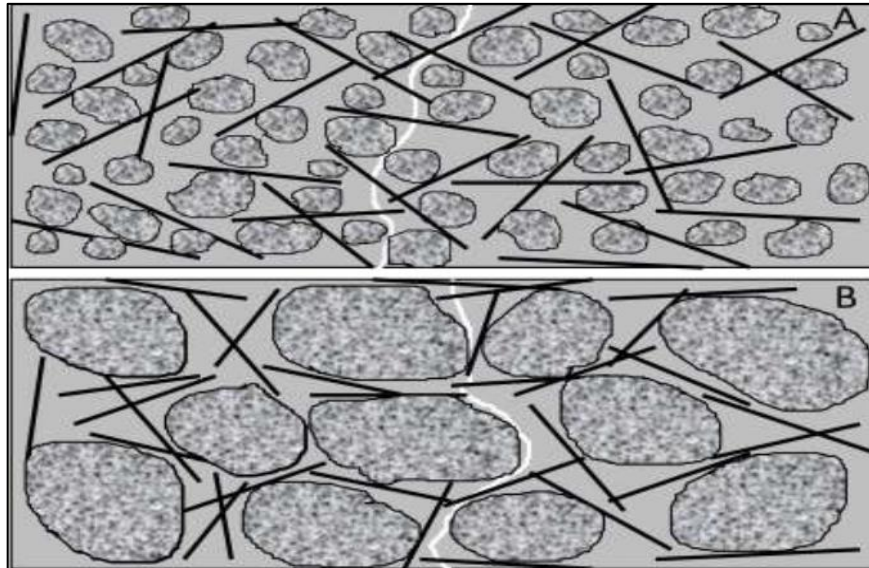
2.3.5 Influência da dimensão do agregado graúdo

A dimensão do agregado graúdo utilizado na confecção do concreto com fibras desempenha influência no comportamento mecânico do mesmo, sendo necessário haver uma compatibilidade entre as dimensões do agregado e da fibra.

De acordo com Figueiredo (2011, p.46), é recomendável que o comprimento da fibra seja igual ou superior ao dobro da dimensão máxima característica do agregado utilizado. Além disso, o autor expõe que processo de fraturamento acontece preferencialmente na região de interface entre o agregado graúdo e pasta para concretos de baixa e moderada resistência mecânica.

Dessa forma, segundo o autor; “quanto menor a fibra em relação à dimensão máxima do agregado graúdo, maior será a inclinação da mesma induzida pelo agregado em relação à superfície de fratura e, com isto, menor a eficácia da fibra como ponte de transferência de tensões”. A figura 5 elucidada o exposto.

Figura 5-CRF em que há compatibilidade dimensional entre estas e o agregado graúdo (A) e onde não há (B)



Fonte: Figueiredo (2011, p.47)

2.3.6 Fator de Forma

O fator de forma é um parâmetro que indica o grau de eficiência da fibra, está relacionado à sua conformação geométrica, sendo que, quanto maior o valor desse parâmetro, maior capacidade de resistir após a fissuração do concreto e mais esbelta é a fibra (NUNES, 2006, p. 96). As equações 2 e 3 representam os cálculos do diâmetro equivalente das fibras com seção transversal quadrada ou retangular e do fator de forma, respectivamente.

$$d_e = \sqrt{\frac{4 e w}{\pi}} \quad (2)$$

Em que:

d_e = diâmetro equivalente (mm)

e = menor dimensão da seção transversal (mm)

w = maior dimensão da seção transversal (mm)

$$\lambda = \frac{L}{d} \quad (3)$$

Em que:

λ = fator de forma da fibra

L = comprimento da fibra (mm)

d = diâmetro da fibra (mm)

No entanto, o fator de forma não é um parâmetro absoluto para definir o comportamento do compósito, pois, de acordo com ensaios realizados por Nunes, Figueiredo e Agopyan (2001 apud FIGUEIREDO, 2011, p. 44-46) para fibras com mesmo fator de forma, mas com comprimentos diferentes, as fibras mais longas apresentam melhor desempenho na capacidade de reforço para grandes níveis de abertura de fissura, em detrimento das fibras curtas, isso ocorre, segundo o autor, porque, as fibras curtas perdem área de contato de forma mais rápida com aumento de deslocamento, implicando em uma queda da carga de arrancamento.

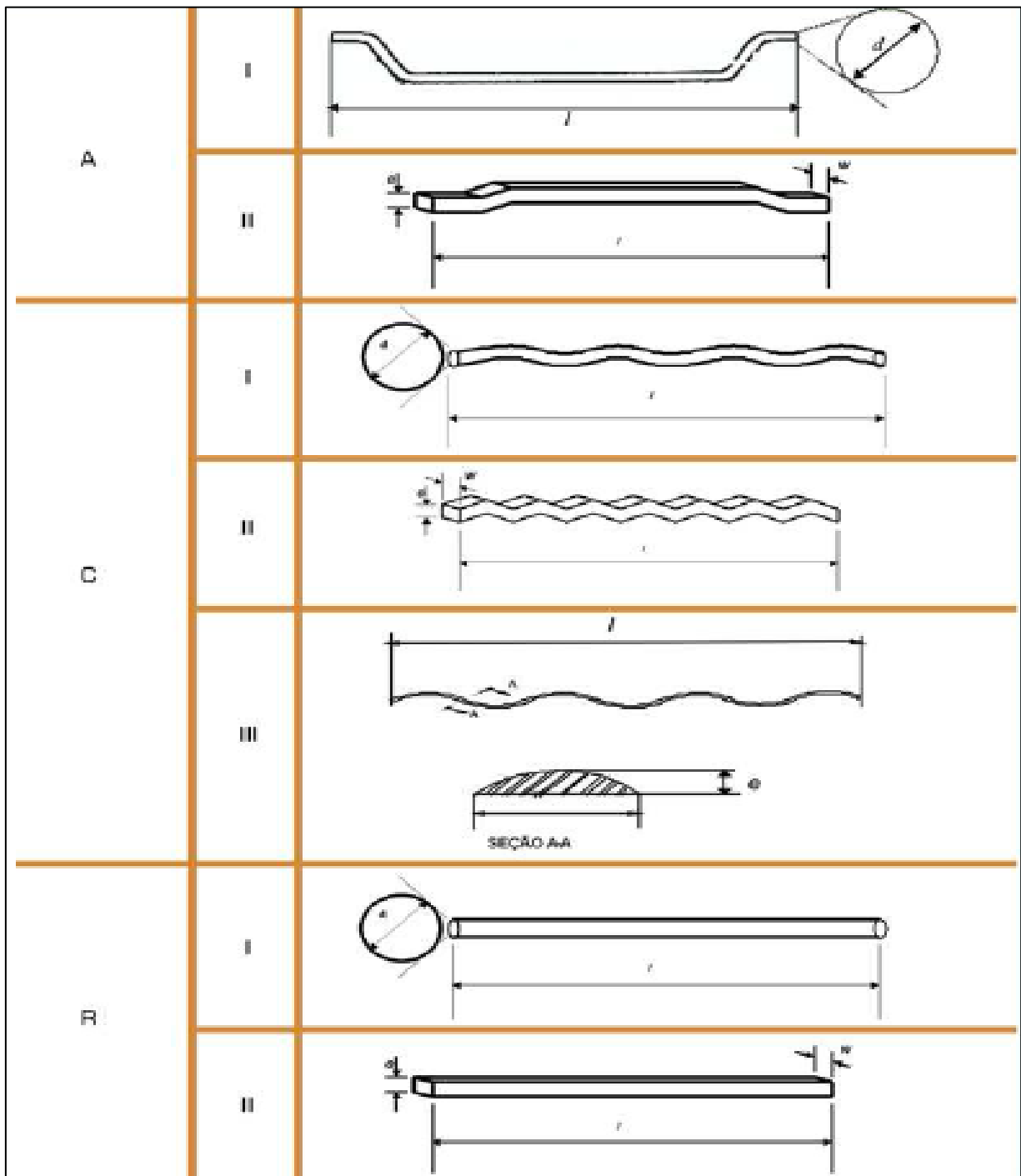
2.4 Fibras de aço

Originalmente, as fibras de aço, eram usadas, de forma mais específica, para controle de trincas, isto é, para substituir o reforço secundário em lajes planas, pavimentos, revestimento de túneis e várias aplicações de reparo. Atualmente, além do emprego anterior, as fibras de aço são utilizadas, cada vez mais, em aplicações verdadeiramente estruturais seja substituindo o aço convencional ou atuando de forma complementar (BENTUR; MINDESS, 2007, p.237)

De acordo com Oliveira (2005, p.9) as fibras de aço podem ser produzidas por diferentes processos, sendo que o mais comum consiste no corte de arame trefilado de aço com baixo teor de carbono. Ainda, o autor destaca que a grande parcela das fibras de aço é produzida a partir do aço-carbono ordinário, todavia, as fibras feitas de ligas metálicas são mais resistentes à corrosão, e são mais indicadas para concreto refratários e em estruturas marítimas.

A norma NBR 15530:2007 classifica as fibras de aço em função da sua conformação geométrica e do aço que deu origem as mesmas. Dessa maneira, quanto à conformação geométrica são previstos três tipos básicos de fibra, outrossim, quanto ao aço que deu origem as fibras são previstas três classes, a Figura 5 mostra a classificação e a geometria das fibras, ainda os Quadros 4 e 5 explicam a classificação adotada.

Figura 6 - Classificação e geometria das fibras de aço para reforço de concreto



Fonte: Figueiredo, Chama Neto, Faria (2008)

Quadro 4- Classificação das fibras de aço quanto a conformação geométrica

Tipo A	Fibra de aço com ancoragem nas extremidades
Tipo C	Fibra de aço corrugada
Tipo R	Fibra de aço reta;

Fonte: Figueiredo, Chama Neto, Faria (2008) (adaptado)

Quadro 5- Classificação das fibras de aço quanto ao aço de origem

Classe I	Fibra oriunda de arame trefilado a frio
Classe II	Fibra oriunda de chapa laminada cortada a frio
Classe III	Fibra oriunda de arame trefilado e escarificado

Fonte: Figueiredo, Chama Neto, Faria (2008) (adaptado)

2.4.1 Resistência a Compressão

As fibras de aço têm pouco efeito na melhora da resistência à compressão estática do concreto, com aumentos variando de 0 a 25% para uma faixa de conteúdo de fibra (< 2 %). Contudo, a incorporação de fibras de aço aumenta a ductilidade pós-fissuração ou mesmo a absorção de energia do material (BENTUR; MINDESS, 2007, p. 254).

2.4.2 Resistência à tração

Para fibras alinhadas na direção da tensão de tração, a incorporação de fibras de aço pode resultar em aumento de valores de resistência superiores a 100% da resistência a tração do material, como 133% para um volume de 5% de fibras de aço lisa. Todavia, para fibras distribuídas aleatoriamente o incremento de resistência pode ser muito menor variando de quase nada a 60% e alguns casos (BENTUR; MINDESS, 2007, p. 255).

2.4.3 Resistência à Flexão

De forma geral, as fibras de aço aparentam ter efeito mais efetivo sobre a resistência a flexão do que nas resistências de tração ou compressão, chegando a alcançar aumentos de resistência de mais de 100%. Não obstante, o aumento na resistência à flexão é particularmente sensível não só ao volume da fibra, mas também ao formato das fibras, com maiores proporções levando a maiores aumentos de resistência (BENTUR; MINDESS, 2007, p. 256).

2.5. Fibras Poliméricas

2.5.1 Fibras de Polipropileno

As fibras de polipropileno (PP) são fibras sintéticas produzidas a partir da resina de polipropileno do tipo homopolímero em vários tamanhos e formas, e com diferentes propriedades. Ainda, suas principais vantagens são: resistência aos álcalis, ponto de fusão relativamente alto (165 °C), baixo preço do material. Todavia, a baixa resistência ao fogo; sensibilidade à luz do sol e ao oxigênio; o baixo módulo de elasticidade (1-8 GPa); e a fraca ligação com a matriz cimentícia, configuram-se como desvantagens do uso do material (BENTUR; MINDESS, 2007, p.370).

De acordo com Lucena (2017, p.30), em virtude do peso específico das fibras de PP ser baixo, a incorporação de um teor alto no concreto reduz o peso do mesmo, comportamento esse, contrastante com a utilização de fibras de aço, onde a inclusão no concreto aumenta o peso estrutural.

As fibras PP podem ser encontradas em três formas geométricas diferentes: monofilamentadas, multifilamentadas (filme fibrilado) e fita extrusada. Ainda, as fibras monofilamentadas e fibriladas possuem essencialmente a mesma resistência a tração (140-690 MPa) e módulo de elasticidade (3-5 GPa). Contudo, em termos de combate ao processo de fissuração recomenda-se o emprego das fibras monofilamentadas por serem mais eficazes que as fibras fibriladas (BENTUR; MINDESS, 2007, p.371).

2.5.2 Fibras PET

A utilização de fibras para reforço do concreto tem como intuito melhorar as propriedades mecânicas do concreto, principalmente no que tange o controle de fissuras, aumento da capacidade de carga pós-ruptura e ao aumento da durabilidade e tenacidade do material cimentado.

O PET é um tipo de poliéster formado a partir do ácido tereftálico e do etileno glicol e seu uso é largamente empregado nas indústrias de embalagem por causa da sua alta estabilidade, alta tolerância a pressão, não reatividade com substâncias e sua excelente performance em conservar o gases, dessa forma, tornando-o ideal para preservar o gás em bebidas (RHAMANI et al., 2013).

No que tange a utilização de fibras PET pode-se destacar a pesquisa realizada por Coró (2002) que estudou a influência do comprimento e do teor de fibras PET incorporadas no concreto. Ainda, a autora explicita que o emprego das fibras de PET, embora não tenha implicado em aumento significativo de resistência, a utilização dessa fibra pode ser favorável em casos onde a finalidade do concreto não necessite de alta resistência como é o caso do concreto utilizado para a execução de meio-fios, blocos, pisos e etc. Aliás, conclusão também compartilhada por Schettino (2015) e Pelisser (2002) sendo que o último complementa que pode-se utilizar fibras de PET para reforços de diferentes materiais poliméricos ou no caso de concretos e argamassas com a utilização de cimento não alcalino.

Da pesquisa realizada por Coró (2002) que estudou a incorporação de fibras de 15mm, 30mm e 60 mm de comprimento no concreto com variações de teores iguais a 1000, 3000 g/m³, 5000 g/m³ e 7000 g/m³, pode-se destacar que para a resistência à compressão simples o melhor desempenho do concreto com as fibras PET deu-se com as fibras de menor comprimento e maior quantidade. Ademais, quanto à resistência por compressão diametral todas as misturas obtiveram valores menores que os valores de referência, porém, dentro das misturas estudadas aquelas que demonstraram melhor performance foram as de menor comprimento.

Não obstante, Schettino (2015) que em sua pesquisa utilizou fibras de 30 mm para os teores de 5%, 10%, e 15% de fibra PET obteve como resultado que a resistência à compressão axial apresentou queda com o aumento do teor de fibras, além disso, para a resistência a compressão diametral notou-se um declínio de resistência para os corpos de prova cilíndricos

ensaiados com cura de 7 dias para os com cura de 28 dias, sendo mais severa nos corpos de prova com 5% e 15% de fibras incorporadas.

Pelisser (2002) que utilizou fibras com 10, 15 e 20 mm com teores de 0,05%, 0,18% e 0,30% concluiu que para os ensaios de resistência a compressão axial e resistência à tração por compressão diametral, não houve diferença significativa para corpos de prova cilíndricos ensaiados com adição de fibra para os corpos de prova sem adição de fibra em idades de 7 a 28 dias, ademais, foi constatado um aumento significativo da tenacidade e da resistência ao impacto de forma mais expressiva para os concretos com volume de 0,30% e fibras de 20 mm, isto é, maior teor e maior comprimento. Contudo, o autor ressalva que a melhora de performance foi perdida aos 150 dias devido ao processo de degradação das fibras no meio alcalino do concreto.

Fraternali et al. (2011) estudou as propriedades termomecânicas do concreto reforçado com fibras e PET e fez uma comparação com concreto sem adições de fibra e com fibras de polipropileno (PP), para tanto o autor utilizou três tipos de fibra PET com diferentes atributos. De acordo com a Tabela 3.

Tabela 3-Propriedades das fibras PET e PP utilizadas por Fraternali et al (2011)

Propriedade	PET (a)	PET (b)	PET (c)	PP
Peso específico	1,34	1,34	1,34	0,9
Seção transversal	Circular	Circular	Circular	Oval
Aspecto	Liso	Liso	Ondulado	Nervurado
Diâmetro (mm)	1,10	0,7	0,7	0,8 x1,30
Comprimento (mm)	40	52	52	47
Resistência a Tração (Mpa)	550,00	263,72	274,29	250,00
Tensão última (%)	27	26	19	29

Fonte: Fraternali et al. (2011) (adaptado)

Ainda, para corpos de prova cúbicos ensaiados aos 28 dias em comparação com um concreto sem fibras o autor obteve como resultado para as fibras PET (a) um decréscimo de 18% na condutividade térmica, acréscimo de 35% na resistência a compressão, acréscimo de 41% na resistência pré-fissuração e tenacidade a fratura, acréscimo de 15 % na ductilidade no surgimento das primeiras fissuras. Para as fibras PET (b) obteve-se acréscimo de 22% na

resistência a compressão, acréscimo de aproximadamente 2% resistência pré-fissuração e tenacidade a fratura, 8% na ductilidade no surgimento das primeiras fissuras. Para as fibras PET (c) obteve-se um acréscimo de 8 a 12% tanto para a resistência a compressão quanto para a resistência pré-fissuração e tenacidade a fratura (FRATERNALI et al., 2011, p. 2374)

Não obstante, em comparação com as fibras PP, as fibras PET (a) apresentaram resistência térmica ligeiramente inferior, resistência a compressão superior, menor ductilidade e resistência ao aparecimento de primeiras fissuras. As fibras PET (b) apresentaram resistência a compressão ligeiramente maior, menor resistência ao surgimento de fissuras, menor ductilidade. As fibras PET (c) apresentaram menor resistência a compressão e surgimento de fissuras, menor ductilidade. (FRATERNALI et al., 2011, p.2374)

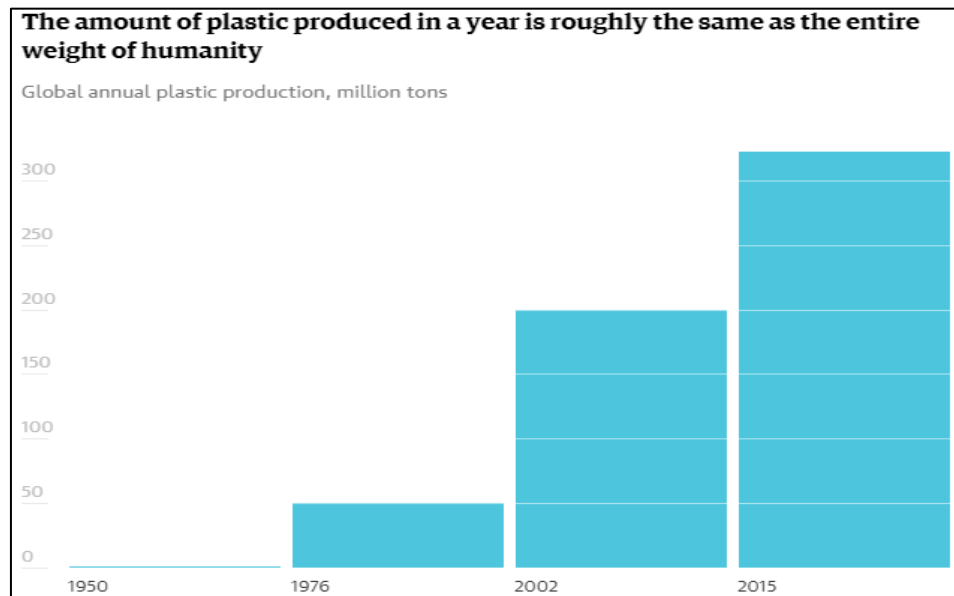
2.6. Resíduos Plásticos e o Ambiente

Desde 1950 a produção de plástico ultrapassou quase que a de todos os outros materiais produzidos mundialmente, segundo o relatório “*The State of Plastics*” publicado pela Organização das Nações Unidas (ONU), além disso, a maioria dos plásticos são projetados para serem descartados após serem utilizados somente uma vez, sendo que esses materiais, geralmente, não são biodegradáveis (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2018, p.5).

O aumento dos resíduos plásticos representa um perigo real a fauna aquática, principalmente a marinha, e aos seres humanos, isso, porque, a grande parcela dos plásticos se decompõe em partículas menores denominadas “micro plásticos” que se ingeridas por peixes podem ser transferidas para o seu tecido animal. Não obstante, quando esses animais são ingeridos pelos seres humanos esses “micro plásticos” passam a fazer parte da cadeia alimentar humana, sendo que produtos como o isopor podem conter estireno e benzeno que são altamente tóxicos se ingeridos, podendo causar danos ao sistema nervoso, pulmões e órgãos reprodutivos (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2018, p.5).

Ademais para se ter uma ideia da magnitude da produção de plástico em todo o planeta, a quantidade de plástico produzida em um ano corresponde aproximadamente ao peso total da humanidade (LAVILLE; TAYLOR, 2017). A figura 7 elucida o exposto

Figura 7- Produção de plástico ao longo dos anos



Fonte: Laville e Taylor (2017)

As utilizações mais comuns para os plásticos encontrados no ambiente, em ordem de magnitude são (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2018, 5):

- Pontas de cigarro;
- Garrafas plásticas;
- Tampas de garrafas plásticas;
- Embalagens de alimentos;
- Sacolas plásticas;
- Tampas de Plástico
- Palhetas e agitadores

Os materiais acima listados são os produtos residuais de uma cultura que trata o plástico como material descartável em vez de um recurso valioso para ser aproveitado (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2018, p.5).

A vida marinha é uma das principais vítimas da poluição derivada de resíduos plásticos, para se ter uma ideia do flagelo que os plásticos representam para os animais marinhos, no Golfo de Davao, nas Filipinas uma baleia foi encontrada com cerca de 40 kg de resíduos plásticos na sua barriga. A baleia morreu de inanição e desidratação, haja vista que,

as baleias absorvem a água dos alimentos que ingerem, contudo, não havia sinais que algum alimento tivesse chegado ao intestino por vários dias, dessa forma, seu corpo estava sendo destruído internamente, pois, seu ácido estomacal, incapaz de dissolver o lixo plástico criou buracos no seu estômago, a figura 8 mostra o plástico encontrado na barriga da baleia no processo de autópsia (BORUNDA, 2019).

Figura 8– Resíduos plásticos encontrados na barriga de uma Baleia



Fonte: Borunda (2019) (adaptado)

No Brasil, no ano de 2015, os moradores de Salto (SP), após forte chuva na região, se depararam com uma grande quantidade de garrafas PET e outros lixos plásticos acumulados na margem do rio Tietê que passa pela cidade. As garrafas e demais materiais foram trazidos pela correnteza do rio que passa pela capital do estado e se depositam nos leitos devido as curvas causando diversos problemas para a fauna e flora local, a figura 9 apresenta o acúmulo de garrafas no leito do rio (BELLINE, 2015)

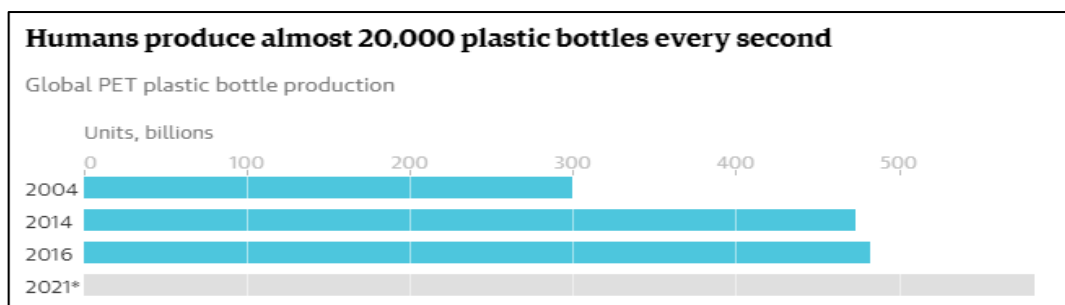
Figura 9- Garrafas PET no leito do rio Tiête em Salto (SP)



Fonte: Belline (2015) (adaptado)

A grande maioria das garrafas utilizadas em embalagens de refrigerante e água são feitas de PET que é altamente reciclável, contudo, as medidas utilizadas para impedir que essas garrafas poluam os oceanos não estão conseguindo acompanhar o crescimento da sua produção (LAVILLE; TAYLOR, 2017). A figura 10 apresenta a produção de garrafas PET mundialmente ao longo dos anos.

Figura 10- Produção de garrafas PET ao longo dos anos



Fonte: Laville e Taylor (2017)

Outrossim, a poluição causada pelos plásticos não se restringe apenas ao viés ambiental e de saúde pública, mas também engloba a economia. De acordo com United Nations Environment Programme (2018, p.5) apenas na região Ásia Pacífico, a poluição derivada dos plásticos custa as indústrias de pesca, turismo e transporte marítimo 1,3 bilhões

de dólares por ano. Ainda, na Europa a limpeza de resíduos plásticos de costas e praias custa 630 milhões de euros por ano.

2.7. O PET e a construção civil

O aumento do número de pessoas no planeta tem impacto direto na demanda por novas moradias o que, por sua vez, fomenta o mercado da construção. Não obstante, o setor da construção é responsável por mais de um terço da energia dispendida na emissão de gases de efeito estufa, sendo que aproximadamente 80 a 90% da energia que um edifício usa durante todo o seu ciclo de vida é consumida para aquecimento, resfriamento, iluminação e outros aparelhos. O restante 10-20% é consumido durante a construção, fases de construção e demolição (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2008, p.1-8).

O resíduo plástico proveniente de garrafas PET está entre os mais comuns dos encontrados na natureza, dessa forma, contribuindo para a degradação do ambiente da fauna e flora, com ênfase na marinha, e para saúde dos seres humanos. Diante do exposto, cientistas, engenheiros e pesquisadores vêm procurando novas formas de aproveitar essa matéria prima que por diversas vezes é abundantemente desperdiçada.

Nesse sentido, a utilização de garrafas PET na construção pode auxiliar na diminuição da fabricação de novos materiais implicando, dessa forma, na redução de gases do efeito estufa, outrossim, utilizar o pet como material alternativo possivelmente resultará na diminuição do orçamento de aquisição de materiais para construção, haja vista que, o PET é um material encontrado em abundância e frequentemente descartado após o primeiro uso.

Recentemente, a utilização de garrafas PET vem ganhando espaço no âmbito da construção civil. O economista Mário Augusto Batista Rocha desenvolveu um projeto sobre “Composto de Resíduo Plástico” (CREP) a ideia consiste na trituração do PET, figura 11 (a), e em seguida submetê-lo junto com areia, seixo e outros materiais a um aquecimento numa máquina chamada “Creponeira” o material resultante se assemelha ao asfalto. Ainda, o material desenvolvido por Rocha em relação a peças de “barro” comum fica pronto mais rapidamente, o material resultante da “creponeira” é simplesmente colocado em moldes para a confecção de diversos artefatos tais como blocos para pisos de calçadas, meio-fio, estacas, entre outros, figura 11 (b) (INOVAÇÃO...2017)

Figura 11- PET triturado para utilização na “creponeira” (a), Tijolo com resíduo de garrafas PET (b)

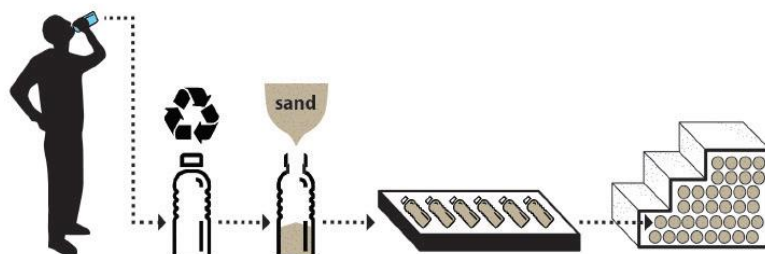


Fonte: Inovação... (2017) (adaptado)

No Camboja a organização humanitária “Husk Cambodia” auxilia a população local a utilizar garrafas PET como insumo na construção de casas. Utilizar materiais reciclados, de acordo com a organização, tais como as garrafas PET, na construção civil é uma maneira de reduzir custos na construção, promover a educação da população local sobre reciclagem e os benefícios para o meio ambiente (BUILDING TRUST INTERNATIONAL, 2019, p.7).

As garrafas PET podem ser utilizadas na construção de paredes tanto na vertical quanto na horizontal, por exemplo, a depender da espessura da parede desejada. Geralmente, essas garrafas são preenchidas com resíduos de construção, areia etc. A figura 12 elucida o processo.

Figura 12- Fluxograma da utilização de garrafas Pet na construção de paredes



Fonte: Building Trust International (2019, p.8)

A figura 13 demonstra o processo de utilização de garrafas PET na vertical na construção de paredes do “Kouk Khleang Youth Center” figura 13 (d), no Camboja. Após

construir uma armação de madeira, figura 13 (a), a garrafas são posicionadas na vertical com auxílio de telas metálicas, figura 13 (b), e em seguida fixadas com argamassa, figura 13 (c). Não obstante, um dos principais benefícios dessa prática é a redução do montante de concreto utilizado (BUILDING TRUST INTERNATIONAL, 2019).

Figura 13 - Garrafas PET na vertical utilizadas na construção de paredes do Kouk Khleang Youth Center



Fonte: Building Trust International (2019, p.7) (adaptado)

Ainda, as garrafas também podem ser utilizadas na horizontal utilizando, basicamente, o mesmo raciocínio usado para as garradas na vertical. A figura 14 mostra a utilização de garrafas PET na horizontal na construção de paredes da “Bottle School” em San Pablo, nas Filipinas.

Figura 14- – Garrafas PET na horizontal utilizadas na construção de paredes da “Bottle School”



Fonte: Building Trust International (2019, p.8) (adaptado)

3. METODOLOGIA

A seguinte pesquisa pode ser classificada quanto a sua finalidade como uma *pesquisa aplicada*, isto é, o presente estudo tem como um de seus intuitos produzir um conhecimento que possa ser útil para aplicações na realidade da construção civil.

O desenvolvimento experimental desse trabalho consistiu basicamente na avaliação da incorporação de teores de fibra de PET (1kg/m^3 ; 2kg/m^3 , 3kg/m^3) no concreto com o intuito de avaliar o comportamento do mesmo, tendo em vista que as fibras foram obtidas artesanalmente, foram utilizados um concreto referência (sem adição de fibras) e um concreto reforçado com fibras de aço (normatizadas) para auxiliar na análise nos dados.

3.1 Fibras

3.1.1 Fibras PET

3.1.1.1 Processo de Produção das fibras

As garrafas utilizadas para a fabricação das fibras foram obtidas por meio de coleta no município de Porto Franco- MA, por constituir o município de residência do autor. Em primeira abordagem, as garrafas passaram por assepsia por meio de lavagem com água e sabão neutro, em seguida foi retirado o excesso de água com o auxílio de um pano e deixadas secar ao ar, em virtude de se almejar fibras mais homogêneas foram descartados os anéis superiores e inferiores das garrafas, conforme a figura 15.(a), em seguida, com auxílio de tesouras, as garrafas foram cortadas em tiras longas, figura 15 (b).

Figura 15- Corte Inicial das Garrafas

Fonte: Elaborada pelo autor

Após a obtenção das tiras, foram confeccionados moldes com o tamanho desejado para as fibras, filete branco no canto superior da figura 16, esses possuíam dimensões de 5 mm x 25 mm, ademais, com o auxílio dos moldes e de uma tesoura as tiras foram cortadas em tamanhos menores, obtendo-se, dessa forma, o comprimento desejado das fibras conforme a figura 16. As dimensões escolhidas para as fibras foram pautadas nas dimensões utilizadas nas pesquisas de Pelisser (2002), Coró (2002) e Schettino (2015), ressalva-se, no entanto, que a largura das fibras foi aumentada com o intuito de facilitar o processo de corte.

Figura 16- Obtenção do tamanho das fibras



Fonte: Elaborada pelo autor

3.1.1.2 Processos para caracterização das fibras

Como as fibras em questão tratam-se de fibras artesanais e foram utilizados diferentes tipos de garrafas, para melhor caracterizá-las e entender o seu comportamento no concreto fez-se necessário obter os parâmetros de módulo de elasticidade, resistência a tração e fator de forma de tais fibras, para tanto foram utilizadas os dois modelos de garrafas mais utilizados para representar a amostra. A figura 17 expõe os modelos.

Figura 17-Garrafas utilizadas para representar a amostra



Fonte: Elaborada pelo autor

3.1.1.2.1 Fator de forma

Como as fibras obtidas foram cortadas manualmente, essas ficaram suscetíveis a imperfeições do corte, conforme a figura 18.

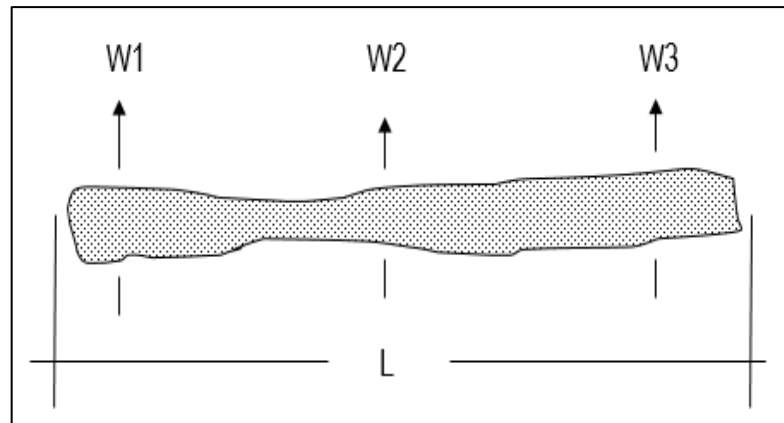
Dessa forma, foi utilizada metodologia abordada por Mitt (2016) e Lopes (2017) para obter o comprimento (L), espessura e largura (W) média das fibras, sendo que a para a última dimensão foram aferidos três valores ao longo da fibra, conforme a figura 19. O fator de forma foi obtido conforme as equações (2) e (3).

Figura 18 - Variação das características geométricas das fibras



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 19- Esquema de caracterização das fibras



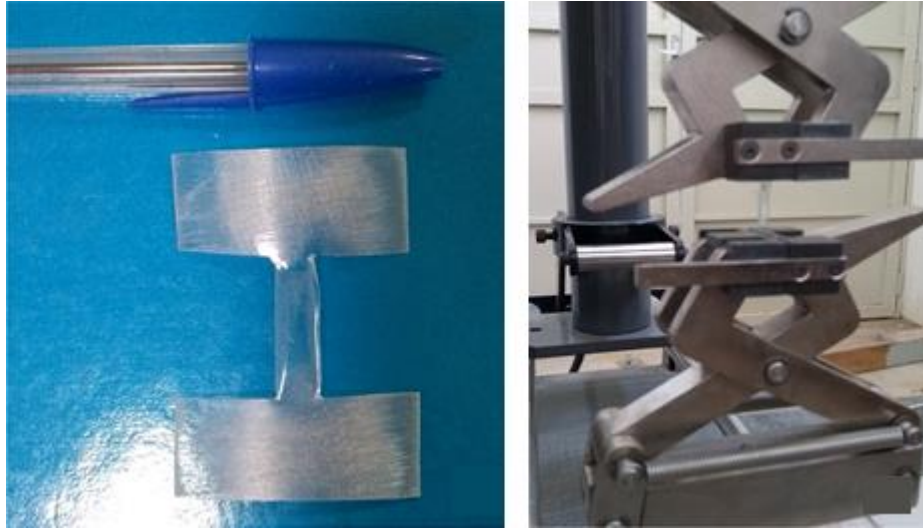
Fonte: (MITT, 2016, p.39)

3.1.1.2.2 Módulo de elasticidade e resistência à tração

O procedimento para a obtenção do módulo de elasticidade e resistência à tração foi norteado pela norma ASTM D3379-5 (1989), que aborda os ensaios para determinação da Tensão de ruptura e Módulo de deformação de materiais de filamento único. De acordo com o exposto na norma, as fibras foram fixadas e alinhadas pelas pontas em um equipamento móvel com velocidade constante até que houvesse a ruptura.

Não obstante, para a realização do ensaio foram utilizados moldes “I” de acordo com a metodologia proposta por Lopes (2017), haja vista que, realizar o ensaio com o formato próprio da fibra, o rompimento acontecia nas extremidades e induzia leituras equivocadas dos resultados. Nesse sentido, a figura 20 (a) apresenta a geometria do corpo de prova utilizado e a figura 20 (b) a máquina utilizada para a realização do ensaio.

Figura 20- Geometria dos corpos de prova I (a) e máquina utilizada no ensaio (b)



(a)

(b)

Fonte: Elaborada pelo autor

3.1.2 Fibra de aço

As especificações técnicas das fibras utilizadas na pesquisa são expostas no Quadro 6 de acordo com o fabricante.

Quadro 6- Especificações técnicas das fibras de Aço

Material	Aço carbono tipo I ASTM A-280
Finalidade	Reforço de concreto/concreto projetado
Tamanho nominal	1 1/2" - 38 mm
Comprimento	37 a 40 mm
Largura	2,0 a 2,7 mm
Espessura	0,2 a 0,7 mm
Altura	1,5 a 2,5 mm
Aspecto	Arame de aço corrugado
Resistência	71 a 88 kf/mm ² à tração
Massa específica	7,8 kg/l

Fonte: Sheikan Ancor-jet (2019)

O fabricante expõe que as fibras são oriundas de arame trefilado de aço e que possuem seção retangular. Dessa forma, se utilizada a classificação da NBR 15530 (2007) as fibras utilizadas podem ser classificadas como pertencentes a classe C I conforme o exposto no item 2.4. a figura 21 mostra as fibras utilizadas.

Figura 21- Fibras de aço utilizadas na pesquisa



Fonte: Sheikan Ancor-jet (2019)

3.1.3 Teor de Fibras

Os teores de PET foram escolhidos, de acordo com pesquisa realizada por Pelisser (2002), com base em estudos preliminares, para teores de fibra maiores que 0,3% em volume, que em sua pesquisa equivale a 3900 g/m^3 , o concreto apresenta problemas de trabalhabilidade e homogeneidade.

O teor de fibras de aço foi definido de acordo com consumos regulares amplamente difundidos, que de acordo com Figueiredo (2011, p.101) estão na ordem de 40 kg/m^3 .

3.2 Agregados

Os agregados utilizados na pesquisa foram caracterizados conforme o Quadro 7.

Quadro 7- Ensaio utilizados na caracterização dos agregados

Material	Norma utilizada
Areia e Brita	NBR NM 52: 2003 – Determinação da massa específica e massa específica aparente
	NBR NM 45: 2006 – Determinação da massa unitária e volume de vazios.
	NBR NM 248: 2003- Determinação da composição granulométrica.

Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.1 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado na pesquisa foi classificado como areia média, as características do agregado são apresentadas na tabela 5.

Tabela 4- Caracterização do agregado miúdo

Dimensão máxima característica (mm)	2,4
Módulo de finura	2,18
Massa específica(kg/m³)	2180
Massa unitária (kg/m³)	1750

Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.1 Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado foi a Brita II a tabela 6 explicita as características do agregado.

Tabela 5- Caracterização do agregado graúdo

Dimensão máxima característica (mm)	25
Módulo de finura	2,08
Massa específica(kg/m³)	2630
Massa unitária (kg/m³)	1505

Fonte: Elaborado pelo autor

3.3 Cimento

O cimento utilizado na pesquisa é caracterizado como CP II E 32 com massa específica de 3150 kg/m³. A figura 22 expõe o modelo de cimento utilizado.

Figura 22- Cimento utilizado na pesquisa



Fonte: Votorantim cimentos (2019)

3.4 Dosagem

Findado o processo de caracterização dos materiais a etapa subsequente foi a dosagem. Assim, essa etapa foi pautada de acordo com o exposto em ACI 2111-91. Esse método consiste na adoção sistêmica de sete passos para a obtenção da dosagem (Seven Steps

Method). Conforme o método, foi considerado um slump máximo de 10 ± 2 cm, haja vista que, a incorporação das fibras no concreto, reduz a trabalhabilidade e $S_d = 5,5$ MPa, que representa um valor de desvio padrão para um controle tecnológico razoável, tendo em vista a simular uma aplicação em caso de concreto feito em obras.

Ainda, para a aplicação do método foi considerado $f_{ck} = 25$ MPa de acordo com a NBR 6118 (2014) é a classe de concreto recomendada para ambientes urbanos de agressividade moderada. A tabela 4 expõe o traço utilizado na pesquisa.

Tabela 6- Traço utilizado

Cimento	Agregado miúdo	Agregado Graúdo	a/c
1	1,337	2,732	0,48

Fonte: Elaborado pelo autor

3.5 Ensaios de caracterização do concreto dosado

3.5.1 Estado fresco

Para o estado fresco foi realizado o ensaio de Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone NBR NM 67 (1998).

3.5.2 Estado endurecido

Para os ensaios no estado endurecido foram utilizadas as seguintes normas:

- NBR 9778(2005) – Determinação da Absorção de água por imersão- Índice de vazios e massa específica;
- NBR 5739 (2007) – Concreto: Ensaio de compressão de corpos cilíndricos;
- NRB 7222 (1994) – Determinação da Resistência a tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos;
- NBR 12142 (1991) - Determinação da tração na flexão de corpos de prova prismáticos
- NBR 8522 (2017) – Determinação do módulo estático de Elasticidade à compressão.

Foram utilizados um total de 3 Corpos de Prova (CP) por ensaio, sendo os resultados para cada ensaio obtido por meio da média dos valores individuais, exceto para o ensaio de Determinação da tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Dessa forma, para cada dosagem foram feitos de 18 corpos de prova cilíndricos e 1 corpo de prova prismático, assim, o experimento como um todo utilizou 90 corpos de prova cilíndricos e 5 corpos de prova prismáticos. A tabela 7 correlaciona os ensaios realizados, o tempo de cura e o número de corpos de prova utilizados.

Tabela 7- Ensaio para o concreto endurecido

Norma	Tempo de cura	1000 g/m ³ de PET	2000 g/m ³ de PET	3000 g/m ³ de PET	FIBRA DE AÇO	REF.	Total
NBR 9778 (2005)	28	3	3	3	3	3	15
	3	3	3	3	3	3	15
NBR 5739 (2007)	7	3	3	3	3	3	15
	28	3	3	3	3	3	15
NBR 7222 (1994)	28	3	3	3	3	3	15
NBR 12142 (1991)	28	1	1	1	1	1	5
NBR 8522 (2017)	28	3	3	3	3	3	15

Fonte: Elaborado pelo autor

Não obstante, para as análises estatísticas de cada ensaio foram levadas em conta os parâmetros dispostos nas equações 4 e 5, sendo que os valores espúrios foram descartados.

$$Lim_{sup,inf} = \text{média} \pm 2 (\text{desvio padrão}) \quad (4)$$

Onde:

$Lim_{sup,inf}$ = Limite superior e inferior;

$$\text{Coeficiente de variação (\%)} = \frac{\text{Desvio padrão}}{\text{média aritmética}} \quad (5)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente tópico apresenta os resultados obtidos em cada ensaio. Dessa forma, caracteriza as fibras utilizadas e através da análise de gráficos e dados buscou-se constatar tendências acerca da influência do teor de fibras PET nas características do concreto.

4.1 Caracterização das Fibras PET

A tabela 8 expõe os resultados da caracterização mecânica das fibras PET, os resultados da caracterização geométrica das fibras são apresentados na tabela 11 (anexo A).

Tabela 8- Caracterização Mecânica das fibras PET artesanais

Fibra	Largura (mm)	Espessura(mm)	Comp. Base (mm)	Força Máx. (N)	Área (mm²)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Tensão na Força Máx. (MPa)	Deformação na Força Máx. (MPa)
1	7,3	0,2	24,5	44,86	1,46	798,710	31	4,59
2	8,25	0,2	23,7	49,62	1,65	820,120	30	3,18
3	8	0,2	24	49,28	1,6	491,080	31	3,47
4	7,6	0,2	24,4	44,01	1,52	631,900	29	3,07
5	8,1	0,2	23,2	40,27	1,62	684,100	25	3,54
Média	7,85	0,2	23,96	45,608	1,57	685,182	29,20	3,57
Desvio padrão	0,391	0,000	0,532	3,911	0,078	133,803	2,490	0,603
Coef. Variação (%)	4,97%	0,00%	2,22%	8,58%	4,97%	19,53%	8,53%	16,88%

Fonte: Elaborado pelo autor

Quanto a caracterização geométrica, as fibras confeccionadas podem ser classificadas como macrofibras, pois, possuem diâmetros da seção transversal; no caso o diâmetro equivalente, superiores a 0,1 mm (BENTUR; MINDESS, 2007, p.24). Em contrapartida, se utilizado o critério da norma NBR 15530: 2007 para a avaliação geométrica das fibras obtidas, estas seriam consideradas insatisfatórias, isso decorre do fato de que, a norma estabelece que tanto para o diâmetro equivalente, quanto para o comprimento base o coeficiente de variação não deve ser superior a 5%.

Contudo, não existe norma que norteie a utilização de fibras PET no concreto, nesse sentido, a avaliação dessas pela norma de fibras de aço pode não ser aplicável.

No que tange os valores do módulo de Elasticidade e resistência a tração, apresentados na tabela 8 e na tabela 10 constata-se uma variação com o exposto na tabela 1 do referencial teórico, essa desconformidade pode ter decorrido de fatores como: o método de fabricação artesanal das fibras, diferentes composições químicas das garrafas utilizadas ou, ainda, da sensibilidade do operador do paquímetro em realizar as medidas.

Mitt (2016) e Lopes (2017) que estudaram a incorporação de fibras de polipropileno no concreto, encontraram os mesmos empecilhos, o que reforça a influência do caráter artesanal na aferição desses parâmetros. A tabela 9 expõe os valores de módulo de elasticidade e resistência a tração encontrados por Mitt (2016) e Lopez (2017).

Tabela 9 - Valores de Módulo de Elasticidade e Resistência a tração para fibras de Polipropileno produzidas artesanalmente utilizada por Mitt (2016) e Lopez (2017)

Fibras	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência a tração (GPa)
Fibras de Polipropileno utilizadas por Mitt (2016)	0,09	0,08
Fibras de Polipropileno utilizadas por Lopez (2017)	0,25	0,03

Fonte: Mitt (2016) e Lopez (2017) (adaptado)

Contudo, como o resultado do módulo de elasticidade para as fibras se mostra abaixo do módulo de elasticidade da matriz cimentícia de referência as fibras podem ser consideradas como fibras de baixo módulo que desempenham reforço secundário no concreto.

A tabela 10 apresenta o resumo dos parâmetros mecânicos e geométricos da fibra utilizada.

Tabela 10 –Parâmetros mecânicos e geométricos da fibra utilizada

Resistência a tração	29,2 MPa
Módulo de Elasticidade (E)	685,182 MPa
Fator de forma (λ)	20,13
Comprimento médio	25,75 mm
Largura média	0,81 mm
Espessura média	0,20 mm
Diâmetro equivalente	1,28 mm

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2 Abatimento

Da tabela 11, observa-se que para os menores teores de fibra PET quase não se obteve resultados diferentes do apresentado pelo concreto referência, contudo para os maiores teores PET 3 e Aço houve uma redução da consistência. A figura 23 (a) expõe o slump para a dosagem PET 3 e a figura 23 (b) o slump para a dosagem com aço.

Mehta e Monteiro (2005, p.508) afirmam que a adição de quaisquer fibras no concreto implica em uma redução da trabalhabilidade do concreto e que a perda do parâmetro em questão independe do tipo de fibra e é proporcional a concentração volumétrica no compósito. Nesse contexto, o argumento exposto pelos autores pode ser constatado nos resultados da tabela 10, isto é, para os maiores teores de fibras adicionadas PET3 e Aço obteve-se os menores valores de abatimento.

Pelisser (2002, p.48) que também estudou o comportamento do concreto com adição de fibras PET verificou um maior efeito da redução da consistência do concreto a medida em que se aumentava o teor de fibras. Além disso, o autor atribui o comportamento de perda da consistência a um maior número de fibras incorporadas na matriz de concreto, esse comportamento pode ser verificado para as dosagens PET 3 e Aço

Nesse sentido, o comportamento apresentado pelas dosagens PET 1 e 2 pode ter decorrido de o número de fibras incorporadas a matriz do concreto ter sido insuficiente para causar qualquer alteração significativa na trabalhabilidade.

Pode-se argumentar sobre a diferença entre dos valores de abatimento apresentados por PET 3 e Aço, considerando o caráter artesanal da fibra PET3, essa discrepância pode ter decorrido de fatores relacionados ao próprio ensaio, isto é, é bem conhecido que a velocidade

na realização do ensaio de abatimento tem influência nos resultados o que pode ter levado a leituras maiores para o aço e menores para PET3.

Outrossim, Mehta e Monteiro (2005, p. 509) discutem sobre a legitimidade do ensaio de abatimento de tronco de cone (Slump Test) como parâmetro para trabalhabilidade em concreto com fibras, haja vista que, de acordo com os autores, as fibras conferem uma estabilidade considerável a massa fresca, dessa forma, os autores exemplificam que a adição de 1,5 % de fibras de aço ou de vidro para um concreto com 200 mm de abatimento, provavelmente reduzirá o slump da mistura em 25 mm, mas sua capacidade de moldagem e compacidade sob vibração ainda pode ser satisfatória.

Tabela 11- Abatimento do concreto de acordo com as dosagens

Dosagem	REF	PET 1	PET 2	PET 3	AÇO
Slump (cm)	12	11,8	12	8,5	11,0

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 23- Abatimento para a dosagem PET 3 (a) e AÇO (b)



(a)

(b)

Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 Resistência a compressão axial

Analisando o gráfico 1 de resistência à compressão simples em função das dosagens adotadas percebe-se que a incorporação das fibras PET implicou em uma queda de resistência em relação ao traço referência

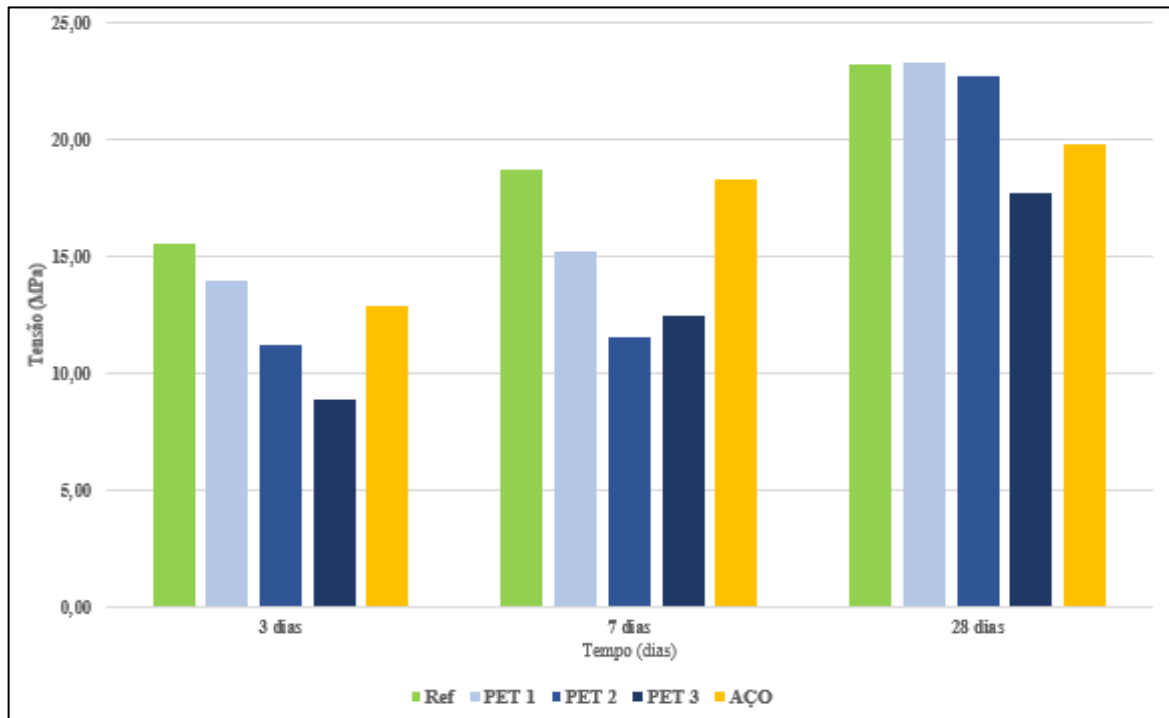
Além disso, examinando os teores de PET 1 (1000g/m³); PET 2 (2000 g/m³) e PET 3 (3000 g/m³), constatou-se que houve queda da resistência conforme o aumento do consumo de fibras. Ainda, aos 28 dias a dosagem de PET 1 apresentou aumento discreto na resistência (0,39%) em relação ao concreto de referência, esse comportamento, de acordo com Li (2011, p.152) era esperado, haja vista que, a adição de fibras com o propósito de melhoria de desempenho quanto a resistência a compressão não traz muitos benefícios.

Ademais, Pelisser (2002, p.55) afirma que: “É um consenso para a maioria dos pesquisadores que estudaram a adição de baixos volumes de fibras sintéticas no concreto, a pouca ou nenhuma influência na sua resistência axial”.

Com relação a dosagem com fibras de aço, para a idade de 3 dias a dosagem PET 1 (1000 g/m³) apresentou melhor desempenho, sendo em seguida superada pela dosagem com fibras de aço aos 7 dias. Contudo, aos 28 dias as dosagens PET 1 e 2, demonstram resistência 17,78% e 14,60%, respectivamente, superiores a dosagem com aço, isso pode ser explicado, de acordo com Bentur e Mindess (2007, p. 254), devido as fibras de aço terem pouco influência na resistência estática do concreto.

Todavia, devido a variabilidade de alguns resultados, tabela 13 (Anexo B), ser classificada, de acordo com a NBR 5739: 2007, como “deficiente” a análise precisa é prejudicada.

No entanto, se consideramos o caráter artesanal da fibra e preterir a variação dos resultados, pode-se constatar da análise do gráfico 2, embora este denote certa descontinuidade, que o melhor desempenho, em relação a resistência a compressão, se deu com o menor consumo de fibras PET. Além disso, verifica-se que para as idades mais avançadas as dosagens com fibras PET puderam superar a dosagem com fibras de aço.

Gráfico 1- Resistência a compressão axial em função das dosagens

Fonte: Elaborado pelo autor

Coró (2002) concluiu que para o concreto com fibras PET, em relação a compressão axial, o melhor desempenho se deu com o maior teor de fibras no compósito. Pelisser (2002), não obteve resultados significativos da influência das fibras, sendo que para a sua análise, somente a idade se mostrou significativa. Contudo, Schettino (2015) expõe em sua pesquisa que: “A adição de materiais poliméricos reduziu a resistência à compressão do concreto. Quanto maior foi o teor utilizado menor foi à resistência à compressão média”. O que condiz com os resultados obtidos.

Ademais, da análise do gráfico percebe-se que o concreto referência não obteve a resistência estipulada, pelo método de dosagem, esse problema pode ter derivado de imperfeições nos corpos de prova.

A NBR 5738:2015 expõe que os corpos de prova para o ensaio a compressão axial devem passar por um tratamento prévio no topo antes do rompimento, com capeamento ou retificação. Contudo, em virtude da ausência de maquinário e material específico, a planicidade dos corpos de prova foi realizada por meio de arrasamento com colher de pedreiro, dessa forma, é possível que o abaulamento da superfície tenha comprometido a distribuição de tensões.

4.4 Resistência a tração

A resistência a tração por compressão diametral pode ser obtida através da equação 6:

$$f_{ct,sp} = \frac{2.F}{\pi.d.l} \quad (6)$$

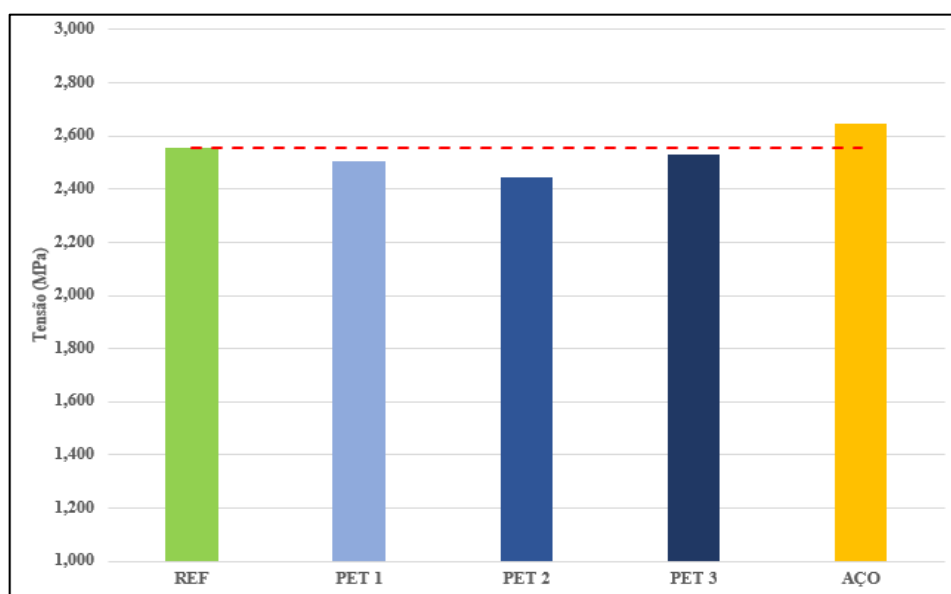
Onde:

- $f_{ct,sp}$ = Resistência à tração por compressão diametral (Mpa);
- F = força máxima obtida no ensaio expressa em Newtons (N);
- d = diâmetro do corpo de prova expresso em milímetros (mm);
- l = comprimento do corpo de prova expresso em milímetros (mm);

Analisando o gráfico 2, resistência a tração por compressão diametral aos 28 dias em função das dosagens, em relação ao concreto de referência, as dosagens com PET apresentaram queda na resistência.

A dosagem PET3 apresentou melhor desempenho em relação a PET1 e PET2. Não obstante, PET 3 demonstrou valor de resistência inferior em relação a dosagem com fibras de aço de 4,45 %.

Gráfico 2 - Resistência a tração por compressão diametral aos 28 dias em função das dosagens



Fonte: Elaborado pelo autor

De forma a obter um parâmetro comparativo para os resultados obtidos no ensaio utilizou-se da relação e entre o ensaio de resistência a compressão axial e a resistência a tração média do concreto que pode ser obtida através da equação 7:

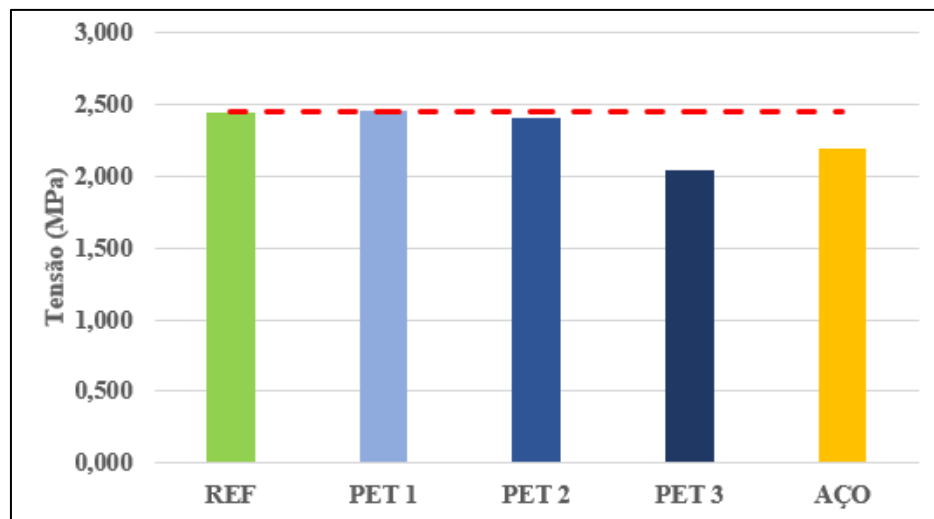
$$f_{ctm} = 0,3. f_{ck}^{2/3} \quad (7)$$

Onde:

- f_{ctm} = Resistência média a tração do concreto;
- f_{ck} = Resistência a compressão axial do concreto;

O gráfico 3 expõe o comportamento de resistência a tração quando utilizada a relação entre o ensaio de compressão axial e o ensaio de tração.

Gráfico 3 - Resistência a tração média de acordo com a resistência a compressão axial aos 28 dias



Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando o gráfico 3, em relação ao concreto referência, verificou-se que com o aumento do teor de PET houve uma queda do parâmetro analisado. Além disso, em relação a dosagem com fibras de aço, PET 1 e PET2 apresentaram melhores desempenhos.

Os comportamentos apresentados pelos gráficos 2 e 3 contrastam entre si, isso, porque, embora para ambos os valores de resistência a tração para as dosagens PET tenham ficado abaixo do concreto referência, no gráfico 2, comparando as dosagens PET entre si constatou-se que para o parâmetro analisado o melhor resultado se deu com o maior consumo

(PET 3). No entanto, no gráfico 3, para as dosagens PET, o melhor resultado para o parâmetro analisado deu-se com o menor teor (PET 1). Não obstante, essa discrepância no comportamento pode ter derivado do método de ensaio da resistência a tração por compressão diametral, haja vista que, de acordo com a NBR 7222: 1994, para o ensaio de compressão diametral deve haver entre o corpo de prova e os “pratos” da máquina de compressão duas tiras de chapa dura de fibra de madeira, contudo em virtude da falta desse equipamento específico o ensaio foi realizado de acordo com a figura 24

Figura 24 - Ensaio de Tração por compressão diametral



Fonte: Elaborado pelo autor

Diante do exposto, é provável que os resultados do ensaio de tração por compressão diametral tenham sido afetados pela distribuição “deficiente” das tensões nos corpos de prova. Nesse sentido, como o ensaio de compressão axial foi realizado conforme o exposto pela norma NBR 5739:2007 o comportamento para o parâmetro analisado pode ser melhor entendido pelo gráfico 3, isso, porque, o comportamento do gráfico 3 condiz com o comportamento do gráfico 5, isto é, conforme o aumento dos teores de PET houve declínio da resistência a tração, no entanto, os valores ainda podem recaírem em discussão devido a sua derivação dos valores do ensaio de compressão axial, que de acordo com o item 4.3, devido ao coeficiente de variação, são considerados deficientes.

Coró (2002) expõe em seu trabalho que a adição das fibras PET não teve efeito significativo no concreto quanto as suas características de resistência a tração por compressão diametral, embora tenha obtido valores de resistência a tração dos 7 aos 28 dias, no intervalo

de 2,5 MPa a 3,5 MPa para teores de 1kg/m³ e 3kg/m³ todos os valores ficaram abaixo do concreto referência, o mesmo comportamento pode ser verificado no Gráfico 3.

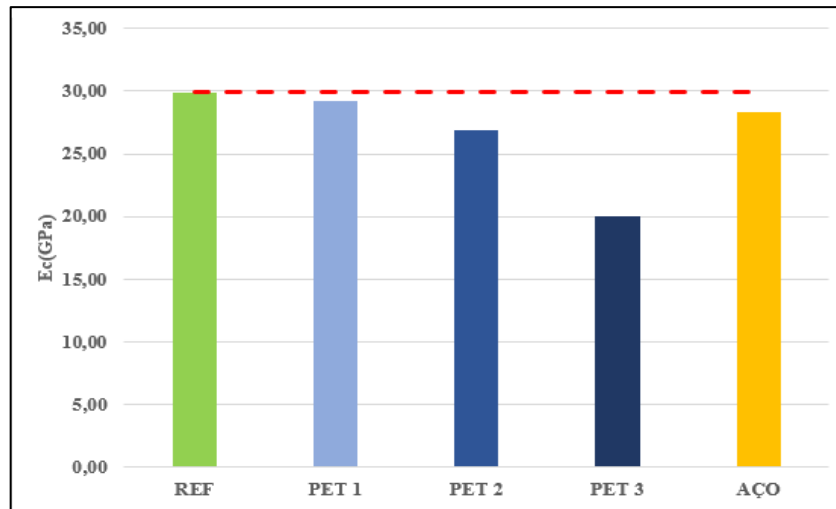
Em pesquisa realizada por Pelisser (2002) para o ensaio de resistência a tração por compressão diametral, para fibras PET, obteve-se valores de resistência no intervalo de 3MPa a 4 MPa, porém, o autor destaca que mesmo obtendo valores de resistência superiores em relação ao concreto referência, devido a uma grande variabilidade dos dados não se pôde concluir a influência das fibras na característica analisada.

Embora a resistência a tração no concreto, de modo geral, seja de difícil avaliação, seja pela quantidade de fibras adicionadas, pelo comprimento, fator de forma ou materiais utilizados, as fibras, de forma geral, inibem a velocidade de propagação de fissuras, ou seja, para que a fissura se propague em relação a fibra é necessário uma energia adicional na deformação, seja pelo arrancamento ou ruptura da fibra (JONH, 1997 apud PELISSER, 2002, p.61).

Todavia, a adição das fibras PET não teve efeito significativo na resistência a tração por compressão diametral, no sentido de melhoria de desempenho, haja vista que, todos os valores de resistência para as dosagens PET ficaram abaixo dos da dosagem referência, uma explicação para esse comportamento seria a incompatibilidade entre o comprimento da fibra e o tamanho do agregado, conforme item 2.3.5, o que teria diminuído a eficiência do reforço.

4.5 Módulo de Elasticidade

O gráfico 4 expõe os valores do módulo de Elasticidade para os Corpos de Prova (Cop) ensaiados aos 28 dias, verifica-se que houve uma redução do valor do módulo de Elasticidade com o aumento do teor de fibras no compósito, dessa forma, tanto as dosagens com PET como a dosagem com fibra de aço apresentaram declínio em relação ao concreto referência. Ainda, destaca-se que, em relação ao parâmetro analisado, a dosagem PET 1 apresentou melhor performance em relação a dosagem com fibras de Aço.

Gráfico 4- Módulo de Elasticidade aos 28 dias em função das dosagens

Fonte: Elaborado pelo autor

Pelisser (2002) explicita que há uma tendência a redução do módulo de elasticidade conforme o aumento do consumo de fibras no compósito. Ademais, Coró (2002) expõe que houve grande variabilidade nos dados dos ensaios realizados, não sendo possível, verificar uma tendência clara de comportamento.

De acordo com Mehta e Monteiro (2005, p.93) em materiais homogêneos existe uma relação direta entre densidade e módulo de elasticidade. No entanto, para materiais multifásicos e heterogêneos, como o concreto, o módulo de elasticidade está diretamente relacionado a porosidade, dessa forma, fatores que tenham impacto na porosidade dos agregados, da matriz cimentícia e da zona de transição desempenham papel importante no módulo de elasticidade.

Dessa forma, o comportamento apresentado no gráfico 4 pode ter derivado do aumento da porosidade no concreto com misturas de fibra PET e de aço, implicando na queda do módulo de elasticidade. Além disso, para o ensaio de índice de vazios verificou-se que para as dosagens PET o aumento do teor de fibras resultou no aumento do índice de vazios, isto é, o concreto apresentou comportamento mais poroso.

4.6 Tração na Flexão

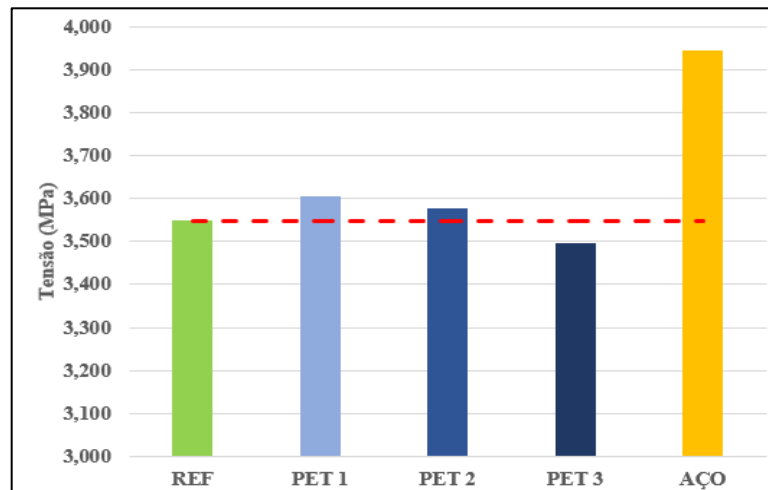
Da análise do gráfico 5 resistência a tração na flexão aos 28 dias de acordo com as dosagens especificadas constatou-se que, em relação ao concreto referência, houve um

aumento de resistência discreto para as dosagens PET1(1,58%) e PET 2 (0,82%), sendo a diferença entre os valores aferidos entre si de 0,75%, e um declínio de resistência para PET 3 (1,55%).

Não obstante, a incorporação de fibras de aço proporcionou um aumento de resistência de 11,16%, de acordo com Bentur e Mindess (2007, p.256) as fibras de aço possuem maior eficácia nas solicitações a flexão, chegando a alcançar aumento de resistência de mais de 100%.

Em relação a dosagem com fibras de aço, todas as dosagens com PET demonstraram valores inferiores sendo a dosagem PET 1 a com melhor desempenho.

Gráfico 5 - Resistência a tração na flexão aos 28 dias em função das dosagens



Fonte: Elaborado pelo autor

Em ensaio realizado por Pelisser (2002) as dosagens com fibras obtiveram resultados de resistência à tração na flexão superiores ao concreto sem fibras, sendo que para um comprimento de 20 mm, a resistência para as dosagens de PET, diminuíram conforme o aumento dos teores.

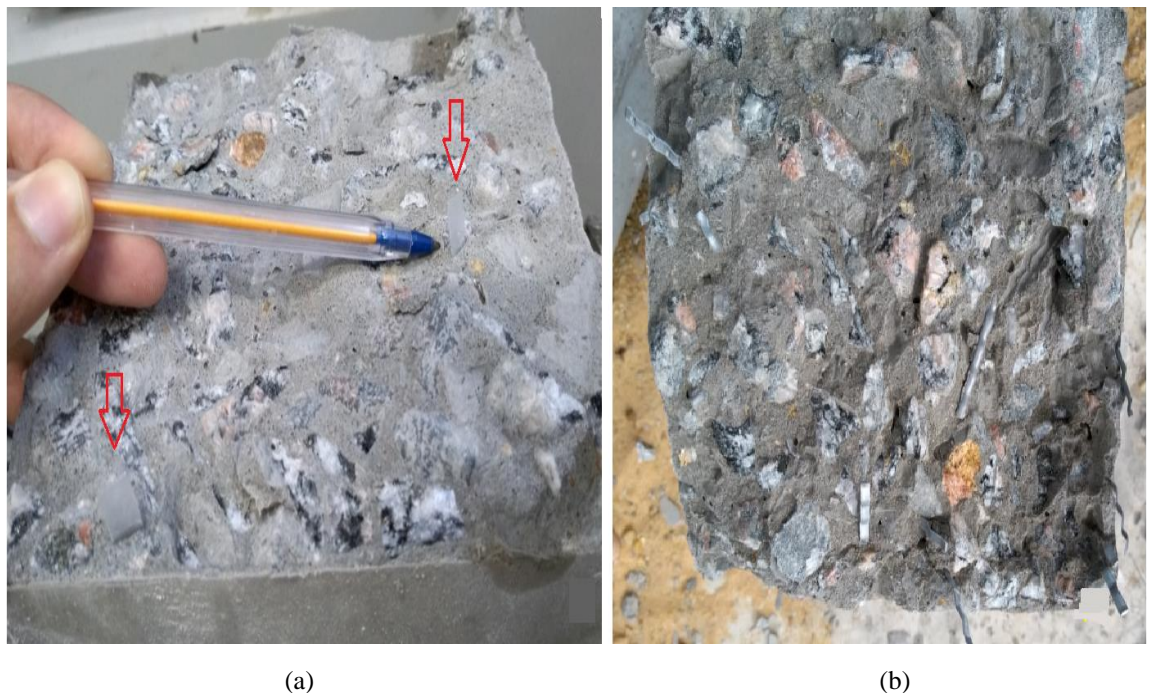
Contudo, o autor, em última análise, constatou que o aumento do volume de fibras não foi significativo para o aumento da resistência a tração, ainda, o autor discute que o comprimento das fibras foi, de fato, relevante para o parâmetro analisado, sendo os melhores resultados obtidos para fibras de maiores comprimentos.

Além disso, nos experimentos por Coró (2002) para a resistência a flexão, as dosagens PET demonstram valores de resistência inferiores ao concreto referência, todavia, as melhores avaliações se deram com fibras com maior comprimento.

Tendo em vista o exposto e os resultados do gráfico 4, para as dosagens PET, uma explicação para o comportamento poderia ser que o comprimento da fibra utilizado foi “muito menor” que o crítico ($L_c \gg L$), dessa forma, de acordo com o exposto no item 2.3.3 a matriz teria se deformado ao redor da fibra proporcionando apenas um pequeno reforço, assim, não havendo uma transferência de tensões de forma efetiva entre as fibras e a matriz.

Contudo, figura 24 (a) mostra a seção de ruptura da viga para a dosagem PET 3, e a figura 24 (b) mostra a seção de ruptura para a dosagem com fibras de aço, percebe-se que não houve ruptura das fibras com a evolução do carregamento e que é possível verificar a presença das fibras na seção de ruptura, o que leva a hipótese que o comprimento da fibra utilizada foi igual ($L_c = L$) ou “menor” que o crítico ($L_c > L$),.

Figura 25- Seção de ruptura para o ensaio de tração na flexão para PET 3 (a) e Aço (b)



Fonte: Elaborado pelo autor

No entanto, o comprimento da fibra pode ter sido, de fato, decisivo, para os resultados obtidos contrastem com as observações de Pelisser (2012), isso pois de acordo com Figueiredo (2011, p.46) deve haver uma compatibilidade dimensional entre a fibra e o agregado graúdo, dessa forma, quanto menor a fibra em relação ao agregado graúdo, maior

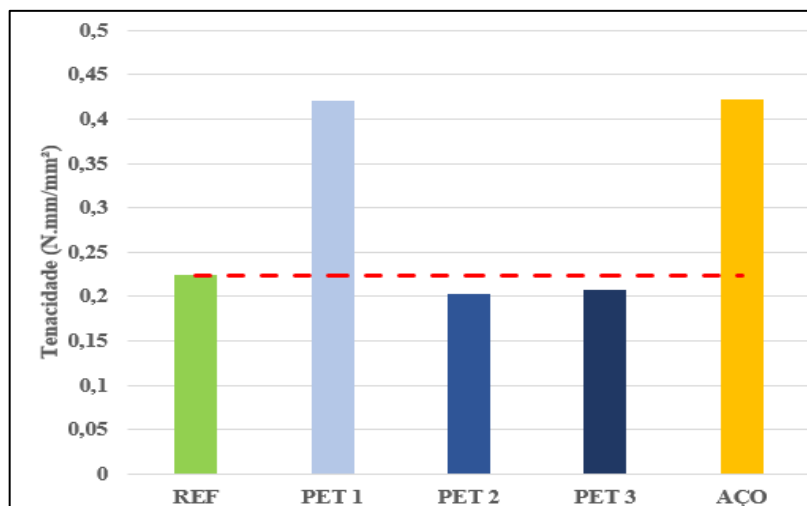
será a inclinação da mesma em relação a superfície de fratura, o que , por sua vez, prejudica a eficácia da fibra como reforço. O agregado graúdo utilizado na presente pesquisa foi maior que nas pesquisas desenvolvidas por Coró (2002); Pelisser (2002) e Schettino (2015).

4.7 Tenacidade

O gráfico 6 mostra a tenacidade dos corpos de prova prismáticos aos 28 dias, da análise do gráfico constatou-se que a incorporação das fibras de aço proporcionou um aumento de tenacidade de 88,39%, o que corrobora em tese com o exposto no item 2.3.2, isso porque, com maiores teores de fibra a carga resistida após a fissuração da matriz aumenta.

Ainda, as dosagens PET 2 e PET 3, apresentaram queda do parâmetro em questão, em relação ao concreto referência, sendo que a dosagem PET 3 apresentou desempenho 2,46% melhor, mas ainda discreto, que a dosagem PET 2. Esse comportamento pode ser explicado pela relação entre o agregado graúdo e a fibra, haja vista que, a fibra tem que ter dimensão igual ou superior a duas vezes a dimensão do agregado graúdo, conforme 2.3.5, devido a essa incompatibilidade, no estudo em questão, a eficiência do reforço devido as fibras pode ter sido influenciada fazendo com que os valores apresentados pela dosagens PET ficassem abaixo da dosagem referência.

Gráfico 6- Tenacidade aos 28 dias em função das dosagens



Fonte: Elaborado pelo autor

Contudo, a dosagem PET 1 apresentou valor de tenacidade 87,5% superior ao concreto referência, o que contradiz em tese o exposto no item 2.3, isso porque, com o aumento do

teor, mais fibras atuariam como “pontes de transferência” de tensões, porém, o que se constatou foi uma diminuição do valor de tenacidade para as dosagens maiores e um aumento singular do valor da tenacidade para a dosagem com menos fibras. Dessa forma, o comportamento apresentado pode ter derivado de variações relacionadas ao método de ensaio.

De acordo com Figueiredo (2011), por falta de normatização brasileira um dos métodos de ensaio adotados para avaliar a tenacidade é baseado na recomendação japonesa JSCE SF-4 (1984). Contudo, nesse método de ensaio pode suceder o problema de aparecimento da instabilidade pós pico, que o autor define como:

“A instabilidade pós-pico consiste numa superestimação da carga suportada pelo corpo-de-prova imediatamente após a ruptura da matriz, ou seja, quando se atinge a carga de pico, uma vez que o teor de fibra deve estar abaixo do crítico. Neste momento ocorre a abrupta transferência de carga da matriz para a fibra com uma consequente elevação do deslocamento” (FIGUEIREDO, 2011, p.69).

Outrossim, analisando o gráfico 6 verifica-se que o valor de tenacidade apresentado por PET 1 é bem próximo do valor de tenacidade apresentado pela dosagem com fibras de aço, de fato a diferença entre estes é de 0,48%. Contudo, a discrepância do valor de tenacidade apresentado por PET 1 pode ser constatada da análise da fissura apresentada pelo corpo para o ensaio em questão, para a dosagem PET 1, figura 25 (a), e a dosagem com fibra de aço, figura 25 (b), o que corrobora com a hipótese do surgimento da instabilidade pós-pico no ensaio.

Figura 26- Rupturas apresentadas pelos corpos de prova para as dosagens PET 1 (a) e AÇO (b), no ensaio de Tenacidade



Fonte: Elaborado pelo autor

4.8 Absorção de água por imersão e Índice de Vazios

Os parâmetros de absorção de água por imersão e Índice de vazios foram obtidos através das equações 8 e 9, por meio dos valores de massa exposto na tabela 18 (Anexo B).

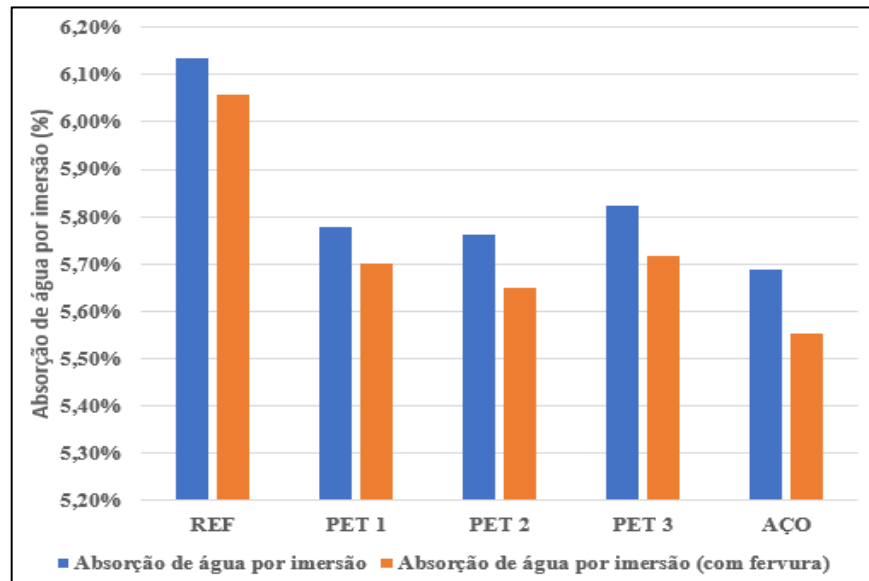
$$A (\%) = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \quad (8)$$

$$I (\%) = \frac{M_{sat} - M_i}{M_{sat} - M_i} \quad (9)$$

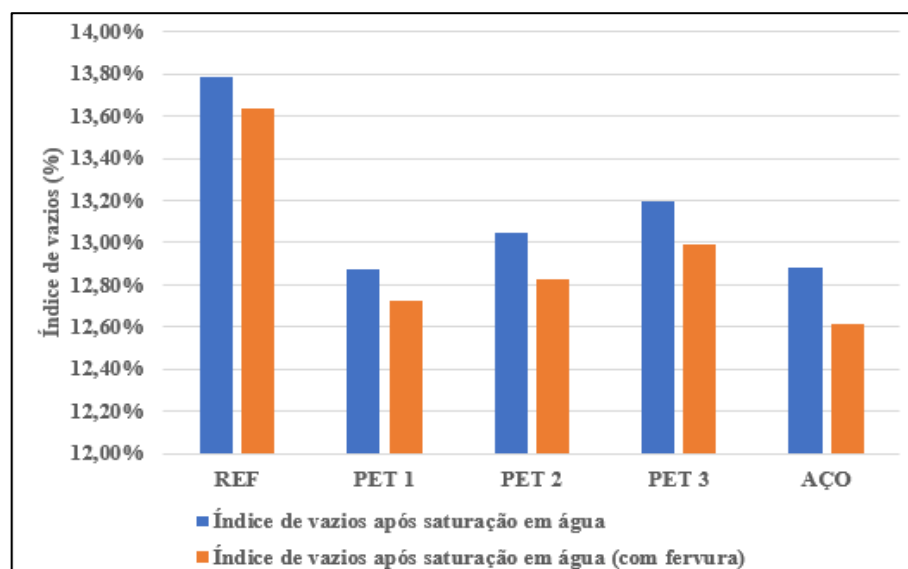
Onde:

- M_{sat} = Massa do corpo de prova saturado (foram consideradas as condições de imersão em água a temperatura de 23 ± 2 °C e a imersão em água a temperatura de 23 ± 2 °C, seguida de permanência em água em ebulição durante 5h;
- M_s = Massa do corpo de prova seco em estufa;
- M_i = Massa do corpo de prova saturado, imerso em água

O gráfico 7 expõe os valores de absorção de água por imersão em função das dosagens considerando os valores obtidos com o processo de fervura ou não dos corpos de prova. Além disso, o gráfico 8 expõe os valores de Índice de vazios em função das dosagens considerando os valores obtidos com o processo de fervura ou não dos corpos de prova.

Gráfico 7- Absorção de água por imersão

Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 8- Índice de vazios

Fonte: Elaborado pelo autor

Do exame dos gráficos 7 e 8 foi possível verificar uma diminuição da absorção de água por imersão e do índice de vazios para as dosagens com fibras PET, em relação ao concreto referência, e um acréscimo nos mesmos parâmetros em relação a dosagem com fibras de aço.

Esse comportamento, em relação ao concreto referência contrasta parcialmente com os resultados obtidos por Pelisser (2002), isso porque, o autor verificou que para fibras de 20 mm houve um aumento da absorção de água por imersão conforme o aumento do volume de fibras, o que é possível constatar no gráfico 6, em relação as fibras PET, mas dos valores apresentados por Pelisser (2002) apenas o menor teor (0,5% do volume) apresentou absorção menor que a dosagem referência, o autor atribui esse efeito a um aumento de incorporação de ar maior para as fibras mais compridas.

Não obstante, Toutanji, Mcneil e Bayasi (1998) avaliaram a adição de fibras de polipropileno com comprimentos de 12,7 mm; 19 mm no concreto, para diferentes teores e expõem que houve aumento da permeabilidade com o aumento do teor de fibras e esse comportamento se deu de forma mais expressiva para as fibras com maior comprimento.

Diante do exposto, pode-se explicar o comportamento dos gráficos 7 e 8, em relação as fibras PET, pelo aumento da incorporação de ar proporcionado pelas fibras, haja vista que a fibra do estudo em questão possui um comprimento médio por amostragem de 25,75 mm conforme a tabela 12 (Anexo A). Não obstante, o comportamento apresentado pela dosagem referência pode ter derivado de imperfeições nos corpos de prova, implicando em uma maior absorção e índice de vazios.

4.9 Massa específica

Os valores de massa específica seca e saturada foram obtidos de acordo com as equações 10 e 11, de acordo com os valores da tabela 18 (Anexo B):

$$\text{Massa específica da amostra seca} = \frac{M_s}{M_{sat} - M_i} \quad (10)$$

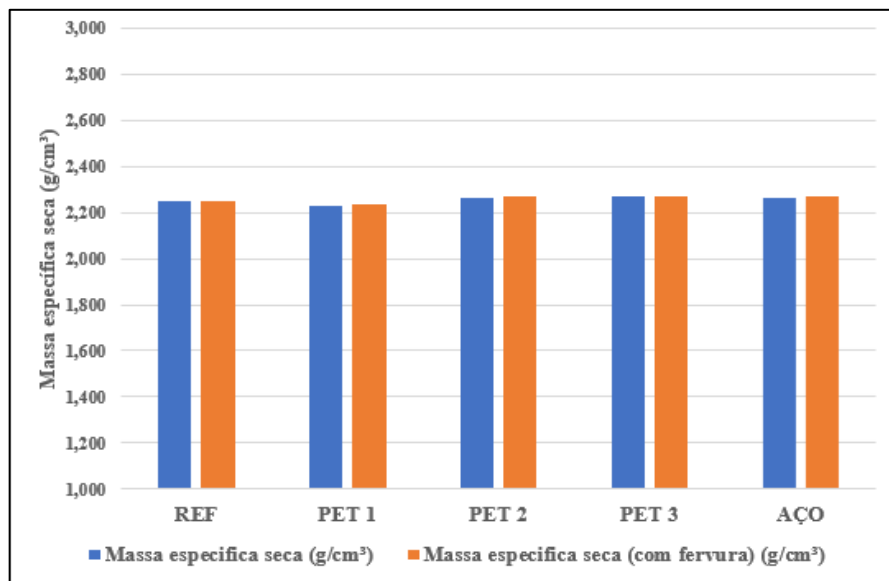
$$\text{Massa específica da amostra saturada} = \frac{M_{sst}}{M_{sat} - M_i} \quad (11)$$

Onde:

- M_{sat} = Massa do corpo de prova saturado (foram consideradas as condições de imersão em água a temperatura de 23 ± 2 °C e a imersão em água a temperatura de 23 ± 2 °C, seguida de permanência em água em ebulição durante 5h;
- M_s = Massa do corpo de prova seco em estufa;
- M_i = Massa do corpo de prova saturado, imerso em água

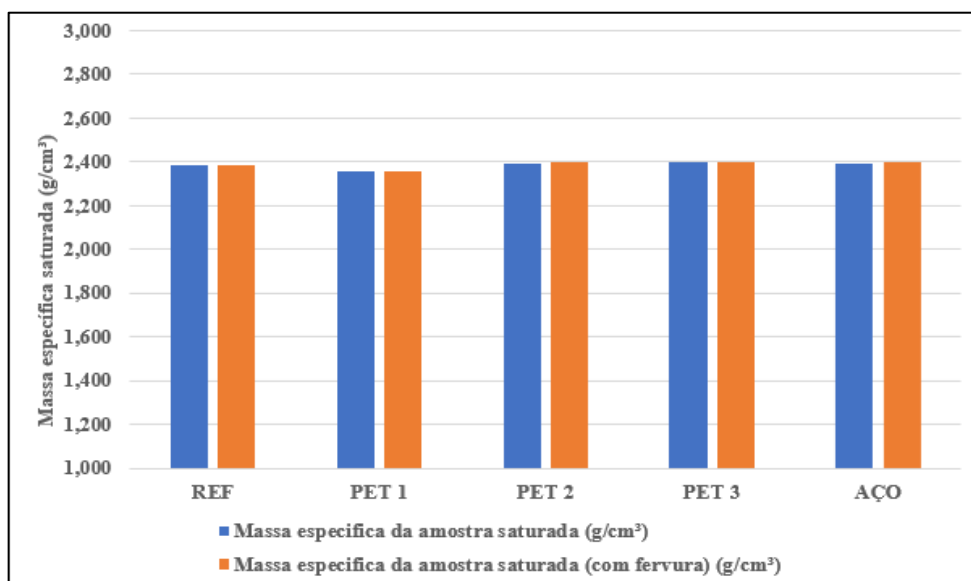
O gráfico 9 expõe os valores de massa específica seca em função das dosagens considerando os valores obtidos com o processo de fervura ou não dos corpos de prova. Além disso, o gráfico 10 expõe os valores de massa específica saturada em função das dosagens considerando os valores obtidos com o processo de fervura ou não dos corpos de prova.

Gráfico 9- Massa específica seca



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 10- Massa específica saturada



Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando os gráficos 8 e 9 constata-se que a adição das fibras teve pouco efeito na massa específica tanto seca como saturada, sendo que dentre as dosagens a PET analisadas, a dosagem PET 3 teve melhor desempenho em relação ao concreto referência e comportamento próximo a dosagem com fibras de aço. Não obstante, esse efeito também foi verificado por Pelisser (2002) que devido a proximidade dos valores apresentados na sua pesquisa não conseguiu, de fato, analisar a influência das fibras no compósito.

5. CONCLUSÃO

O intento principal do presente trabalho foi analisar o comportamento do concreto com inclusão das fibras PET, assim, os ensaios nos mostraram que, de fato, a adição do PET implicou em modificações nas propriedades do compósito.

Constatou-se diminuição do abatimento do concreto para um maior consumo de fibras PET em comparação com o concreto referência, ainda, as fibras artesanais chegaram a demonstrar melhor performance para esse parâmetro que as fibras de aço.

Para o ensaio de resistência a compressão axial, foi possível observar queda da resistência tanto para a dosagem com fibras PET, quanto para a dosagem com fibras de aço, sendo mais expressiva para a primeira que para a segunda. Além disso, o declínio do parâmetro analisado para as fibras PET se deu conforme o aumento do consumo de fibras. Contudo para aos 28 dias as fibras PET demonstraram melhor desempenho que as fibras de aço.

Da análise dos dados do ensaio de resistência a tração verificou-se que, em relação ao concreto referência, o melhor resultado para a dosagem com fibras PET foi obtido com o menor consumo de fibras. Não obstante, todos os valores para o parâmetro em questão, para a dosagem com PET ficaram abaixo dos da dosagem com fibras aço.

Em relação ao módulo de elasticidade, a adição de fibras PET implicou em queda do parâmetro analisado, quando comparado ao concreto referência, sendo mais expressiva conforme o aumento do consumo de fibras. Não obstante, a dosagem com o menor teor de fibras PET demonstrou melhor resultado que a dosagem com as fibras de aço.

Para o ensaio de tração na flexão constatou-se aumento de resistência discreto para as dosagens com menores teores de PET e declínio para o maior consumo. Ademais, todos os valores apresentados para a dosagem com fibras PET ficaram abaixo da dosagem com a fibras de aço. Além disso, nos resultados apresentados foi possível observar o efeito da compatibilidade dimensional entre a fibra e o agregado.

No ensaio de tenacidade verificou-se uma redução da característica examinada conforme o aumento de fibras PET, em relação ao concreto referência. Contudo, a análise precisa foi afetada pelo comportamento da “instabilidade pós-pico”. Além disso, em todos os valores apresentados pelas dosagens PET ficaram abaixo da dosagem com fibras de aço.

Para o ensaio de absorção de água por imersão e índice de vazios foi possível verificar que o aumento do teor de fibras PET no compósito implicou em um aumento da absorção de água e um acréscimo no índice de vazios, dessa forma, para os parâmetros analisados o melhor desempenho foi obtido com o menor teor de fibras.

No ensaio de massa específica o maior teor de fibra PET resultou em uma massa específica maior, contudo, a diferença entre os valores encontrados para o maior teor de fibras PET quanto para o menor teor de fibras PET, foi irrisória para analisar a influência, de fato, das fibras PET para o parâmetro em questão.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 2111-91**: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. [S. l.], 1991.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 544.1R-96**: Report on Fiber Reinforced Concrete. Detroit, 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **ASTM D3379 (1989) e1**: Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus for High-Modulus Single-Filament Materials. West Conshohocken, 1975.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Qual é a influência dos tipos de cimento em argamassas e concretos?** Disponível em: <<https://www.abcp.org.br/cms/perguntas-frequentes/qual-e-a-influencia-dos-tipos-de-cimento-em-argamassa-e-concretos/>>. Acesso em: 2 nov. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Quais são os tipos básicos de Cimento Portland?** 2018. Disponível em: <<https://www.abcp.org.br/cms/perguntas-frequentes/quais-sao-os-tipos-de-cimento-portland/>>. Acesso em: 24 set. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR5738**: Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: Abnt, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto- ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: Abnt, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro: Abnt, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para Concreto - Especificação. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2005.

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: Abnt, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto- determinação do módulo estático de elasticidade á compressão. Rio de Janeiro: Abnt, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: Abnt, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: Determinação da tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro: Abnt, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15530:07**: Fibras de aço para concreto. Rio de Janeiro, 2007.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46**: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm , por lavagem. Rio de Janeiro: Abnt, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo- Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: Abnt, 2003

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: Abnt, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: Abnt, 2003.

BAUER, Luís Alfredo Falcão. **Materiais de Construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: . Ltc Editora, 2000. 5 v.

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **FUNDAMENTOS DO CONCRETO ARMADO**. 2006. Disponível em: <<http://coral.ufsm.br/decc/ECC1006/Downloads/FUNDAMENTOS.pdf>>. Acesso em: 28 ago. 2018.

BELLINI, Jomar. **Chuva arrasta sujeira e garrafas PET acumulam nas margens do rio Tietê**. 2015. Disponível em: <<http://g1.globo.com/sao-paulo/sorocaba-jundiai/noticia/2015/12/chuva-arrasta-sujeira-e-garrafas-pet-acumulam-nas-margens-do-rio-tiete.html>>. Acesso em: 7 maio 2019.

BENTUR, Arnon; MINDESS, Sidney. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. 2. ed. Londres: Taylor & Francis, 2007.

BORUNDA, Alejandra. **This young whale died with 88 pounds of plastic in its stomach**:The animal in the Philippines likely starved because its stomach was full of plastic, not food.. 2019. Disponível em: <<https://www.nationalgeographic.com/environment/2019/03/whale-dies-88-pounds-plastic-philippines/>>. Acesso em: 06 maio 2019.

BUILDING TRUST INTERNATIONAL. **Building with bottles - the basics**. Disponível em: <<https://buildingtrustinternational.org/BTIBottleToolkit.pdf>>. Acesso em: 17 abr. 2019.

CALLISTER JUNIOR, William D.G.;RETHWISCH, David. **Ciência e engenharia de materiais uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc Editora, 2012.

CARMONA FILHO, Antônio; CARMONA, Thomas. **Grietas en estructuras de hormigón**. México: Alconpat, 2013.

CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**: Segundo a NBR 6118:2003. 3. ed. São Carlos: Edufscar, 2007.

CORÓ, Angela Ghisleni. **Investigação das propriedades mecânicas de concretos reforçados com fibras PET**. 2002. 63 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2002.

FIGUEIREDO, Antônio Domingues. **Concreto reforçado com fibras**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.

FIGUEIREDO, Antônio Domingues de; CHAMA NETO, Pedro Jorge; FARIA, Hernando Macedo. A nova normalização brasileira sobre fibras de aço. **Concreto & Construções**, São Paulo, n. 50, p.67-75, jun. 2008. Trimestral.

FRATERNALI, Fernando et al. Experimental study of the thermo-mechanical properties of recycled PET fiber-reinforced concrete. **Composite Structures**, [s.l.], v. 93, n. 9, p.2368-2374, 01 abr. 2011.

FRATERNALI, Fernando; SPADEA, Saverio; BERARDI, Valentino P.. Effects of recycled PET fibres on the mechanical properties and seawater curing of Portland cement-based concretes. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 61, p.293-302, 30 jun. 2014.

GÓIS, Fernanda Alves Pinto. **Avaliação Experimental do Comportamento de Concreto Fluido Reforçado com Fibras de Aço**: Influência do Fator de forma e da fração volumétrica das fibras nas propriedades mecânicas do concreto. 2010. 156 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2010.

INOVAÇÃO e sustentabilidade: como as garrafas PET estão servindo de insumo para a construção civil. 2017. Disponível em: <<https://engenharia360.com/inovacao-e-sustentabilidade-como-as-garrafas-pet-estao-servindo-de-insumo-para-a-construcao-civil/>>. Acesso em: 18 abr. 2019.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete**. JSCE-SF4. Concrete Library of JSCE. Part III-2 Method of tests for steel fiber reinforced concrete. N° 3 June 1984. p. 58-61.

KATAYAMA, Daniela. **Estudo da influência da granulometria do agregado graúdo nas propriedades do concreto de alto desempenho**. 2016. 69 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2016.

LAVILLE, Sandra; TAYLOR, Matthew. **A million bottles a minute: world's plastic binge 'as dangerous as climate change'**. 2017. Disponível em: <<https://www.theguardian.com/environment/2017/jun/28/a-million-a-minute-worlds-plastic-bottle-binge-as-dangerous-as-climate-change>>. Acesso em: 29 ago. 2018.

LI, Zongjin. **Advanced concrete technology**. Canadá: Jonh Wiley & Sons, Inc., 2011.

LOPES, Taynara Ester. **Avaliação das propriedades físico-mecânicas para fins estruturais do concreto celular espumoso com adição de fibras artesanais de polipropileno**. 2017. 87 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2017.

LUCENA, Júlio César Tavares de. **Concreto reforçado com fibra de polipropileno: Estudo de caso para aplicação em painel alveolar de parede fina.** 2017. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

MARTINS, Paulo Benjamim Morais. **Influência da granulometria do agregado miúdo na trabalhabilidade do concreto.** 2008. 92 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2008.

MEHTA, Paulo Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. **Concrete: Microstructure, Properties and Materials.** 3. ed. [s.l.]: Mcgraw-hill, 2005.

MEHTA, Paulo Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2008.

MISHRA, Gopal. **Fiber Reinforced Concrete – Types, Properties and Advantages of Fiber Reinforced Concrete.** Disponível em: <<https://theconstructor.org/concrete/fiber-reinforced-concrete/150/>>. Acesso em: 30 jun. 2019.

MITT, Augusto Chagas. **Avaliação do desempenho do concreto reforçado com fibras de polipropileno produzidas artesanalmente oriundas de copos descartáveis.** 2016. 85 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Fundação Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2016.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J.J. **Tecnologia do concreto.** 2. ed. São Paulo: Bookman Editora Ltda, 2010a.

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J.J.. **Concrete Technology.** 2. ed. Londres: Pearson Prentice Hall, 2010b.

NUNES, L. N. **Contribuição para a aplicação do concreto reforçado com fibras de aço em elementos de superfície restringidos.** 2006. 276 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

OLIVEIRA, Sergio Luís de. **Taxa de armadura longitudinal mínima em vigas de concreto de alta resistência com fibras de aço.** 2005. 134 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

PEDROSO, Fábio Luís. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Concreto & Construções**, São Paulo, n. 53, p.14-19, mar. 2009. Trimestral.

PELISSER, Fernando. **Avaliação do Desempenho de Concreto Reforçado com Fibras de Polietileno Tereftalato (PET).** 2002. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

RAHMANI, E. et al. On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. **Composite Structures**, [s.l.], v. 47, p.1302-1308, 3 mar. 2013.

SCHETTINO, Rômulo Marczuk. **Concreto com adição de Fibras de Politereftalato de Etileno.** 2015. 65 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Fundação Oswaldo Aranha, Volta Redonda, 2015.

SHEIKAN ANCOR-JET. **Fibras de aço Steel Jet**. Disponível em: <<http://www.sheikan.com.br/fibras-de-aco-steel-jet>>. Acesso em: 13 jun. 2019.

TOUTANJI, H; MCNEIL, S; BAYASI, Z. Chloride permeability and impact resistance of polypropylene-fiber-reinforced silica fume concrete. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 28, n. 7, p.961-968, jul. 1998. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(98\)00073-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(98)00073-8).

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **THE KYOTO PROTOCOL, THE CLEAN DEVELOPMENT MECHANISM, AND THE BUILDING AND CONSTRUCTION SECTOR**. 2008. Disponível em: <<https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7828/-The%20Kyoto%20protocol%2C%20the%20clean%20development%20mechanism%20and%20the%20building%20and%20construction%20sector-2008922.pdf?sequence=3&isAllowed=y>>. Acesso em: 18 abr. 2019.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **THE STATE OF PLASTICS: World Environment Day Outlook**. 2018. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/25513/state_plastics_WED.pdf?isAllowed=y&sequence=1>. Acesso em: 01 abr. 2019.

VOTORAMTIM CIMENTOS. **Cimentos**. Disponível em: <<https://www.votorantimcimentos.com.br/produtos/cimentos-tocantins/todas-as-obras-2/>>. Acesso em: 13 jun. 2019.

ANEXOS

ANEXO A.- Ensaio de caracterização das fibras artesanais

Tabela 12- Caracterização geométrica das fibras PET artesanais

Fibra	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)	Largura 3 (mm)	Largura Média(mm)	Comprimento (mm)	Espessura (mm)	Diâmetro equivalente(mm)	Fator de forma
1	6,6	6,1	5,4	6,0	25,0	0,20	1,24	20,17
2	7,1	7,0	6,8	7,0	24,8	0,20	1,33	18,62
3	7,4	7,1	6,2	6,9	25,0	0,20	1,33	18,86
4	6,8	6,0	5,1	6,0	24,8	0,20	1,23	20,12
5	6,5	5,9	5,3	5,9	29,2	0,20	1,23	23,82
6	7,0	6,4	6,1	6,5	25,5	0,20	1,29	19,82
7	6,8	5,8	6,6	6,4	24,0	0,20	1,28	18,80
8	6,0	6,0	5,8	5,9	26,3	0,20	1,23	21,40
9	5,9	5,8	5,8	5,8	22,7	0,20	1,22	18,63
10	9,0	8,5	8,0	8,5	28,0	0,20	1,47	19,03
11	8,0	7,7	7,7	7,8	27,0	0,20	1,41	19,16
12	6,0	6,0	5,8	5,9	26,1	0,20	1,23	21,23
13	6,3	6,5	6,5	6,4	27,0	0,20	1,28	21,09
14	5,6	5,4	5,3	5,4	27,0	0,20	1,18	22,95
15	6,2	6,2	7,5	6,6	23,8	0,20	1,30	18,31
Média	6,75	6,43	6,26	6,48	25,75	0,20	1,28	20,13
Desvio Padrão	0,89	0,83	0,91	0,81	1,72	2,87E-17	0,08	1,67
Coef. Variação (%)	13,14%	12,84%	14,60%	12,50%	6,67%	0,00%	6,08%	8,27%

Fonte: Elaborado pelo auto

ANEXO B- Resultados dos ensaios para o concreto endurecido

Tabela 13- Resultados do ensaio de compressão axial em MPa

Referência			
Tempo	3 dias	7 dias	28 dias
Cop 1	14,67	18,29	24,06
Cop2	16,45	19,18	22,4
Média	15,56	18,74	23,23
Desvio padrão	1,259	0,629	1,174
Coef. Variação	8,09%	3,36%	5,05%
Pet 1000g/m3			
Tempo	3 dias	7 dias	28 dias
Cop 1	14,27	13,73	21,28
Cop2	13,72	16,67	25,36
Média	14,00	15,20	23,32
Desvio padrão	0,389	2,079	2,885
Coef. Variação	2,78%	13,68%	12,37%
Pet 2000g/m3			
Tempo	3 dias	7 dias	28 dias
Cop 1	10,75	11,23	21,22
Cop2	11,19	11,48	24,16
Cop3	11,76	11,98	-
Média	11,23	11,56	22,69
Desvio padrão	0,506	0,382	2,079
Coef. Variação	4,51%	3,30%	9,16%
Pet 3000g/m3			
Tempo	3 dias	7 dias	28 dias
Cop 1	9,53	11,95	15,92
Cop2	8,29	13,03	19,57
Média	8,91	12,49	17,75
Desvio padrão	0,876812	0,764	2,581
Coef. Variação	9,84%	6,11%	14,54%
Aço			
Tempo	3 dias	7 dias	28 dias
Cop 1	13,8	16,47	20,3
Cop2	12,58	20,16	19,3
Cop3	12,21	-	-
Média	12,86	18,32	19,80
Desvio padrão	0,832006	2,609224	0,707107
Coef. Variação	6,47%	14,25%	3,57%

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 14- Resultados do ensaio de tração por compressão diametral

Parâmetros	REF	PET 1	PET 2	PET 3	AÇO
Força (KN)-Cop1	81,10	77,80	74,80	80,2	77,80
Força (KN)- Cop2	79,50	79,50	78,80	78,8	88,6
Tensão (MPa)- Cop1	2,581	2,476	2,381	2,553	2,476
Tensão (MPa)- Cop2	2,531	2,531	2,508	2,508	2,820
Média (MPa)	2,556	2,504	2,445	2,531	2,648
Desvio padrão	0,036	0,038	0,090	0,032	0,243
Coef. Variação (%)	1,41%	1,53%	3,68%	1,25%	9,18%

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 15 - Resistência a tração através da relação com o ensaio de compressão axial

Parâmetros	REF	PET 1	PET 2	PET 3	AÇO
Resistência a compressão (MPa) (28 dias)	23,23	23,32	22,69	17,75	19,80
Resistência a tração média (MPa) (28 dias)	2,442	2,449	2,404	2,041	2,196

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 16- Resultados do ensaio de Módulo de Elasticidade

Parâmetros	REF	PET 1	PET 2	PET 3	AÇO
Cop1 - E (GPa)	30,8	30,00	25,90	17,1	26,70
Cop2 - E (GPa)	29,0	29,90	27,20	22,9	29,9
Cop3 - E(GPa)	-	27,80	27,7	-	-
Média (GPa)	29,90	29,2	26,9	20,0	28,30
Desvio padrão	1,273	1,242	0,929	4,101	2,263
Coef. Variação	4,26%	4,25%	3,45%	20,51%	8,00%

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 17- Resultados do ensaio de Tração na flexão e Tenacidade

Parâmetros	REF	PET 1	PET 2	PET 3	AÇO
Tração na flexão (MPa)	3,549	3,605	3,578	3,495	3,945
Tenacidade (N.mm/mm²)	0,224	0,420	0,203	0,208	0,422

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 18- Absorção de água, Índice de vazios, Massa específica (continuação)

Dosagem	Parâmetros	Cop1 (g)	Cop2 (g)	Cop3 (g)	Média	Desvio padrão	Coef Variação %	Absorção de água por imersão	Absorção de água por imersão (ferv.)	índice de vazios	índice de vazios (fervura)	Massa específica seca (g/cm ³)	Massa específica seca (ferv.) (g/cm ³)	Massa específica da amostra saturada (g/cm ³)	Massa específica da amostra saturada (ferv.) (g/cm ³)
PET 2	Temperatura ambiente	3604,7	3577,4	3536,7	3572,9	34,2	0,96%								
	Estufa (72h)	3590,8	3563,7	3525,8	3560,1	32,6	0,92%								
	Saturados (72h)	3785,3	3776,2	3734,2	3765,2	27,3	0,72%	5,76%	5,65%	13,05%	12,82%	2,264	2,270	2,395	2,398
	Saturados com fervura	3781,7	3773,3	3728,7	3761,2	28,5	0,76%								
	Submerso	2214,1	2175,8	2188,9	2192,9	19,5	0,89%								
PET 3	Temperatura ambiente	3542,5	3590,9	3562,0	3565,1	24,4	0,68%								
	Estufa (72h)	3526,5	3574,9	3546,3	3549,2	24,3	0,69%								
	Saturados (72h)	3731	3783,2	3753,5	3755,9	26,2	0,70%	5,82%	5,72%	13,20%	12,99%	2,266	2,272	2,398	2,402
	Saturados com fervura	3727,5	3779,4	3749,5	3752,1	26,1	0,69%								
	Submerso	2162,6	2210,2	2196,8	2189,9	24,5	1,12%								
AÇO	Temperatura ambiente	3525,9	3519,2	3585,1	3543,4	36,3	1,02%								
	Estufa (72h)	3510,4	3503,5	3569,7	3527,9	36,4	1,03%								
	Saturados (72h)	3703,2	3711,6	3770,8	3728,5	36,8	0,99%	5,69%	5,55%	12,88%	12,62%	2,265	2,272	2,393	2,398
	Saturados com fervura	3699,5	3706,2	3765,7	3723,8	36,4	0,98%								
	submerso	2153,6	2152,8	2205,8	2170,733	30,4	1,40%								

Fonte: Elaborado pelo autor