



Dissertação de Mestrado

**“Avaliação da influência da adição de fibras
poliméricas nas propriedades térmicas e mecânicas
do concreto”**

**Autor: Josué Coelho do Amaral Júnior
Orientador: Weber Guadagnin Moravia**

Maio de 2016



Josué Coelho do Amaral Júnior

“Avaliação da influência da adição de fibras poliméricas nas propriedades térmicas e mecânicas do concreto”

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET MG, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Ciência e Desenvolvimento de Materiais

Linha de Pesquisa: Seleção, Processamento e Caracterização

Orientador: Prof. Weber Guadagnin Moravia

Belo Horizonte, maio de 2016.

A485a Amaral Júnior, Josué Coelho do.
Avaliação da influência da adição de fibras poliméricas nas propriedades térmicas e mecânicas do concreto / Josué Coelho do Amaral Júnior. - 2016.
101 f. : il.; tabs. ; grafs ; fotos. –
Orientador: Weber Guadagnin Moravia.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2016.

Bibliografia.

1. Concreto. 2. Materiais de construção - propriedades térmicas. 3. Concreto reforçado com fibras. 4. Polímero. I. Moravia, Weber Guadagnin. II. Título.

CDD: 620.136

Agradecimentos

Agradeço ao professor Weber Guadagnin Moravia pela orientação, paciência e atenção, nestes dois anos de trabalho e nos anos anteriores em outros trabalhos.

Agradeço ao professor Augusto Cesar da Silva Bezerra pela atenção e suporte em diversas etapas da execução deste trabalho e por ter concedido o material utilizado em análises realizadas deste trabalho.

Agradeço ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais pela oportunidade de executar este trabalho

Agradeço à minha família, meu pai Josué Coelho do Amaral, minha mãe Roseli Nogueira do Amaral e minha irmã Daniela Nogueira do Amaral por tudo que fizeram por mim.

Agradeço à todos os meus amigos, novos e antigos, pelo suporte e momentos de descontração.

Agradeço à minha colega de laboratório, Luiza Caroline Ferreira Silva, pela ajuda, fundamental na execução deste trabalho.

Sumário

Resumo	16
Abstract	17
1. Introdução.....	18
2. Objetivos	21
2.1. Objetivo geral.....	21
2.2. Objetivos específicos	21
3. Revisão bibliográfica.....	22
3.1. Polímeros	22
3.1.1. Monômeros.....	24
3.1.2. Estrutura molecular	26
3.1.3. Temperatura de transição vítrea e fusão.....	29
3.1.4. Propriedades mecânicas	30
3.1.5. Polipropileno	32
3.1.6. Polietileno de alto módulo.....	32
3.2. Concreto	33
3.2.1. Propriedades mecânicas	35
3.2.2. Propriedades térmicas	36

3.2.3.	Concreto reforçado com fibras	37
3.2.4.	Teor de fibras e volume crítico	39
4.	Procedimentos e materiais	41
4.1.	Materiais utilizados	42
4.1.1.	Cimento Portland de alta resistência inicial	44
4.1.2.	Agregado miúdo	45
4.1.3.	Agregado Graúdo	46
4.1.4.	Fibra de polipropileno	46
4.1.5.	Fibra de polietileno de alto módulo.....	47
4.2.	Procedimento de mistura	48
4.3.	Análise termogravimétrica	50
4.4.	Microscopia eletrônica de varredura	50
4.5.	Inspeção visual	52
4.6.	Módulo de elasticidade e resistência à compressão	53
4.7.	Resistência à tração na flexão e tenacidade.....	56
4.8.	Dilatação Térmica	58
4.9.	Condutividade térmica.....	60
4.10.	Resistência à compressão do concreto pós exposição a temperatura de 200° C.	64
4.11.	Análise estatística.....	65
5.	Resultados e discussão	67

5.1.	Análise termogravimétrica	67
5.2.	Microscopia eletrônica de varredura	68
5.3.	Inspeção visual	71
5.4.	Resistência à compressão	72
5.5.	Módulo de elasticidade	75
5.6.	Resistência à tração na flexão e tenacidade	78
5.7.	Dilatação Térmica	86
5.8.	Condutividade Térmica	87
5.9.	Resistência à compressão do concreto pós exposição a temperatura de 200° C.	89
6.	Conclusões	91
7.	Relevância dos resultados	94
8.	Sugestões para trabalhos futuros	95
9.	Referências Bibliográficas	96

Lista de Figuras

Figura 3.1 – Exemplo de estrutura molecular linear.	26
Figura 3.2 – Exemplo de estrutura ramificada.	27
Figura 3.3 – Exemplo de estrutura com ligações cruzadas.	28
Figura 3.4 – Exemplo de estrutura em rede.	28
Figura 3.5 – Ruptura do concreto com reforço de fibras e do concreto sem reforço de fibras.	38
Figura 4.1 – Fluxograma dos trabalhos experimentais e analíticos realizados.	42
Figura 4.2 – (a) Fibra de polipropileno na embalagem em que foi comprada; (b) fibra de polipropileno em detalhe.	47
Figura 4.3 – (a) Fibra de HMPE no rolo; (b) fibra de HMPE cortada.	48
Figura 4.4 – Betoneira usada para mistura do concreto das amostras ensaiadas nesse trabalho.	49
Figura 4.5 – Equipamento TM3000 utilizado nos ensaios de microscopia eletrônica de varredura.	51
Figura 4.6 – Detalhe do corpo de prova utilizado no ensaio de MEV.	52

Figura 4.7 – Forma metálica cilíndrica usada para confeccionar as amostras dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade.....	53
Figura 4.8 – Prensa utilizada no ensaio de módulo de elasticidade de resistência à compressão.	54
Figura 4.9 – Prensa utilizada nos ensaios para determinar a resistência à tração.	56
Figura 4.10 – Forma de madeira utilizada na confecção dos corpos de prova prismáticos para o ensaio de resistência à tração na flexão.	57
Figura 4.11 – Equipamento DIL 402 PC.....	59
Figura 4.12 – Corpo de prova utilizado no ensaio de dilatação térmica.	60
Figura 4.13 – HFM 436/3/1 Lambda.	61
Figura 4.14 – Programa de temperatura para o equipamento HFM 436/3/1 Lambda.....	62
Figura 4.15 – Corpo de prova utilizado no ensaio de condutividade térmica.	63
Figura 5.1 – Análise termogravimétrica da fibra de PP e da fibra de HMPE.	67
Figura 5.2 – Fibra de PP vista no MEV.	68

Figura 5.3 – Fibra de HMPE vista no MEV.....	69
Figura 5.4 – Zona de interface da fibra de polipropileno com a argamassa de cimento vista no MEV.....	70
Figura 5.5 – Zona de interface da fibra de HMPE com a argamassa de cimento vista no MEV.....	70
Figura 5.6 – Nódulo de fibras encontrado no interior de um corpo de prova prismático.....	71
Figura 5.7 – Resistência à compressão em MPa, média e intervalo dos resultados.....	73
Figura 5.8 – Análise de variância para os resultados de resistência à compressão.....	73
Figura 5.9 – Módulo de elasticidade em GPa, média e intervalo dos resultados.....	76
Figura 5.10 – Análise de variância para os resultados de módulo de elasticidade.....	77
Figura 5.11 – Resistência à tração na flexão em MPa, média e intervalo dos resultados.....	79

Figura 5.12 – Análise de variância para os resultados de resistência à tração na flexão.	80
Figura 5.13 – Curvas Força x Deformação dos ensaios de tração na flexão	82
Figura 5.14 – Média dos resultados de tenacidade em kN x mm	83
Figura 5.15 – Análise de variância para os resultados de tenacidade.	84
Figura 5.16 – Dilatação térmica do concreto de referência, concreto com fibra de polipropileno e concreto com fibra de HMPE.	86
Figura 5.17 – Coeficiente de condutividade térmica do concreto de referência e dos concretos reforçados com fibras.	88
Figura 5.18 – Resistência à compressão do concreto pós exposição a temperatura de do concreto sem fibra e dos concreto com adição de fibras poliméricas.	90

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Exemplos de polímeros e principais aplicações	23
Tabela 3.2 – Exemplo de polímeros e suas unidade básicas de repetição. ..	25
Tabela 3.3 – Temperatura de transição vítrea e temperatura de fusão de alguns polímeros.	29
Tabela 3.4 – Propriedades mecânicas de alguns polímeros.	31
Tabela 3.5 – Tipos de cimentos e as propriedades especiais.	34
Tabela 4.1 – Dosagem dos materiais usados nos traços estudados.	43
Tabela 4.2 – Composição do cimento Portland de alta resistência inicial. ..	44
Tabela 4.3 – Exigências químicas do cimento Portland de alta resistência inicial.	45
Tabela 5.1 – Resultados da análise estatística para resistência à compressão.	75

Tabela 5.2 – Resultados da análise estatística para módulo de elasticidade estático.....	78
Tabela 5.3 – Resultados da análise estatística para resistência à tração na flexão.	81
Tabela 5.4 – Resultados da análise estatística para tenacidade.	85
Tabela 5.5 – Coeficientes de dilatação térmica.	87
Tabela 5.6 – Resultados da análise estatística para o coeficiente condutividade térmica.	89

Lista de Símbolos

Å – ångström ($1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$).

% – por cento.

C° – graus celsius.

g/cm³ – grama por centímetro cúbico.

GPa – gigapascal.

MPa – megapascal.

µm – micrometro.

mm – milímetro.

cm – centímetro.

m – metro .

T_g – transição vítrea.

V_{cr} – volume crítico de fibras.

σ_{mu} – tensão última da matriz.

σ_{fu} – tensão última na fibra.

σ'_f – tensão nas fibras quando a matriz fissura (MPa).

σ_a – tensão básica correspondente à deformação específica 50×10^{-6} (MPa).

σ_b – tensão quando o carregamento corresponde a trinta por cento da resistência à compressão (MPa).

ϵ_b – é a deformação específica média dos corpos de prova sob a tensão σ_b .

F_{ct} – resistência à tração na flexão (MPa).

p – carga máxima aplicada (N).

l – distância entre os cutelos de suporte (mm).

b – largura média do corpo de prova na seção de ruptura (mm).

kNmm – kilo Newton vezes milímetro.

W/mk – Watt por metro vezes kelvin (unidade de condutividade térmica).

Lista de Siglas

ABNT – Associação brasileira de normas técnicas.

CP – Cimento Portland.

HMPE – *High modulus polyethylene*.

MEV – Microscopia eletrônica de varredura.

NBR – Norma Brasileira.

PEAD – Polietileno de alta densidade.

PEBD – Polietileno de baixa densidade.

PVC – Policloreto de vinila.

PET – Polietileno teraftalato.

PP – Polipropileno.

TGA – *Thermogravimetric analyses*.

Resumo

Na construção civil, o uso de fibras poliméricas como adição ao concreto com o objetivo de controlar e reduzir a fissuração tem mostrado resultados positivos, melhorando o desempenho e a durabilidade do concreto. Estudos mostram que a adição de fibras podem influenciar outras propriedades do concreto, mecânicas e térmicas. O foco de estudo deste trabalho foi avaliar a influência da adição de fibras de polipropileno e fibras polietileno de alto módulo nas propriedades térmicas e mecânicas do concreto. O fibra de polipropileno já é usada amplamente pela indústria da construção civil como adição no concreto. O polietileno de alto módulo é um material de alta tecnologia ainda muito pouco estudado como adição no concreto. Para avaliar a influência da adição desse material foram analisados corpos de prova de concreto com fibras de polietileno de alto módulo, de concreto com fibras de polipropileno e de concreto sem adição de fibras. Foram realizados ensaios de propriedades mecânicas, propriedades térmicas e ensaios de caracterização das fibras. Das propriedades analisadas, a tenacidade, resistência à tração e dilatação térmica foram as mais afetadas positivamente pelo uso de fibras poliméricas.

Palavras chave: concreto, propriedades térmicas, concreto reforçado com fibras, polímeros.

Abstract

In construction, the use of fibers as an additive to concrete with the aim to control and reduce cracking has shown positive results by improving the performance and durability of concrete. Studies show that the addition of fibers may influence other properties of the concrete. The focus of this work was to evaluate the influence of the addition of polypropylene fibers and high modulus polyethylene fibers in the thermal and mechanical properties of concrete. The polypropylene fiber is already used widely by the construction industry as an additive in concrete. The high modulus polyethylene is a high-tech material still very little studied as addition in concrete. To assess the influence of the addition of this material were analyzed concrete specimens with high modulus polyethylene fibers, concrete with polypropylene fibers and concrete without fibers. Mechanical properties, thermal properties and fiber characterization tests were performed. The analyzed properties, toughness, tensile strength and thermal expansion were the most positively affected by the use of polymeric fibers.

Keyword: concrete, thermal properties, fiber reinforced concrete, polymer.

1. Introdução

Tradicionalmente os materiais conhecidos são divididos em 3 grupos majoritários com características e propriedades bastante distintas: metais, polímeros e cerâmicos. Os principais critérios de divisão desses agrupamentos são a natureza da estrutura atômica e natureza química das substâncias. A grande maioria dos materiais se encontram distribuídos entre os grupos citados acima. Outros agrupamentos muito utilizados são os materiais compósitos, mistura de dois ou mais materiais de diferentes agrupamentos, e os materiais de alta tecnologia, onde estão inclusos os biomateriais, materiais inteligentes, super condutores e nano materiais (CALLISTER, 2010).

O concreto consiste em um material compósito com características típicas de materiais cerâmicos. Sua composição básica apresenta uma matriz cimentícia, formado por cimento e água, que envolve os agregados graúdos e miúdos. Segundo GUPTA (2014), o concreto possui uma alta resistência à compressão, o que o torna um material muito adequado para o uso na construção civil. No entanto, possui baixos valores para a resistência a tração, fato que demanda reforçar o material para esse tipo de esforço. Normalmente o reforço em questão vem em forma de barras de aço colocadas no interior das peças de concreto nas regiões que receberam esforços de tração, dando origem ao concreto armado. Muitas vezes as barras de aço são posicionadas também em regiões onde ocorrem outros tipos de esforços, para melhorar o desempenho e durabilidade da estrutura de concreto.

O reforço do concreto também pode ser feito por meio da adição de fibras curtas na matriz cimentícia. Com o objetivo de melhorar a ductilidade, a durabilidade e controlar a fissuração, esse tipo de reforço ganhou muito

interesse do mercado e de pesquisadores a partir da década de 60 (BERNADI, 2003).

Recentemente com o emprego de novos materiais e tecnologias na produção de fibras, além das vantagens já apresentadas, a adição de fibras no concreto tem mostrado incremento nas resistências mecânicas do material. Ainda que o mercado de concreto com fibras seja pequeno, anualmente a indústria norte americana registra um aumento de 20% da produção desse material, e no mundo todo o consumo de fibras para concreto é em torno de 300.000 toneladas (MEHTA, 2006).

Diversos tipos de fibras são utilizadas como reforço de concreto, sendo as principais, fibras de aço, fibras poliméricas e fibras naturais. Recentemente diversos estudos sobre a influência das fibras de aço no comportamento concreto foram publicados. (MACHADO e SILVA, 2015; SALVADOR e FERNANDES, 2015; SALVADOR e FIGUEIREDO, 2013; BEZERRA, 2012). As fibras de aço são elementos descontínuos e são produzidas em diversos formatos, dimensões (FIGUEIREDO, 2000).

Os polímeros são materiais conhecidos pela sua diversidade de propriedades e características, adequando bem para o uso como reforço de concreto. Desenvolvida na década de 90, a fibra de polipropileno já se encontra amplamente disponível no mercado brasileiro, sendo utilizada principalmente em pisos industriais, concreto projetado e pré moldado (SALVADOR, 2013).

A influência das fibras de polipropileno no comportamento do concreto foi analisada e estudada por diversos pesquisadores sobre diferentes propriedades (ASLANI e SAMALI, 2014; SALVADOR, 2013; SUN e XU, 2009; LIMA, 2005).

Segundo DAVIES (2011), o polietileno de alto módulo, conhecido também pela sigla HMPE, oriunda da nomenclatura em inglês *high modulus polyethylene*, é um dos principais materiais na confecção de cabos submarinos para serviços de ancoragem. Sua alta resistência mecânica e baixa densidade permite a criação de cabos com até 6 km de comprimento. Até a data de publicação deste trabalho não foram encontrados estudos a respeito da utilização das fibras de HMPE como adição ao concreto.

2. Objetivos

2.1. Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo estudar a influência da adição de fibras poliméricas nas propriedades térmicas e mecânicas do concreto.

2.2. Objetivos específicos

- Avaliar o comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras de polipropileno e fibras de polietileno de alto módulo.
- Avaliar a influência da adição de fibras de polipropileno e polietileno de alto módulo nas propriedades térmicas do concreto.
- Realizar análises estatísticas a respeito dos dados coletados nos ensaios térmicos e mecânicos.

3. Revisão bibliográfica

3.1. Polímeros

O termo “polímero”, proveniente da junção das palavras gregas “poli” e “mero” que significam “muitas” e “partes” respectivamente, foi criado pelo químico alemão Jöns Jacob Berzelius em 1932 para designar compostos com mesma fórmula empírica porém com pesos moleculares diferentes. Os polímeros consistem em cadeias moleculares com um comprimento muito extenso, por isso são classificados como macromoléculas. A estrutura principal da molécula polimérica é uma sequência de unidade repetitivas chamadas de meros. A partir dessas unidades básicas, os monômeros, a cadeia é sintetizada unindo essas pequenas partes umas às outras. Esse processo tornou-se conhecido por polimerização. (MANO, 1999).

Polímeros podem ser naturais ou sintéticos. Os naturais, derivados de plantas e animais, são utilizados pela humanidade a muitos séculos e incluem materiais como a madeira, algodão, couro e lã. Já os polímeros sintéticos incluem os plásticos e muitos tipos de borrachas atualmente utilizadas. Sua produção e utilização aumentaram muito com o avanço de técnicas de produção e identificação, principalmente no período após a segunda guerra mundial, devido a criação de institutos de pesquisa e a necessidade de novos materiais (CALLISTER, 2010).

A maioria dos polímeros sintéticos possuem um peso molecular entre 10^6 e 10^8 , e todos possuem um tamanho entre 100Å e 100.000Å (MANO, 1999).

Devido à grande diversidade de propriedades desse grupo de materiais, os polímeros possuem uma ampla gama de aplicações. Essa grande diversidade

de propriedades se deve a organização complexa microestrutura desse material. Fatores como peso molecular, composição química e processo de produção, entre outros, permitem se obter tanto materiais macios quanto materiais muito rígidos (SALVADOR, 2013).

Na tabela 3.1, foi feita uma síntese dos polímeros que são comumente utilizados como material de engenharia, inclusive os utilizados nesse trabalho, polipropileno (PP) e polietileno de alto módulo (HMPE) e suas principais aplicações (SALVADOR, 2013; CALLISTER, 2010). Nota-se que o polipropileno já tem como principais aplicações o uso como fibras, enquanto o HMPE ainda possui uma limitada utilização, sendo citada na tabela apenas o uso como material para confeccionar cabos submarinos utilizados na ancoragem de grandes navegações em águas profundas. Nota-se também a semelhança da densidade dos dois materiais estudados nesse trabalho.

Tabela 3.1 – Exemplos de polímeros e principais aplicações

Polímero	Sigla	Densidade (g/cm^3)	Principais aplicações
Polipropileno	PP	0,91	Fibras, peças automotivas.
Polietileno de alto módulo	HMPE	0,98	Cabos submarinos
Polietileno tereftalato	PET	1,35	Embalagens e fibras têxteis
Poliamida	-	1,11 – 1,40	Produtos têxteis.
Policloreto de vinila	PVC	1,30 – 1,58	Canos e tubulações

Fonte: (SALVADOR, 2013; CALLISTER, 2010).

3.1.1. Monômeros

Os monômeros consistem em moléculas com potencial para passar pelas reações de polimerização. Em geral, são cadeias de carbono insaturadas. Os tipos de monômeros presentes na construção do polímero fazem grande influência nas propriedades da macromolécula. Polímeros com um único tipo de monômero em sua estrutura é chamado de homopolímero, e apresentando dois ou mais tipos de monômeros na estrutura é chamado de copolímero (CALLISTER, 2010).

Os copolímeros apresentam propriedades e características mais complexas, formando materiais com uma gama maior de aplicação do que os homopolímeros, que possuem uma maior limitação em suas propriedades. Para que uma molécula apresente potencial para formar uma macromolécula é indispensável que ela tenha um grau de funcionalidade maior do que 2, ou seja, a molécula deve ter mais do que dois pontos em sua estrutura na qual possa se conectar a outra molécula (SALVADOR, 2013).

Na tabela 4.2 estão expostos alguns exemplos de polímeros e suas respectivas unidades básicas de repetição, que podem conter um ou mais monômeros (CALLISTER, 2010). Ambos os polímeros, PP e HMPE, utilizados nesse trabalho em forma de fibra estão presentes na tabela 3.2. Nota-se a semelhança entre esses dois materiais, sendo os dois homopolímeros e com unidades básicas de repetição semelhantes.

Tabela 3.2 – Exemplo de polímeros e suas unidade básicas de repetição.

Polímero	Sigla	Classificação	Unidade de repetição
Polipropileno	PP	Homopolímero	$\left[\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{CH}_3 \end{array} \right]$
Polietileno de alto módulo	HMPE	Homopolímero	$\left[\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array} \right]$
Poliamida (Nylon 6,6)	-	Copolímero	$\left[\begin{array}{ccccccc} \text{H} & \text{H} & \text{O} & \text{H} & \text{H} & \text{O} \\ & & & & & \\ -\text{N} & -\text{C} & -\text{N} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C}- \\ & & & & & \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array} \right]_6 \text{ }_4$
Polietileno tereftalato	PET	Copolímero	$\left[\begin{array}{ccccccc} \text{O} & & \text{O} & \text{H} & \text{H} & \text{O} \\ & & & & & \\ -\text{C} & -\text{C}_6\text{H}_4 & -\text{C} & -\text{O} & -\text{C} & -\text{C}- \\ & & & & & \\ & & & & \text{H} & \text{H} \end{array} \right]$
Policloreto de vinila	PVC	Homopolímero	$\left[\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{Cl} \end{array} \right]$

Fonte: (CALLISTER, 2010).

Ambos os polímeros utilizados nesse trabalho em forma de fibra apresentam um monômero muito semelhante, apesar de suas propriedades mecânicas serem muito diferentes, visto que o grau de polimerização do HMPE é centenas de vezes maior que o grau de polimerização do PP.

3.1.2. Estrutura molecular

As diferentes formas de organização da estrutura molecular do polímero influenciam fortemente as propriedades da macromolécula polimérica. As técnicas modernas de polimerização permitem controlar tal fator permitindo manipular as propriedades do polimérico em mais um nível (CALLISTER, 2010).

As principais formas de estrutura molecular de um polímero são:

Polímeros lineares: formados por grandes cadeias lineares de monômeros. Formam materiais flexíveis e de alto peso molecular, com muitas ligações de van der Wals e pontes de hidrogênio entre as moléculas próximas. O Polietileno, poliestireno, policloreto de vinila e nylon são exemplos de polímeros organizados dessa forma (CALLISTER, 2010). A figura 3.1 exemplifica a estrutura linear.

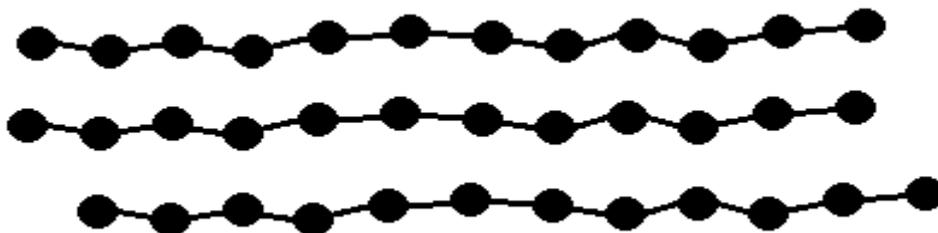


Figura 3.1 – Exemplo de estrutura molecular linear.

Fonte: Próprio autor.

Polímeros ramificados: apresentam cadeias lineares que apresentam ramificações oriundas de reações secundárias no processo de polimerização. O empacotamento da cadeia é menor em relação a cadeia linear e isso faz com que a densidade do polímero com cadeias ramificadas tenha uma

densidade menor. Em geral os mesmos polímero que formam estruturas lineares podem formar estruturas ramificadas, dependendo dos parâmetros do processo de polimerização. O polietileno de baixa densidade é um exemplo de polímero com essa organização(CALLISTER, 2010). A figura 3.2 apresenta um modelo de estrutura ramificada.

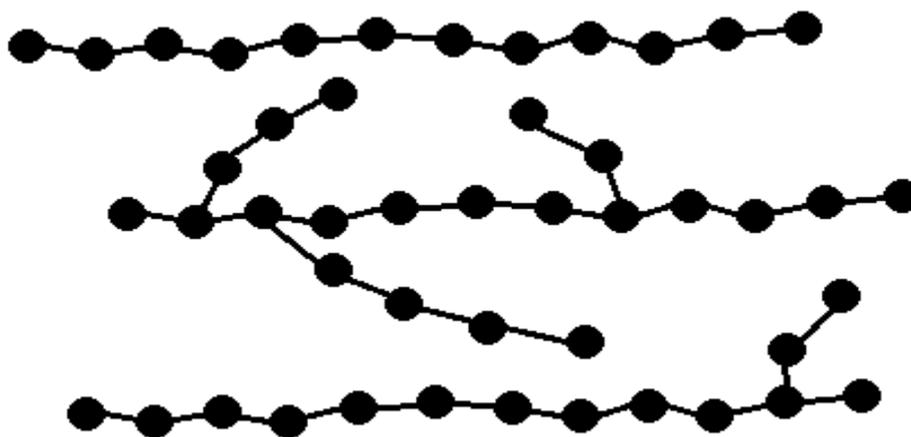


Figura 3.2 – Exemplo de estrutura ramificada.

Fonte: Próprio autor.

Polímeros com ligações cruzadas: apresentam cadeias lineares que se ligam as cadeias adjacentes por meio de ligações covalentes formadas no processo de polimerização. Muitos dos materiais elásticos e borrachas vulcanizadas apresentam essa configuração (CALLISTER, 2010). A figura 3.3 mostra um exemplo dessa estrutura:

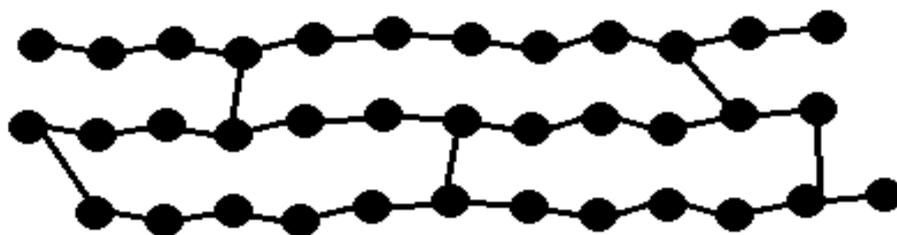


Figura 3.3 – Exemplo de estrutura com ligações cruzadas.

Fonte: Próprio autor.

Polímeros em rede: parte ou todos os monômeros que o formaram apresentam um grau de funcionalidade igual ou maior a 3. Na verdade são polímeros com uma grande densidade de ligações cruzadas. Apresentam muitas ligações covalentes entre as cadeias, e em geral tem propriedades mecânicas e térmicas que se destacam das propriedades de polímeros com outras organizações estruturais. Exemplo desse grupo são os epóxis e os poliuretanos (CALLISTER, 2010). A figura 3.4 mostra a estrutura em rede:

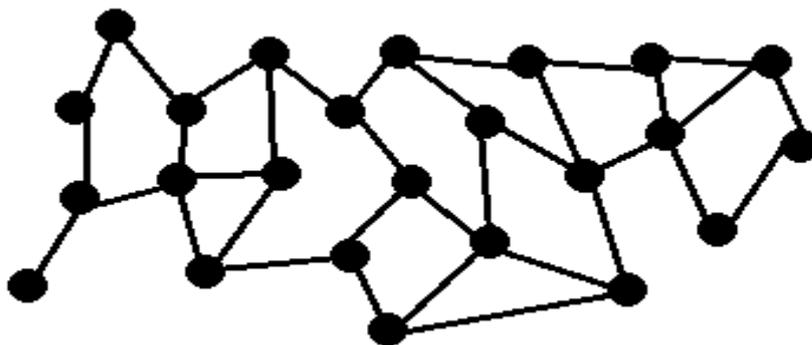


Figura 3.4 – Exemplo de estrutura em rede.

Fonte: Próprio autor.

O polipropileno e o polietileno de alto módulo, materiais utilizados nesse trabalho, possuem organização estrutural molecular classificada como linear.

3.1.3. Temperatura de transição vítrea e fusão.

A temperatura de transição vítrea de um polímero consiste no ponto em que o material ao ser aquecido, deixa de ser rígido e passa a um estado físico mais maleável, mas não líquido. Essa temperatura ocorre em polímero com estrutura molecular amorfa ou semi cristalina. Nessa temperatura, moléculas que estavam anteriormente fixas, passam a apresentar movimentos de rotação e translação (CALLISTER, 2010).

Na temperatura conhecida com temperatura de fusão o polímero passa para um estado líquido viscoso, com uma organização molecular aleatória. A tabela 3.3 apresenta alguns exemplos de polímeros e suas respectivas temperaturas de transição vítrea e temperatura de fusão.

Tabela 3.3 – Temperatura de transição vítrea e temperatura de fusão de alguns polímeros.

Polímero	Sigla	Transição vítrea (°C)	Fusão (°C)
Polipropileno	PP	148	175
Polietileno de alto módulo	HMPE	65	145
Aramida	-	57	265
Polietileno teraftalato	PET	69	265
Polietileno de baixa densidade	PEBD	-110	115
Polietileno de alta densidade	PEAD	-90	137
Polícloreto de vinila	PVC	87	212

Fonte: (CALLISTER, 2010).

Nota-se que os polímeros estudados nesse trabalho, polipropileno e HMPE, apresentam valores de temperatura próximos para o ponto de fusão.

3.1.4. Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas dos polímeros variam de acordo com a temperatura em que o material se encontra, e da forma como a carga é aplicada (EBEWELE, 1996). Para os polímeros, assim como nos outros grupos de materiais, o interesse nas propriedades mecânicas se concentra no módulo de elasticidade, deformação e resistência a tração. Essas propriedades podem ser medidas por meio de ensaio de resistência à tração, que gera a curva tensão-deformação.

Os polímeros mais rígidos, os termofixos, são frágeis em relação aos outros grupos, e apresentam alto módulo de elasticidade, enquanto os polímeros dúcteis, termoplásticos, apresentam uma relação tensão-deformação mais balanceada e por esse motivo absorvem uma maior quantidade de energia. Os elastômeros compõe o grupo que apresentam o menor módulo de elasticidade, resultando em grandes deformações mesmo com baixas solicitações (BRUICE, 2010).

Abaixo, a tabela 3.4 exemplifica alguns polímeros e suas principais propriedades mecânicas.

Tabela 3.4 – Propriedades mecânicas de alguns polímeros.

Polímero	Sigla	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento (%)
Polipropileno	PP	31,0 – 41,4	1,14 – 1,55	100–600
Polietileno de alto módulo	HMPE	3000	109-132	3,5
Aramida (Nylon 6,6)	-	75,9	1,59 – 3,79	150 - 300
Polietileno tereftalato	PET	48,3 – 72,4	2,76 – 4,14	30 – 300
Polietileno de baixa densidade	PEBD	8,3 – 31,4	0,172 – 0,282	100 - 650
Polietileno de alta densidade	PEAD	22,1 – 31,0	1,08	10 - 1200
Policloreto de vinila	PVC	40,7 – 51,7	2,41 – 4,14	40 - 80

Fonte:(CALLISTER, 2010; DAVIES et al, 2011)

A diferença na propriedades mecânicas dos dois polímeros estudados nesse trabalho em forma de fibras adicionadas ao concreto fica explicita na tabela 3.4. O HMPE possui resistência à tração da ordem de 90 vezes superior ao PP e módulo de elasticidade aproximadamente 100 vezes menor.

3.1.5. Polipropileno

O polipropileno consiste em um termoplástico com uma organização molecular relativamente simples. Suas propriedades de resistência a tração, alongamento e módulo de elasticidade o tornam um material muito interessante para uso como reforço compósitos cimentícios.

Em 1951 os químicos J.PaulRogan e Robet L. Banks foram os primeiros a sintetizar o propileno, unidade básica do polipropileno, por acidente em seu laboratório. Alguns anos mais tarde, em 1954, a primeira reação de polimerização do propileno, sintetizando o polipropileno, foi realizada (STINSON, 1987). O polímero em questão foi introduzido no mercado em 1957 e atualmente é o polímero com o segundo maior volume de produção no mundo (BARCELLOS, 2012).

3.1.6. Polietileno de alto módulo

O polietileno de alto módulo ou *High modulus polyethylene* (HMPE), é um material de alta tecnologia, desenvolvido para suportar cargas mecânicas de alto valor. A indústria marítima tem aplicado esse material com muito êxito nos últimos anos, sendo o HMPE um dos principais materiais utilizados para cabos que tem como objetivo por exemplo a ancoragem de grandes navios em mar aberto, onde a profundidade ultrapassa na maioria das vezes 4000 metros de profundidade (DAVIES et al, 2011).

A utilização de fibras curtas de HMPE como reforço para concreto ainda não foi amplamente estudada, visto que até a data deste trabalho não foram encontrados artigos e trabalhos com esse tema. Esse foi um dos fatores que motivou a presente pesquisa com esse material.

3.2. Concreto

O concreto consiste em um compósito muito usado na indústria da construção civil. Formado por uma matriz de cimento Portland na qual estão inseridos os agregados graúdos e miúdos. O cimento Portland misturado com água forma uma pasta que recobre os agregados graúdos e miúdos, sendo estes normalmente brita e areia respectivamente (BUCKNER, 2014).

Segundo Hassoun (2015), podemos resumir as vantagens do concreto da seguinte maneira: possui resistência à compressão relativamente alta; possui melhor resistência ao fogo do que outros materiais estruturais como por exemplo o aço; longa vida útil com manutenção barata em relação a outros materiais; em alguns tipos de estruturas como por exemplo barragens, é o material mais econômico que pode ser adotado atualmente; pode assumir diversas formas.

Diversos fatores afetam as propriedades do concreto endurecido. A relação água/cimento se mostra como um dos principais desses fatores. A resistência mecânica do concreto é menor para misturas com maiores teores de água, no entanto, concretos com baixo índice água/cimento apresentam baixa trabalhabilidade, o que pode gerar patologias na estrutura, como por exemplo brocas ou buracos na estrutura (GUPTA, 2014).

Os diversos tipos de cimentos presentes no mercado da construção civil nacional permitem a criação de concretos com propriedades específicas. A tabela 3.5 apresenta alguns tipos de cimentos e as propriedades especiais adquiridas pelo concreto ao utilizar esse tipo de cimento.

Tabela 3.5 – Tipos de cimentos e as propriedades especiais.

Sigla	Propriedades
CP I	Nenhuma propriedade
CP I - S	Menor permeabilidade
CP II-Z	Menor permeabilidade
CP IV	Resistente a ambientes agressivos, alta resistência mecânica
CP V-ARI	Alta resistência mecânica inicial

Fonte: (GUPTA, 2014).

Segundo Buckler (2014), existem diversos materiais que podem ser utilizados como agregados. Para isso, esses materiais devem ser duráveis e não reagirem com os outros componentes do concreto. Normalmente esse agregados são mais baratos do que a matriz de cimento, portanto é economicamente desejável que a maior parte do volume do concreto seja composta pelos agregados.

Concretos podem ser classificados de acordo com a densidade, que pode ser manipulada pela escolha do agregado. O concreto de peso normal, também conhecido como concreto convencional ou no inglês *standard concrete*, possui densidade entre 2,0 g/cm³ e 2,8 g/cm³. Quando a densidade do concreto se encontra entre 0,9 g/cm³ e 2,0 g/cm³ esse material é denominado concreto leve. Quando a densidade supera os 2,8 g/cm³ o concreto é chamado de concreto pesado (GUPTA, 2014).

3.2.1. Propriedades mecânicas

Ao projetar uma estrutura de concreto, assume-se que o material resiste a resistência à compressão e não resiste a resistência à tração, sendo assim, a resistência à compressão é um dos principais fatores utilizados para medir a qualidade do concreto, enquanto outras propriedades mecânicas podem ser dadas em função da resistência à compressão (HASSOUN, 2015)

O concreto pode atingir valores bem variados para resistência à compressão de acordo com a sua composição. Existem concretos normais com resistências que variam de 15 MPa a 65 MPa, e os valores mais comuns para a resistência à compressão desse material se encontram entre 20 MPa e 35 MPa (GUPTA, 2014). Atualmente a norma brasileira de projeto de estruturas de concreto armado, NBR 6118 (2008), exige uma resistência à compressão mínima de 20 MPa para concretos.

O concreto é um material frágil, portando, não resiste a grandes esforços de tração. Ensaio de tração direta não são confiáveis para medir a resistência à tração do concreto devido ao desalinhamento e concentração de tensões no aparato de fixação da amostra ao equipamento de ensaio (HASSOUN, 2015).

Existem diversas forma de medir a resistência a tração do concreto, sendo as mais utilizadas a compressão diametral e tração na flexão. No ensaio de compressão diametral um corpo de prova cilíndrico sofre um esforço de compressão em um eixo imaginário que passa pelo diâmetro do corpo de prova. No ensaio de tração na flexão, um corpo de prova prismático passa por um carregamento em 3 ou 4 pontos e a partir da resistência máxima obtida é possível calcular a resistência à tração do concreto. Em geral, a

resistência à tração do concreto é algo em torno de 10% do valor encontrado para a resistência à compressão (BUCKER, 2014).

3.2.2. Propriedades térmicas

A condutividade térmica é a capacidade de um determinado material transferir energia térmica de uma região de alta temperatura para um região de baixa temperatura. O equação a seguir é normalmente utilizada para definir os termos da condutividade térmica (CALLISTER, 2010):

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (\text{Equação 3.1})$$

Onde:

- q é o fluxo de calor;
- k é o coeficiente de condutividade térmica;
- dT/dx é o gradiente de temperatura.

O coeficiente de condutividade térmica “ k ”, é uma das propriedades térmicas mais importantes quando realizamos o cálculo térmico de um material. Sua unidade padrão é o W/mK (Watts por metro vezes Kelvin). Para o concreto, esse coeficiente varia de 0,40 W/mK à 1,75 W/mK, de acordo com a densidade do material. Concretos leves apresentam os coeficientes de condutividade térmica mais baixos, devido a presença de ar incorporado ao material na forma de bolhas (SACHT et al, 2010).

A maioria dos materiais sólidos expandem ao aumentar de temperatura. Do ponto de vista atômico, essa expansão se dá pelo aumento da vibração dos

átomos, aumentando assim a distância entre eles. A equação 3.2 é utilizada para determinar esse comportamento (CALLISTER, 2010).

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \times \Delta T \quad (\text{Equação 3.2})$$

Onde:

- Δl é a variação do comprimento;
- l_0 é o comprimento inicial;
- α é o coeficiente de dilatação linear térmica;
- ΔT é a variação de temperatura.

O coeficiente de dilatação linear térmica representa a variação do comprimento de um determinado material ao variar sua temperatura. Sua unidade padrão é o $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ou $^{\circ}\text{K}^{-1}$. Para os materiais cerâmicos, incluindo portanto o concreto, esse coeficiente varia de $0,5 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{K}$ a $18 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{K}$. (CALLISTER, 2010)

3.2.3. Concreto reforçado com fibras

O concreto reforçado com fibras (CRF) é produzido pela adição de fibras descontínuas a mistura convencional do concreto. Essa adição de fibras, altera as propriedades mecânicas do concreto, e portanto, o desempenho deste material. Em geral, a adição de fibras tem por objetivo o aumento da resistência à tração e reduzir a abertura das fissuras (SOUNTHARARAJAN, 2013).

Embora as fibras possam melhorar algumas propriedades do concreto, o seu uso nunca resultara em um concreto sem fissuras. Em geral as fibras afetam efetivamente a resistência à tração, o controle de fissuramento, a resistência à fadiga e melhoram as propriedades dinâmicas do concreto (MINDNESS, 1994).

A adição de fibras promove a melhoria da ductilidade e da tenacidade. Essa melhoria se deve ao fato das fibras minimizarem o surgimento das fissuras assim como seu crescimento. Desta forma, permite-se que o compósito absorva mais energia, devido a deformação, ao arrancamento e ruptura das fibras (CAETANO, 2004).

A Figura 3.5 mostra a ruptura de um concreto com reforço e a ruptura sem reforço (VENTURA et al., 2006). O concreto com adição de fibras sofre uma maior deformação antes da ruptura, visto que as fibras interceptam as fissuras diminuindo assim sua abertura. O concreto sem fibras tem um comportamento mais frágil do que o concreto com adição de fibras.

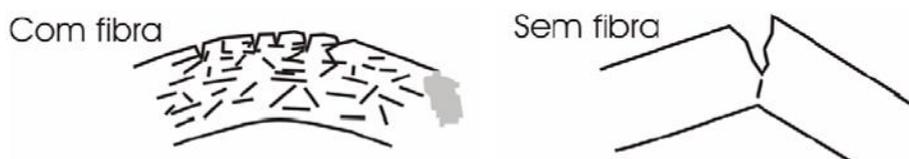


Figura 3.5 – Ruptura do concreto com reforço de fibras e do concreto sem reforço de fibras.

Fonte: (VENTURA, 2006)

Segundo Mindness (1994) podem ser utilizados vários tipos de fibras para reforçar o concreto, como por exemplo, aço, polipropileno, carbono, vidro,

nylon, celulose e polietileno. No entanto, as fibras mais utilizadas atualmente com esse propósito são as de aço e polipropileno.

A adição de fibras de aço no concreto não resulta em alteração significativa da resistência à compressão, porém as fibras de aço promovem a melhoria do desempenho do concreto quando submetido a esforços de tração. (BEZERRA, 2012)

Sun, e Xu (2009), observaram que a adição de fibras de polipropileno no concreto a um teor próximo de 1% em relação ao volume de concreto proporcionou um aumento na resistência à compressão de 6,98% em relação ao concreto sem adição de fibras. Também foi observado que a resistência à tração sofreu um aumento de 14,42% em relação ao concreto sem adição de fibras.

3.2.4. Teor de fibras e volume crítico

Compósitos com fibras tem padrão de comportamento mecânico já conhecido. A resistência mecânica desses materiais cresce à medida em que o volume de fibras adicionadas aumenta, até atingir um valor limite, chamado de volume limite. (CEPED, 1982) A partir desse volume, a resistência não cresce na mesma proporção, e as fibras começam a prejudicar o desempenho do material.

Segundo Bernadi (2003), para que adição de fibras seja viável, o volume deve estar entre o volume crítico e o volume limite. A quantidade mínima de fibras a serem adicionadas no compósito para que o mesmo suporte a carga após a ruptura da matriz é dado pela equação 3.3:

$$V_{cr} = \frac{\sigma_{mu}}{\sigma_{mu} + (\sigma_{fu} - \sigma'f)} \times 100 \quad (\text{Equação 3.3})$$

Onde:

- V_{cr} é o volume crítico de fibras;
- σ_{mu} é a tensão última da matriz;
- σ_{fu} é a tensão última na fibra;
- $\sigma'f$ é a tensão nas fibras quando a matriz fatura.

4. Procedimentos e materiais

O presente trabalho utilizou de análises experimentais e estatísticas para estudar a influência da adição de fibras poliméricas no concreto. Para isso, a fase experimental foi dividida em 3 etapas: caracterização das fibras, análise das propriedades mecânicas do concreto com adição de fibras poliméricas e análise das propriedades térmicas do concreto com adição de fibras poliméricas.

Para a caracterização das fibras foram realizados o ensaio de análise termogravimétrica (TGA) e microscopia eletrônica e varredura (MEV). O ensaio do MEV também foi utilizado para estudar a zona de interface entre a fibra e a matriz cimentícia. Para avaliar as propriedades mecânicas, foram realizados ensaios de resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade e tenacidade. As propriedades térmicas foram avaliadas através dos ensaios de condutividade térmica e dilatação térmica. Um ensaio de resistência à compressão com corpos de prova expostos previamente a uma temperatura de 200°C foi realizado para avaliar a estabilidade térmica das fibras quando adicionadas ao concreto. Foram realizadas análises estatísticas de todos os resultados encontrados. A figura 4.1 apresenta um fluxograma sintético dos trabalhos experimentais e analíticos realizados.

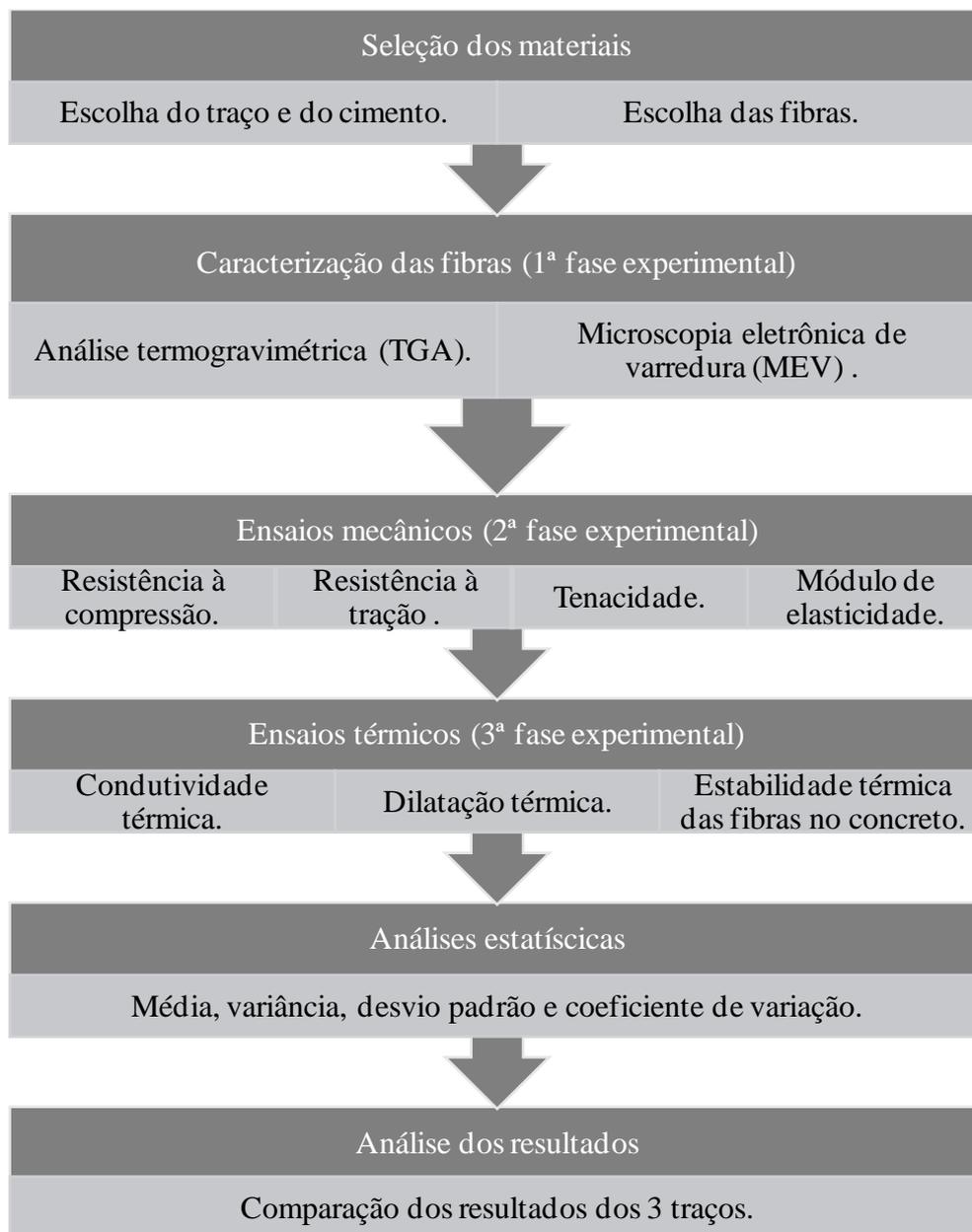


Figura 4.1 – Fluxograma dos trabalhos experimentais e analíticos realizados.

4.1. Materiais utilizados

Para os ensaios realizados nesse trabalho foram adotados 3 traços de concreto: concreto de referência (sem fibra), concreto com fibra de polipropileno e concreto com fibra de HMPE. Em todos os três, a razão

entre cimento, areia, brita e água foi mantida constante. A razão escolhida foi de 1:2:2 com teor de água igual a 0,65. Esses valores foram definidos para que o concreto atingisse uma boa trabalhabilidade, importante na confecção de concreto com adição de fibras. Concretos com baixa trabalhabilidade dificultam o espalhamento homogêneo das fibras. É do escopo deste trabalho, não utilizar nenhum outro aditivo além das fibras poliméricas.

O percentual de fibras adicionadas ao concreto foi de 1% em relação ao volume de concreto. Trabalhos com traços semelhantes apontam que o valor de adição de 1% em relação ao volume de concreto apresenta os melhores resultados para as propriedades mecânicas do concreto. (BERNADI, 2003; SUN, Z. e XU, Q, 2009). A tabela 4.1 apresenta as informações de dosagem para cada traço estudado nesse trabalho.

Tabela 4.1 – Dosagem dos materiais usados nos traços estudados.

Traço	Cimento (g)	Areia (g)	Brita (g)	Água (ml)	Adição de fibras
Sem fibra	1000	2500	2500	610	-
Fibra PP	1000	2500	2500	610	1%
Fibra HMPE	1000	2500	2500	610	1%

4.1.1. Cimento Portland de alta resistência inicial

O cimento em questão foi escolhido para uso no trabalho por ser o tipo de cimento com menos percentual de adição encontrado no mercado comum da região. Em todos os traços e ensaios foi utilizado o CP-V-ARI da empresa Cauê. A padronização desse tipo de cimento, no Brasil, é feita pela norma NBR 5733 (1991). Em relação a composição do cimento utilizado, mostra-se na tabela 4.2 que só é permitido o acréscimo de no máximo 5% de material carbonático, sendo o restante clínquer e sulfatos de cálcio.

Tabela 4.2 – Composição do cimento Portland de alta resistência inicial.

Sigla	Clínquer e sulfatos de cálcio (%)	Material carbonático (%)
CPV-ARI	100-95	0-5

Fonte: NBR 5733 (1991).

Além de atender essas especificações em relação a sua composição, o cimento Portland de alta resistência inicial também deve atender as exigências químicas descritas na NBR 5733 e apresentadas na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Exigências químicas do cimento Portland de alta resistência inicial.

Determinações químicas	Limites (% da massa)
Resíduo insolúvel	1,0
Perda ao fogo	4,5
Óxido de magnésio (MgO)	6,5
Tri óxido de enxofre(SO ₃)	-
Quando C3A do clínquer for igual a 8%	3,5
Quando C3A do clínquer for maior que 8%	4,5
Anidrido carbônico (CO ₂)	3,0

Fonte: NBR 5733.

4.1.2. Agregado miúdo

A areia utilizada neste trabalho foi adquirida, ensacada e lavada, com tamanho médio. Ao ser retirada dos sacos em que são vendidas, a areia em questão apresentou alto teor de umidade, sendo necessário um processo de secagem. Dias antes da execução da mistura do concreto, areia foi espalhada em uma superfície lisa e sem contaminações e deixada nesse local por aproximadamente setenta e duas horas. Após esse período uma inspeção

visual constatou que não havia qualquer umidade prejudicial para o trabalho.

4.1.3. Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado foi a brita de tamanho 2, de origem basáltica. A brita foi peneirada antes da utilização na moldagem com o objetivo de retirar material o excesso pulverulento que estava depositado em sua superfície.

4.1.4. Fibra de polipropileno

As fibras de polipropileno são encontradas no mercado brasileiro com diferentes comprimentos que variam de dez milímetros a cinquenta milímetros. Além dessa variação de comprimento, o polipropileno permite também uma variação de densidade, dependendo do processo de produção. Em geral a densidade se encontra em torno de $0,9 \text{ g/cm}^3$.

A fibra de polipropileno, com nome comercial *Fiberlock*, usada nesse trabalho foi produzida pela empresa *Etruria*. Cada embalagem, possui trezentas gramas da fibra que possui comprimento de 12mm e diâmetro de $35 \mu\text{m}$. O comprimento de 12 mm está próximo do comprimento crítico de fibras, e por isso foi selecionado para o teste. Na figura 4.2 estão apresentadas a fibra na embalagem que foi adquirida (a) e a fibra em detalhe (b).

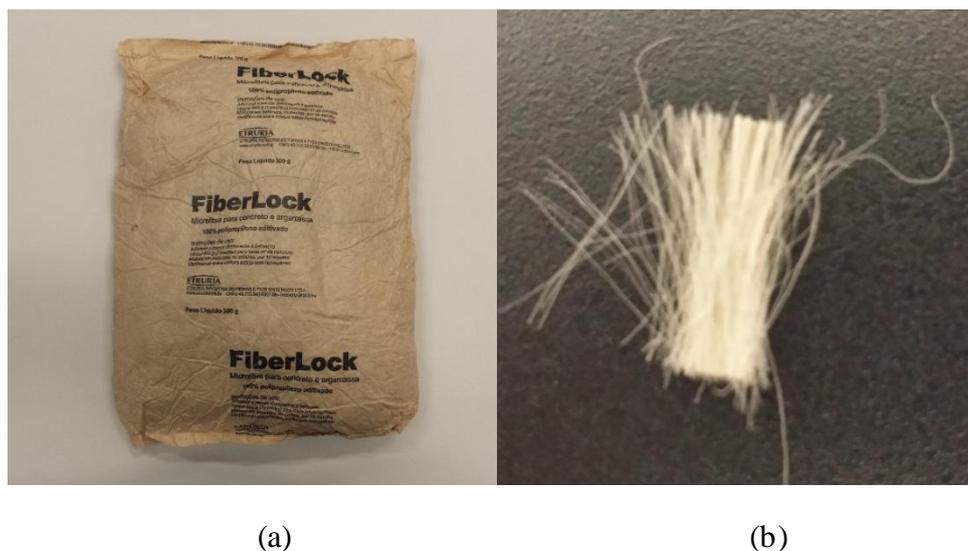


Figura 4.2 – (a) Fibra de polipropileno na embalagem em que foi comprada;
(b) fibra de polipropileno em detalhe.

Em relação as propriedades mecânicas da fibra de polipropileno Fiberlock,
As fibras de polipropileno foram escolhidas para fazer parte do escopo deste presente trabalho por já serem a fibra polimérica mais usada como adição ao concreto, contrastando com a escolha da segunda fibra.

4.1.5. Fibra de polietileno de alto módulo.

A fibra de HMPE, com nome comercial Dyneema, foi adquirida em rolo, portanto precisou ser cortada manualmente para adequar as necessidades do trabalho. Para isso, foi utilizado uma tesoura comum de aço inoxidável. Para manter o padrão utilizado nas fibras de polipropileno, as fibras de HMPE foram cortadas com 12 mm de comprimento. O diâmetro dessas fibras é de aproximadamente 20 μm . A figura 4.3 apresenta a fibra ainda no rolo em que foi adquirida (a) e a fibra cortada com 12 mm (b).

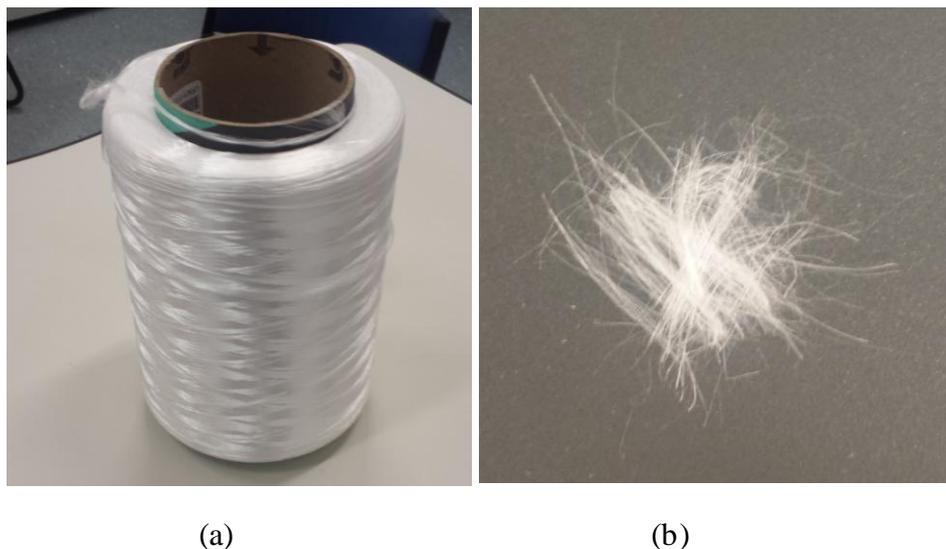


Figura 4.3 – (a) Fibra de HMPE no rolo; (b) fibra de HMPE cortada.

O fato das fibras de HMPE serem um material de alta tecnologia, com propriedades mecânicas superiores a maioria das fibras poliméricas utilizadas como adição de concreto, além de não terem sido encontrados estudos a respeito desse das fibras de HMPE como adição no concreto foram os fatores que motivaram a escolha dessa fibra como objeto de estudo desse trabalho.

4.2. Procedimento de mistura

Para todos os corpos de prova feitos nesse trabalho, praticamente o mesmo procedimento de mistura dos materiais foi adotada, as particularidades de cada moldagem estão descritas nos tópicos desse capítulo correspondentes a tais ensaios. As moldagens foram realizadas no CEFET-MG campus II, Departamento de Engenharia Civil, Prédio 12, Laboratório de materiais de construção, seguindo os procedimentos sugerido em normas e com algumas adaptações feitas a esses procedimentos de acordo com a necessidade do

trabalho. Para a mistura dos materiais foi utilizada uma betoneira elétrica de 120 litros, conforme a figura 4.4.



Figura 4.4 – Betoneira usada para mistura do concreto das amostras ensaiadas nesse trabalho.

Inicialmente todos os materiais foram pesados e devidamente separados. O cimento e a areia foram os primeiros a serem colocados na betoneira e misturados durante trinta segundos. Em seguida foram adicionadas a fibra, no caso dos concretos com adição de fibras, e as britas, misturando novamente por mais trinta segundos. Essa sequência específica de mistura foi escolhida após testes, onde a mesma apresentou uma melhor homogeneização da fibra. A água foi adicionada por último, e em sequência mais três minutos de mistura. Em seguida o concreto já preparado foi despejado em um carrinho de mão e levado para a área de moldagem.

No final da moldagem todos os corpos de prova passaram por um processo de vibração mecânica para evitar a presença de bolhas de ar no interior das peças.

4.3. Análise termogravimétrica

Análise termogravimétrica, ou TGA (Thermogravimetric analyses), é a técnica utilizada para determinar a perda de massa de um determinada substância em função da temperatura. A decomposição do polímero devido ao aumento da temperatura leva a perda de massa, por isso essa técnica permite avaliar a estabilidade térmica dos polímeros.

Amostras de aproximadamente 10 mg de cada fibra utilizadas nesse trabalho foram submetidas ao ensaio de TGA, com atmosfera ar, com a temperatura variando de 30°C a 900°C. Como o presente trabalho inclui análise de diversas propriedades térmicas do concreto reforçado com as fibras poliméricas, conhecer o comportamento e estabilidade térmica desses polímeros se torna indispensável para ampliar o entendimento dos resultados para os outros ensaios. A partir dos resultados da TGA, as faixas de temperatura em que serão realizados os outros ensaios térmicos foi determinada.

4.4. Microscopia eletrônica de varredura

A microscopia eletrônica foi realizada no CEFET MG , campus I, Departamento de Transportes, Laboratório de mecânica dos pavimentos e tecnologia dos materiais, utilizando o equipamento TM3000 da marca Hitachi (figura 4.5).



Figura 4.5 – Equipamento TM3000 utilizado nos ensaios de microscopia eletrônica de varredura.

Foram analisadas amostras das fibras isoladas, com o objetivo de analisar a natureza da superfície de cada tipo de fibra, polipropileno e HMPE, e amostras das fibras no interior da matriz de concreto, com o objetivo de analisar a interface fibra matriz. Nesse caso foram moldados corpos de prova utilizando uma metodologia diferente do resto do trabalho para preservar a zona frágil de interface fibra-matriz. Para cada traço proposto foram moldados 4 corpos de prova cilíndricos de 25 mm de comprimento e 10 mm de diâmetro. As formas foram inicialmente preenchidas totalmente com a argamassa utilizada no trabalho, ou seja, o mesmo traço utilizado no concreto de referência porém sem o agregado graúdo. Devido as pequenas dimensões dos corpos de prova as britas não poderiam ser usadas nesse caso. Após o enchimento das formas, fibras foram adicionadas com o auxílio de uma pinça de ponta fina de modo que cada corpo de prova recebeu apenas 1 fibra, sendo metade do comprimento da fibra inserido no

corpos de prova. Essa metodologia se mostrou satisfatória visto que os resultados apresentaram uma boa visualização da zona de interface sem que essa sofresse nenhum esforço mecânico significativo antes do ensaio. A figura 4.6 mostra detalhes e informações dos corpos de prova utilizados nesse ensaio.

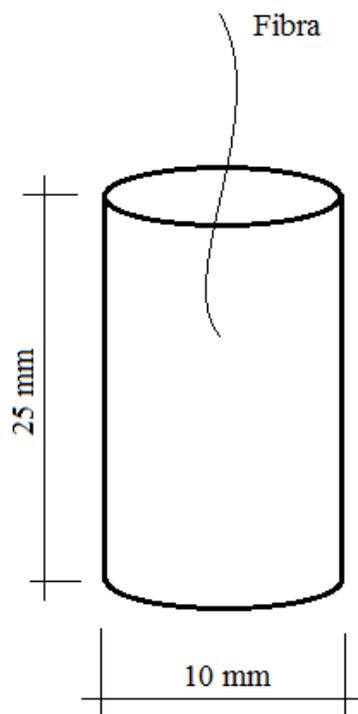


Figura 4.6 – Detalhe do corpo de prova utilizado no ensaio de MEV.

4.5. Inspeção visual

Com o objetivo detectar possíveis falhas e discontinuidades no concreto com adição de fibras, será feita uma análise qualitativa baseada na inspeção visual dos corpos de prova utilizados nos demais ensaios. O principal objetivo aqui será determinar se as fibras foram uniformemente dispersas na matriz de cimento, ou se nódulos e emaranhados de fibra se formaram na hora da mistura. A capacidade da fibra de se espalhar homogeneamente pela matriz é fundamental para que sua aplicação seja a mais eficiente possível, visto que tais discontinuidades tendem a afetar os resultados tanto para as

propriedades mecânicas, devido a criação de zonas de concentração de tensões, quanto nas propriedades térmicas, devido o surgimento de bolhas de ar na matriz.

4.6. Módulo de elasticidade e resistência à compressão

Para avaliar o módulo de elasticidade e a resistência a compressão dos concretos foi utilizado o procedimento descrito na norma NBR 8522 (2008). Um total de 5 corpos de prova foram moldados para cada traço de concreto proposto, 7 dias antes do ensaio.

As formas metálicas de 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro, mostradas na figura 4.7, foram preenchidas em três camadas de concreto usando uma concha, golpeando cada camada trinta vezes com uma haste metálica. A superfície superior do concreto na forma foi retificado usando uma colher de pedreiro. Após a moldagem as formas foram levadas para uma mesa vibratória onde ficaram por um total de 20 segundos cada.



Figura 4.7 – Forma metálica cilíndrica usada para confeccionar as amostras dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade.

Os corpos de prova foram deformados vinte e quatro horas após a moldagem. Todos foram devidamente identificados utilizando giz de cera, com um número sequencial e uma letra que indicava o tipo de traço usado. Após a identificação os corpos de prova foram levados para o tanque de cura onde permaneceram até a véspera do ensaio. Com vinte e sete dias de idade, os corpos de prova passaram pelo capeamento de enxofre para retificar as faces superior e inferior.

O ensaio foi realizado no CEFET-MG campus I, Departamento de transportes, Laboratório de mecânica dos pavimentos e tecnologia dos materiais, utilizando a prensa e equipamentos mostrados na figura 4.7. O clip gauge visível na figura 4.8 é responsável pela medição da deformação real da amostra, necessário para o cálculo do módulo de elasticidade. Inicialmente dois corpos de prova foram testados para resistência a compressão axial, usando o procedimento descrito na norma NBR 5739 (1994), a média dos resultados dessas duas amostras será utilizada em uma etapa seguinte.

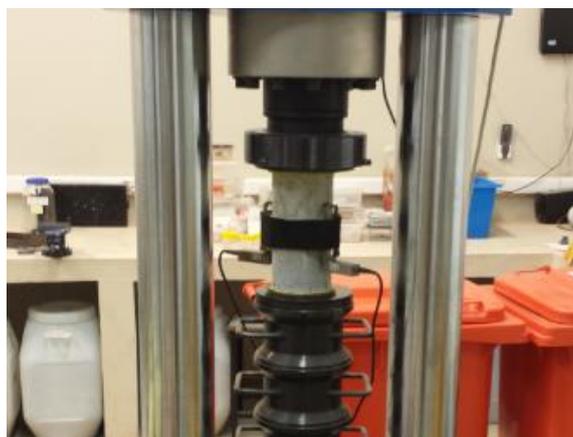


Figura 4.8 – Prensa utilizada no ensaio de módulo de elasticidade de resistência à compressão.

O corpo de prova foi colocado na prensa e anexados os clips gauges utilizando um elástico para garantir que estejam bem fixados. Todos os carregamentos e descarregamento ocorrem a uma taxa de 0,45 MPa por segundo. Para medir o módulo de elasticidade são realizados quatro ciclos de carregamento. Nos três primeiros ciclos, o equipamento aplica um carregamento equivalente a trinta por cento da resistência à compressão do material e mantém assim durante sessenta segundos. Em seguida retira-se toda a carga e mantém sem carregamento por mais sessenta segundos. No quarto ciclo a amostra é levada novamente a trinta por cento da resistência à compressão, e mantém assim durante sessenta segundos. Após esse tempo, os clips gauges são retirados do corpo de prova que recebem um novo carregamento, dessa vez levando até a ruptura.

O módulo de elasticidade é calculado utilizando a equação 4.1.:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \times 10^{-3} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - 50 \times 10^{-6}} \times 10^{-3} \text{ (Equação 4.1)}$$

Onde:

- σ_a é a tensão básica correspondente à deformação específica 50×10^{-6} em MPa;
- σ_b é a tensão em MPa quando o carregamento corresponde a trinta por cento da resistência à compressão;
- ε_b é a deformação específica média dos corpos de prova sob a tensão σ_b .

A formula é aplicada três vezes para cada corpo de prova, usando os valores obtidos nos três primeiros ciclos de carregamento e descarregamento, e o módulo de cada amostra é dado pela média dos três valores encontrado.

4.7. Resistência à tração na flexão e tenacidade

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado utilizando como referência a norma NBR 12142 (2010). Para isso foram confeccionados corpos de prova prismáticos, e carregados em dois pontos do terço médio da amostra. A figura 4.9 apresenta a prensa utilizada nos ensaios de resistência à tração na flexão.

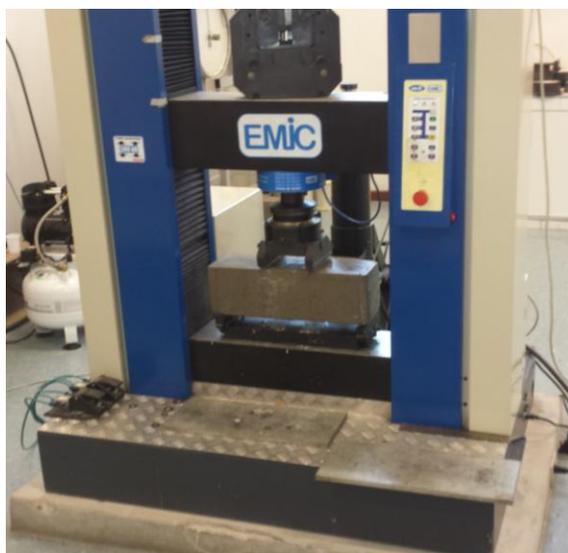


Figura 4.9 – Prensa utilizada nos ensaios para determinar a resistência à tração.

A mistura do concreto para a confecção dos corpos de prova seguiu os mesmo passos já detalhados no ensaio de resistência à compressão. Porém, dessa vez, o concreto foi colocado em formas prismáticas de madeira, figura 4.10, com altura e largura iguais a 15 cm e comprimento de 50 cm. Dessa maneira as dimensões dos corpos de prova seguiram as especificações da norma NBR 12412 (2010).

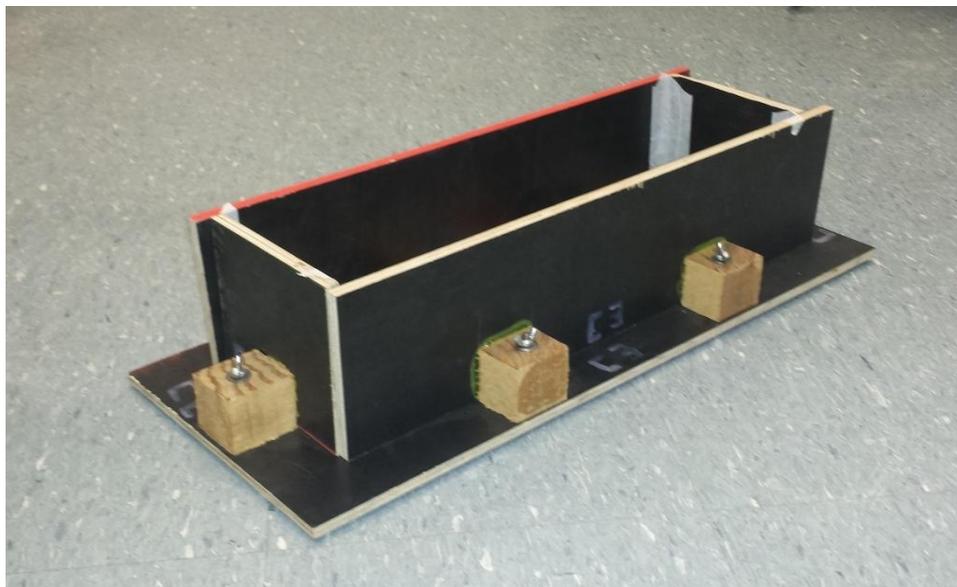


Figura 4.10 – Forma de madeira utilizada na confecção dos corpos de prova prismáticos para o ensaio de resistência à tração na flexão.

Seguindo o procedimento experimental sugerido na norma NBR 12142 (2010), após o período de cura, os corpos de prova foram apoiados e centralizados no dispositivo de carregamento. Em seguida iniciou-se o a aplicação de carga continuamente e sem choques com uma velocidade de 0,9 MPa por minuto, até a ruptura do corpo de prova. Após essa etapa, os corpos de prova têm suas dimensões devidamente medidas e anotadas para que seja possível calcular a resistência à tração. É importante que a linha de ruptura ocorra entre o terço médio do corpo de prova, com uma margem de erro de 5 cm. A resistência é então calculada pela equação 4.2:

$$F_{ct} = \frac{p \times l}{b \times d^2} \text{(Equação 4.2)}$$

Onde:

- F_{ct} é resistência à tração na flexão (MPa);
- p é carga máxima aplicada (N);
- l é distância entre os cutelos de suporte (mm);
- b é largura média do corpo de prova na seção de ruptura (mm);
- d é altura média do corpo de prova, na seção de ruptura (mm).

Segundo Callister, 2010, podemos definir como tenacidade a capacidade do material de absorver energia e se deformar no regime elástico e no regime plástico. O valor da tenacidade para determinado material pode ser determinado pelo cálculo da área criada pela curva carga x deformação e o eixo das abscissas.

Neste trabalho, a tenacidade foi obtida calculando a área formada pela curva carga x deformação do ensaio de resistência à tração na flexão.

4.8. Dilatação Térmica

O ensaio de dilatação térmica fornece uma grande quantidade de informações sobre o material testado. É possível determinar com grande precisão o coeficiente de dilatação térmica em diversas temperaturas. Além disso, o ensaio também possibilita o entendimento do comportamento estrutural químico do material ensaiado quando exposto à altas temperaturas.

Esse tipo de ensaio se mostra relevante quando propõe-se entender e avaliar o comportamento das fibras utilizadas como reforço para o concreto. Por meio deste ensaio é possível entender o comportamento de um determinado concreto quando exposto diferentes temperaturas.

Para o ensaio proposto nesse trabalho, será utilizado o equipamento DIL 402 PC do CEFET-MG (Figura 4.11). O uso deste equipamento é recomendado para materiais cerâmicos e vidros, uma vez que permite chegar a uma temperatura de até 1250° C, com uma taxa de aquecimento de até 50°C por minuto.



Figura 4.11 – Equipamento DIL 402 PC

Para realizar o ensaio foram confeccionados corpos de provas de 10 mm de diâmetro e 25mm de comprimento(figura 4.12). Dentro do equipamento, os corpos de prova passaram por um aquecimento, variando a temperatura de 60°C até 200° C com atmosfera normal. O equipamento registrou a variação de comprimento dos corpos de prova com a mudança de temperatura.



Figura 4.12 – Corpo de prova utilizado no ensaio de dilatação térmica.

Devido ao tamanho dos corpos de prova, o agregado graúdo não pôde ser utilizado na mistura dos concretos para esse ensaio. Todos os outros componentes se mantiveram constantes, obedecendo as proporções utilizadas nos demais ensaios.

4.9. Condutividade térmica

Dois fatores importantes quando analisamos a condutividade térmica de um material são a densidade e a presença de impurezas nesse material. No caso da adição de fibras poliméricas em percentuais volumétricos próximos a 1%, pouco se altera a densidade do material, portanto não era esperada mudança na condutividade térmica dos concretos reforçados com fibras provenientes em mudanças na densidade. As fibras, no entanto, agem do ponto de vista térmico como impurezas dentro do concreto. Essas impurezas criam descontinuidades que devem em algum grau dificultar a transmissão de energia térmica pelo interior do material. Caso esse efeito seja significativo, será observado uma redução no coeficiente de condutividade dos concretos reforçados com fibras poliméricas.

O ensaio de condutividade térmica das amostras de concreto convencional e concreto com adição de fibras foi realizado no CEFET-MG, campus II, departamento de engenharia civil, utilizando o equipamento HFM 436/3/1 Lambda (Figura 4.13).



Figura 4.13 – HFM 436/3/1 Lambda.

Para registrar a condutividade térmica do material, o equipamento inicia um fluxo controlado de energia, aquecendo uma placa em contato com a face superior da amostra a uma temperatura conhecida e resfriando uma placa em contato com a face inferior da amostra a uma outra temperatura também conhecida. Conhecendo o diferencial de temperatura entre as duas placas, a espessura, a densidade, e medindo o fluxo de calor que atravessa a amostra, é possível calcular o coeficiente de condutividade térmica daquele material.

Para um resultado mais preciso e significativo é necessário criar um programa de temperatura onde é definido em quais temperaturas (média

entre as placas e diferença entre as placas) o equipamento deve realizar as leituras de condutividade térmica e registrar os devidos pontos. O modelo do equipamento utilizado nesse ensaio trabalha com temperaturas entre 0° e 100°C. O programa mostrado na figura 4.14 foi definido para esse ensaio utilizando faixas de temperaturas coerentes com as temperaturas médias em que o concreto se encontra em situações normais de uso. Devido a limitação de temperatura do equipamento não foi possível realizar a leitura em temperaturas encontradas em situações de incêndio.

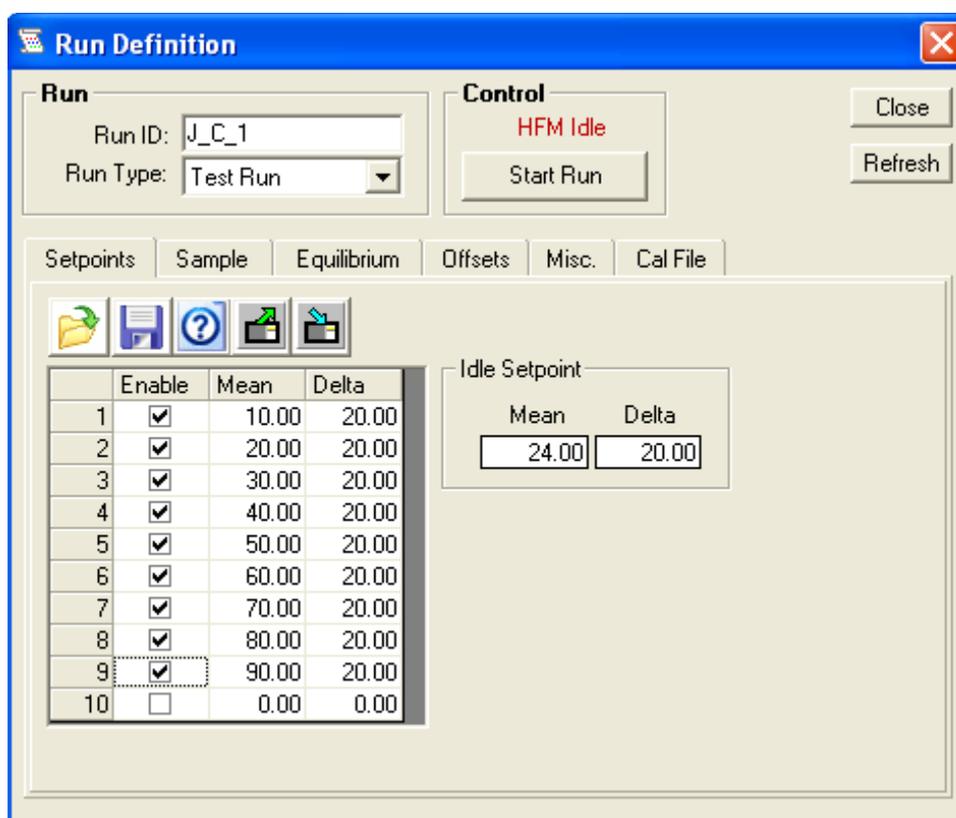


Figura 4.14 – Programa de temperatura para o equipamento HFM 436/3/1

Lambda

As amostras confeccionadas para este ensaio, seguindo as recomendações do fabricante do equipamento, possuem dimensões de 300mm x 300mm x

30mm (figura 4.15). Para realizar um leitura precisa da condutividade térmica das amostras, tanto a face superior quanto a inferior devem estar paralelas umas a outras, e livre de imperfeições e saliências oriundas do processo de moldagem. A presença de ar entre a amostra e as placas de aquecimento e resfriamento levam a uma leitura falha do coeficiente de condutividade térmica do material.



Figura 4.15 – Corpo de prova utilizado no ensaio de condutividade térmica.

O processo de mistura dos materiais seguiu a mesma sequência já estipulada nos processos das amostras dos outros ensaios. O concreto pronto foi colocado e compactado manualmente nas formas e levado à uma mesa vibratória por 30 segundos. Dessa forma a presença de brocas nas superfícies da amostra que fazem contato com as placas do equipamento foi minimizada. Um dia após a moldagem, os corpos de prova foram levados para o tanque de cura onde permaneceram por sete dias.

O excesso de umidade presente no material, principalmente a água livre que fica armazenada nos poros e capilares do concreto, atrapalham a precisão

dos resultados. Para evitar que isso aconteça, após o período de cura as amostras ficaram 24 horas dentro de uma estufa a 100°C.

Após colocar as amostras dentro do equipamento e inserir os parâmetros de entrada, o ensaio ocorreu de forma automatizada pelo equipamento seguindo o programa de temperatura. O tempo de ensaio, que varia de acordo com as condições locais de temperatura, ficou em torno de 30 minutos.

4.10. Resistência à compressão do concreto pós exposição a temperatura de 200° C.

Nesse trabalho será feito avaliado a resistência a compressão do concreto de referência e dos concretos com adição de fibras, após passarem por uma período de 1 hora a uma temperatura de 200°C. Essa temperatura foi escolhida pois o concreto ainda não sofreu degradação significativa. No entanto ambos os polímeros utilizados nesse trabalho tem seu ponto de fusão inferior a 200°C. Desta forma será possível avaliar se a resistência a compressão do concreto reforçado com fibras poliméricas é prejudicada pelo fato das fibras passarem pela temperatura de fusão.

O aquecimento dos corpos de prova foi feito por uma estufa elétrica. O ensaio de compressão será realizado 1 dia após o aquecimento de forma que a temperatura de ensaio seja a mesma que os corpos de prova do ensaio de compressão que não passaram pela exposição a temperatura de 200°C. Os resultados desses dois grupos de corpos de prova serão comparados a fim de determinar se a fusão dos polímeros gera alguma influência na resistência mecânica do concreto.

4.11. Análise estatística

A análise estatística realizada nesse trabalho tem como objetivo estudar a variabilidade dos resultados encontrados a fim de determinar sua significância. Dessa forma, para cada espaço amostral serão calculados a variância, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

A variância é baseada na diferença do valor de cada observação (x_j) e a média dos resultados (x_m), ou seja, o desvio encontrado em torno da média ($x_j - x_m$). No cálculo da variância o valor desses desvios são elevados ao quadrado, dessa forma, a equação usada para calcular a variância é:

$$\sigma^2 = \frac{\sum(x_j - x_m)^2}{n-1} \text{ (Equação 4.3)}$$

Onde:

- σ^2 é a variância.
- x_j é o valor observado.
- x_m é o valor médio dos resultados.
- n é o número de amostras.

A unidade da variância é elevada ao quadrado, o que torna sua interpretação menos trivial. Para uma melhor interpretação dos resultados de variabilidade, calcula-se o desvio padrão, que é encontrado executando a raiz quadrada da variância.

O coeficiente de variação é calculado dividindo o desvio padrão pela média dos resultados e multiplicando o valor obtido nessa divisão por 100. Dessa

forma obtém-se um valor com unidade em porcentagem que significa o quanto os resultados obtidos em determinada observação variam em torno da média.

Análise de variância (ANOVA) foi realizada para determinar se os valores médios encontrados para cada grupo de amostras de um determinado ensaio são iguais ou diferentes. Nessa análise, são calculadas as variâncias entre as amostras de um determinado grupo, a variância entre os grupos e a variância total. A partir desses dados, e sabendo os graus de liberdade do conjunto, calcula-se o coeficiente chamado de “F crítico” e o coeficiente “F”. Se F for maior que F crítico, considera-se como verdade a hipótese de que as médias são de fato, diferentes. Caso F seja menor que F crítico, a hipótese de que as médias são iguais, chama de hipótese nula, é considerada como provavelmente verdadeira.

Para realizar todas as análises estatísticas apresentadas nesse trabalho foi utilizado o software Minitab. O programa calcula um coeficiente “P”, baseado no coeficiente F, que significa a probabilidade da hipótese nula ser verdade. Nesse trabalho, o coeficiente P será a base para rejeitar ou não a hipótese nula. Considerando um intervalo de confiança dos resultados referentes a 95 %, caso o coeficiente P seja maior do 5 %, ou 0,05, a hipótese nula será tomada como verdadeira.

5. Resultados e discussão

5.1. Análise termogravimétrica

A figura 5.1 apresenta o resultado do ensaio da fibra de polipropileno e da fibra de HMPE. Foi notado uma grande perda de massa, 32 %, até a temperatura de 70°C. Isso não representou a degradação do polímero, sendo na verdade a perda do aditivo aplicado na superfície da fibra pela fabricante. Após a perda do aditivo, a massa da fibra de polipropileno se manteve constante até a temperatura de 250°C. A partir desse ponto, a massa sofreu uma forte redução de 63% da massa inicial, estabilizando novamente na temperatura de 450°C. Para a fibra de HMPE, o ensaio mostrou que a massa da fibra se manteve constante até a temperatura de 360° C. Nesse ponto a fibra de HMPE iniciou uma perda linear de massa até a temperatura de 490°C. Essa perda representou 23% da massa inicial. Após esse ponto a massa ficou estável até o final do ensaio.

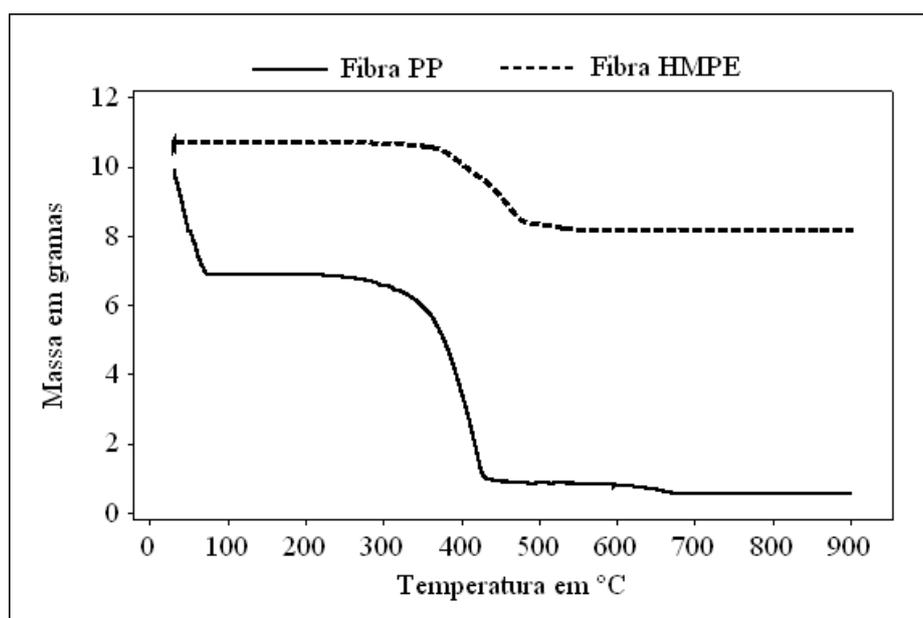


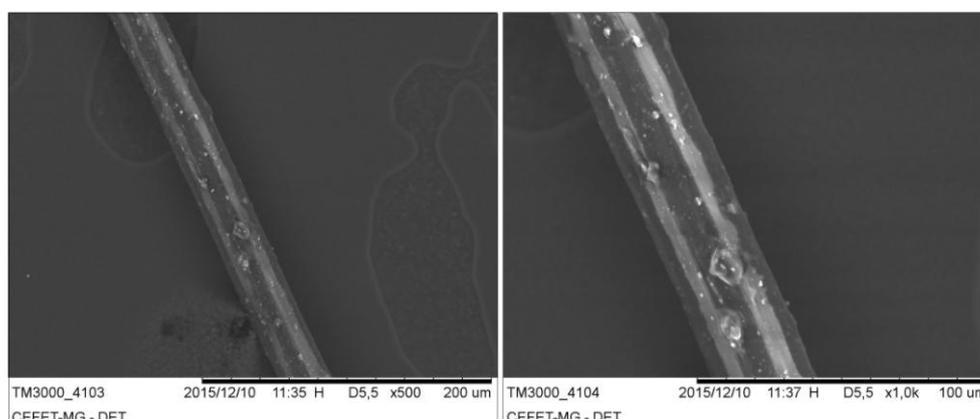
Figura 5.1 – Análise termogravimétrica da fibra de PP e da fibra de HMPE.

A fibra de HMPE apresentou uma estabilidade térmica muito superior a fibra de polipropileno. Esse tipo de propriedade depende principalmente da estrutura e organização molecular de cada polímero, assim como da força das ligações moleculares presentes nessa estrutura.

Conhecendo os valores de ponto de fusão informados na literatura e pelos fabricantes para os PP e o HMPE, podemos confirmar a natureza termo plástica desses dois polímeros, pois conforme observado no resultado da TGA, tanto para o PP quanto para o HMPE, o ponto de fusão ocorre antes da degradação estrutural do polímero.

5.2. Microscopia eletrônica de varredura

A figura 5.2 apresenta a fibra de polipropileno com uma ampliação de 500 e 1000 vezes. O diâmetro médio da fibra foi estimado por meio de das imagens em 35 μm . A fibra apresenta uma superfície rugosa e podemos notar a existência de pontos claros espalhados pela fibra, o que indica a presença de uma outra substância, a diferença de cor se dá pela diferença de densidades entra o polipropileno e essa segunda substância. Acredita-se que se trata do aditivo adicionado a fibra informado pelo fabricante. Ampliações maiores que 1.000 vezes não foram viáveis, visto que a amostra apresentou degradação localizada devido incidência concentrada dos elétrons.



(a) – Ampliação de 500 vezes

(b) – ampliação de 1000 vezes.

Figura 5.2 – Fibra de PP vista no MEV.

Na figura 5.3 temos a amostra da fibra de HMPE com uma ampliação de 500 e 1200 vezes. O diâmetro médio da fibra foi estimado em 20 μm . Diferentemente da fibra de polipropileno, a fibra de HMPE é composta de vários filamentos com menos de 2 μm de diâmetro, além de apresentar uma superfície aparentemente mais lisa. Não foi notada a presença de outra substância ou aditivo na superfície da fibra. Novamente, com ampliações maiores do que 1000 vezes a fibra apresentou degradação localizada.

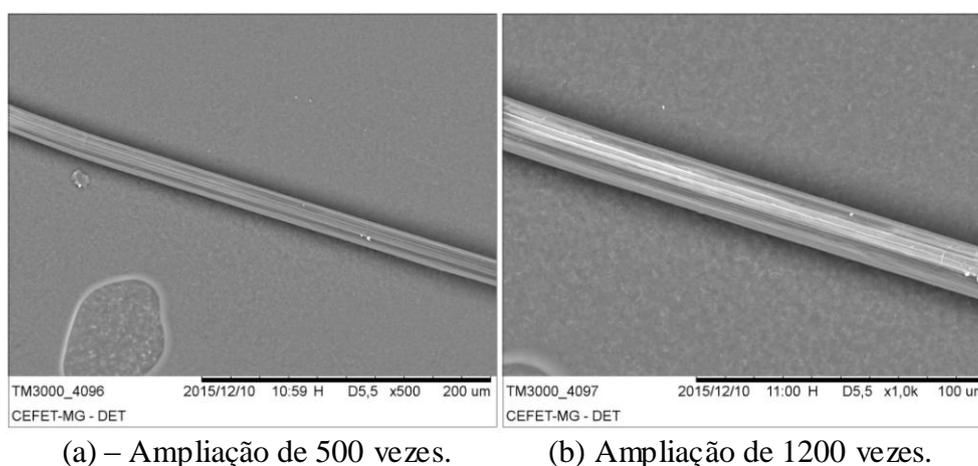
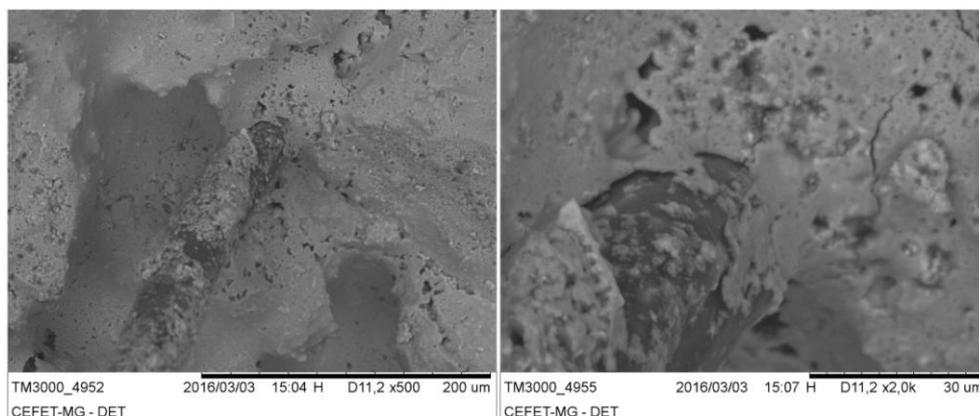


Figura 5.3 – Fibra de HMPE vista no MEV

Além das fibras isoladas, amostras das fibras misturadas com o concreto também foram estudadas. O foco dessa análise foi a zona de transição entre a fibra e a argamassa de cimento.

A figura 5.4 apresenta a zona de interface entre a fibra de polipropileno e a matriz cimentícia nas ampliações de 500 e 2000 vezes. Observa-se que a argamassa ficou aderida em boa parte da fibra exposta. A partir da ampliação de 5000 vezes a fibra apresentou degradação devido à forte incidência de elétrons no local. Além disso a resolução a partir de 3000 vezes de ampliação não foi satisfatória.

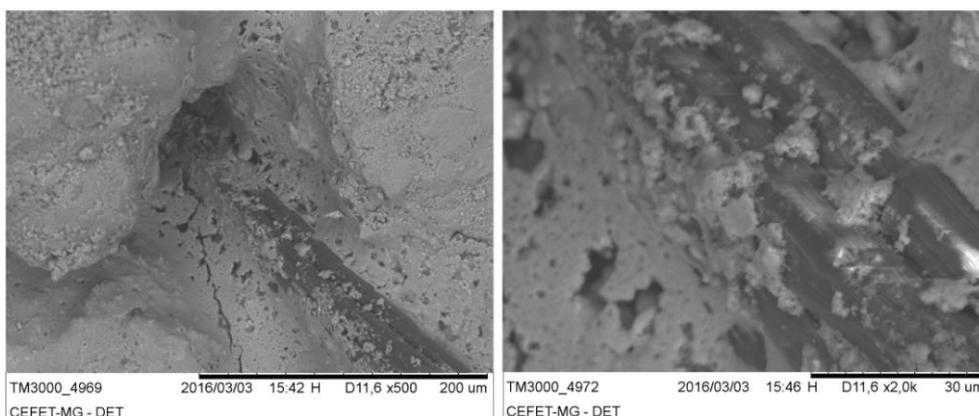


(a) – Ampliação de 500 vezes.

(b) – Ampliação de 2000 vezes.

Figura 5.4 – Zona de interface da fibra de polipropileno com a argamassa de cimento vista no MEV.

A figura 5.5 apresenta as imagens do MEV da zona de interface entre a fibra de HMPE e a matriz, com ampliações de 500 e 2000 vezes. Assim como na fibra de polipropileno, nota-se uma boa aderência da argamassa na superfície da fibra, e a zona de transição entre as duas também aparenta ser sólida. Dessa vez a degradação na fibra foi observada a partir da ampliação de 3500. A fibra de HMPE apresenta um ponto de fusão menor que o da fibra de polipropileno, o que explica a degradação encontrada na HMPE em ampliações menores do que a fibra de polipropileno.



(a) – Ampliação de 500 vezes.

(b) – Ampliação de 2000 vezes.

Figura 5.5 – Zona de interface da fibra de HMPE com a argamassa de cimento vista no MEV.

5.3. Inspeção visual

Nos corpos de prova de concreto com adição de fibra de HMPE, foi observado a presença de pequenos nódulos de fibra que não se desprenderam durante a mistura. A parte dessas falhas localizadas, o resto da matriz apresentou uma densidade homogênea de fibras. Na Figura 5.6 está apresentada a seção transversal do interior de um corpo de prova prismático já rompido. Destaca-se um dos nódulos encontrados (círculo vermelho).

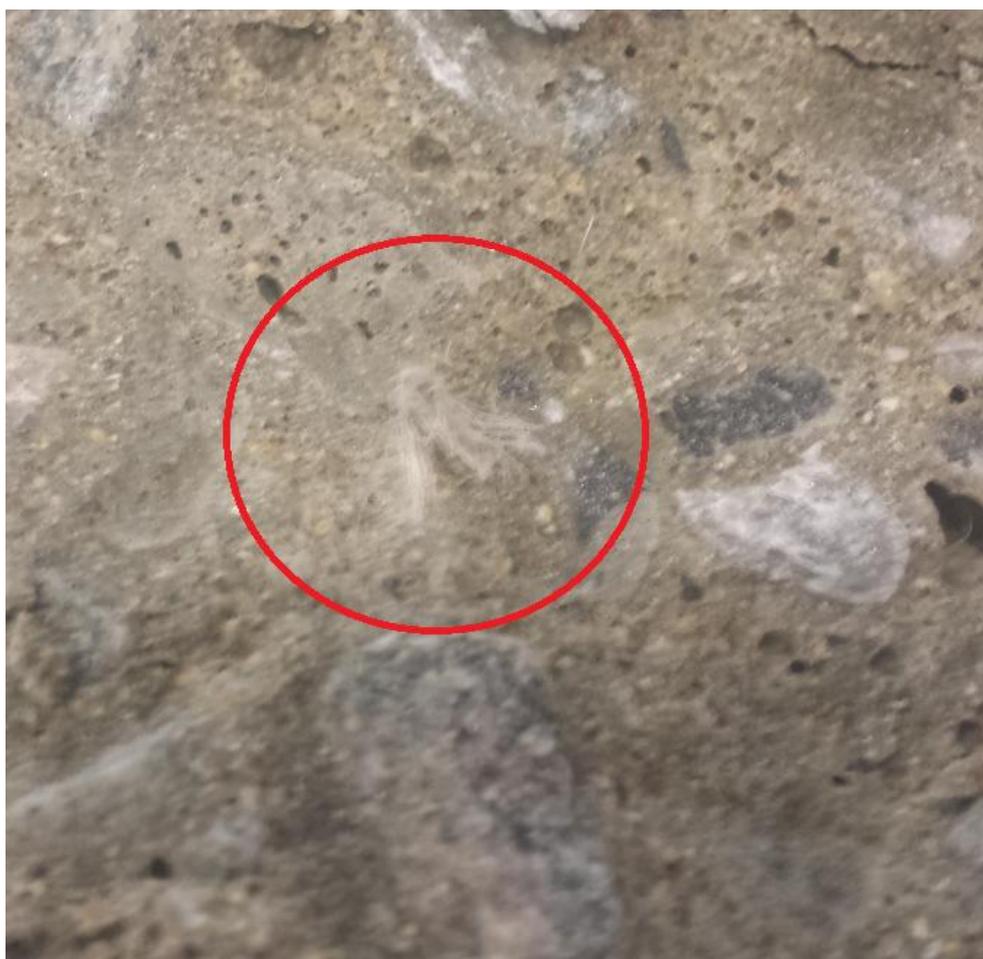


Figura 5.6 – Nódulo de fibras encontrado no interior de um corpo de prova prismático.

Em todos os corpos de prova prismáticos para o ensaio de resistência à tração na flexão, com fibra de HMPE foram encontrados de 2 a 3 nódulos na seção transversal onde o corpo de prova se rompeu. Em alguns dos corpos de prova cilíndricos para os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade estático, também foram encontrados nódulos de fibras.

A mesma inspeção foi realizada nos corpos de prova com fibras de polipropileno e não foi encontrado nenhum nódulo de fibras. A fibra de polipropileno de marca comercial, segundo o fabricante, recebe um aditivo. Esse aditivo pode ser o responsável pela melhor distribuição das fibras na matriz. Além disso, a fibra de HMPE possui um diâmetro médio 42,9% menor que o da fibra de polipropileno, o que resulta em uma facilidade maior para embarçar em si mesma. Isso também foi observado no momento de separação e pesagem das fibras, sendo que aquelas de HMPE exigiram muito mais esforço para desfazer esses emaranhados, enquanto as fibras de polipropileno facilmente se soltavam.

5.4. Resistência à compressão

O resultados do dos ensaios de resistência a compressão estão exposto na figura 5.7. Para cada traço estudado, o gráfica apresenta o valor médio dos resultados e o intervalo numérico nos quais todos os resultados para cada traço estão inclusos. Para o concreto sem adição de fibras (concreto convencional), o valor médio encontrado para resistência à compressão foi de 25,1 MPa. O concreto com adição de fibras de polipropileno, PP, obteve uma média de 26,0 MPa e o concreto com fibras de HMPE, 23,3 MPa.

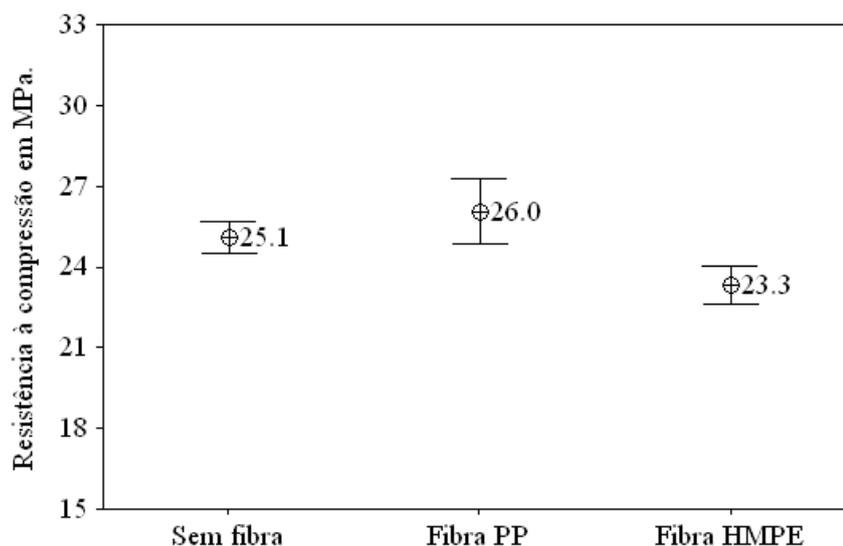


Figura 5.7 – Resistência à compressão em MPa, média e intervalo dos resultados

A partir dos resultados de cada corpo de prova foi realizada uma análise de variância, utilizando o programa Minitab, que está apresentada na figura 5.8.

One-way ANOVA: Sem fibra, Fibra PP, Fibra HMPE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	2	19.395	9.698	19.53	0.000
Error	12	5.958	0.496		
Total	14	25.353			

S = 0.7046 R-Sq = 76.50% R-Sq(adj) = 72.58%

Level	N	Mean	StDev
Sem fibra	5	25.088	0.480
Fibra PP	5	26.046	0.966
Fibra HMPE	5	23.302	0.570

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Pooled StDev = 0.705

Figura 5.8 – Análise de variância para os resultados de resistência à compressão.

Nota-se que o coeficiente P possui valor igual 0, o que significa que para esses resultados podemos descartar a hipótese nula. Nesse caso, as médias encontradas são de fato diferentes, ou seja, a variação encontrada entre as médias de cada grupo de amostra não é apenas uma casualidade devido a distribuição normal dos resultados, e sim influência da adição de fibras. Na representação gráfica gerada pelo programa, também exposta na figura 5.8, nota-se que as médias encontradas para a resistência mecânica do concreto com fibras de PP e do concreto com fibras de HMPE de fato não estão contidas no intervalo de variação da média do concreto sem fibras.

Em relação a resistência à compressão do concreto sem fibras, o concreto com fibras de PP apresentou uma melhoria de 3,6%, devido as tensões que as fibras passaram a absorver permitindo que o material suporte cargas maiores. Apesar disso, essa melhoria é muito pequena, e não representa ganho significativo para a propriedade.

O concreto com adição de fibras de HMPE apresentou uma redução na resistência à compressão de 7,2% em relação ao concreto sem fibras. Essa redução é explicada pela presença de nódulos de fibras formados durante a mistura desse material e que foram encontrados durante a inspeção visual. Esse nódulo criam zonas de concentração de tensões que fazem com que o material suporte menos carga.

Para entender melhor como os resultados variaram dentro de cada grupo de amostra, foi calculada a variância, desvio padrão e coeficiente de variação, internos do grupo. Estes dados estão expostos na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Resultados da análise estatística para resistência à compressão.

Concreto	Média (MPa)	Variância	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
Sem fibra	25,10	0,22	0,48	1,91
Fibra PP	26,00	0,43	0,97	3,73
Fibra HMPE	23,30	0,23	0,57	2,44

Para o concreto sem adição de fibras foi encontrado uma variância de 0,22 e coeficiente de variação de 1,9 %. O concreto com adição de fibras de PP apresentou variância de 0,43 e coeficiente de variação de 3,7 %. No concreto reforçado com fibras de HMPE, o valor obtido para a variância foi de 0,23 e coeficiente de variação de 2,44%. Esses valores são muito pequenos, mostrando que de fato houve pouca variação interna nos grupos de amostras.

5.5. Módulo de elasticidade

A figura 5.9 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de módulo de elasticidade estático para o concreto de referência, com adição de fibra de polipropileno e com adição de fibra de HMPE. Estão presentes nesse gráfico o valor médio dos resultados de cada corpo de prova e o intervalo em que os resultados ocorreram.

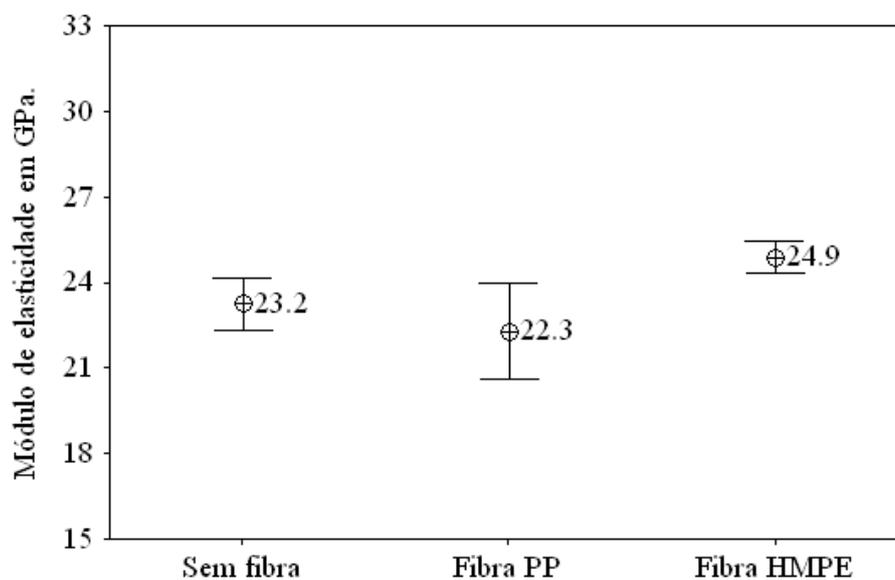


Figura 5.9 – Módulo de elasticidade em GPa, média e intervalo dos resultados.

O concreto sem adição de fibras obteve-se o valor de 23,2 GPa para o módulo de elasticidade. O módulo de elasticidade do concreto com fibras de PP e do concreto com fibras de HMPE foi de 22,3 GPa e 24,9 GPa respectivamente.

Os resultados obtidos para módulo de elasticidade foram submetidos a análise estatística com o auxílio do programa Minitab. O resultado desta análise está apresentado na figura 5.10.

One-way ANOVA: Sem fibra, Fibra PP, Fibra HMPE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	2	17.285	8.643	10.12	0.003
Error	12	10.248	0.854		
Total	14	27.533			

S = 0.9241 R-Sq = 62.78% R-Sq(adj) = 56.58%

Level	N	Mean	StDev	Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev
Sem fibra	5	23.240	0.750	(-----*-----)
Fibra PP	5	22.280	1.344	(-----*-----)
Fibra HMPE	5	24.880	0.438	(-----*-----)

21.6 22.8 24.0 25.2

Pooled StDev = 0.924

Figura 5.10 – Análise de variância para os resultados de módulo de elasticidade.

O coeficiente P obtido na análise tem valor muito pequeno, de 0.003. Logo, em relação as médias obtidas para cada grupo de amostras, pode-se descartar a hipótese nula. Sendo assim, os valores encontrados médios encontrados para cada grupo de amostra são diferentes entre si, sendo a variação observada, entre o valor médio do de módulo de elasticidade concreto sem fibras e os valores médios dos concreto com fibras, é resultante da adição das fibras.

O concreto com fibras de PP apresentou um módulo de elasticidade de 22,3, o que significa uma redução de 3,9 % em relação ao módulo de elasticidade do concreto sem adição de fibras. Essa baixa variação não representa mudança significativa no comportamento do material devido a adição de fibras. Para o concreto com fibras de HMPE o valor obtido para o módulo de elasticidade foi de 24,8, representado um acréscimo de 6,9 % em relação ao módulo de elasticidade do concreto sem fibras. Novamente a influência das fibras foi muito pequena para o módulo de elasticidade do concreto.

A tabela 5.2 apresenta valores estatísticos referentes a variação interna de cada grupo de amostras analisados. O concreto sem fibras apresentou uma variância de 0,34 e coeficiente de variação de 3,2 %. O concreto com fibras de PP apresentou variância de 0,60 e coeficiente de variação de 6,0%. O concreto com fibras de HMPE apresentou uma variância de 0,2 e desvio padrão de 1,7%. Nota-se que esses valores são baixos, representando uma pequena baixa variação interna nos grupos de amostras.

Tabela 5.2 – Resultados da análise estatística para módulo de elasticidade estático.

Concreto	Média (GPa)	Variância	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)
Sem fibra	23,2	0,34	0,75	3,23
Fibra PP	22,3	0,60	1,34	6,00
Fibra HMPE	24,9	0,20	0,44	1,76

5.6. Resistência à tração na flexão e tenacidade

Os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão estão apresentados na figura 5.11, estando presentes no gráfico a média dos resultados e o intervalo em que esses resultados se encontram para cada tipo de concreto estudado. A análise estatística feita a partir dos resultados de cada corpo de prova está apresentada na tabela 5.3.

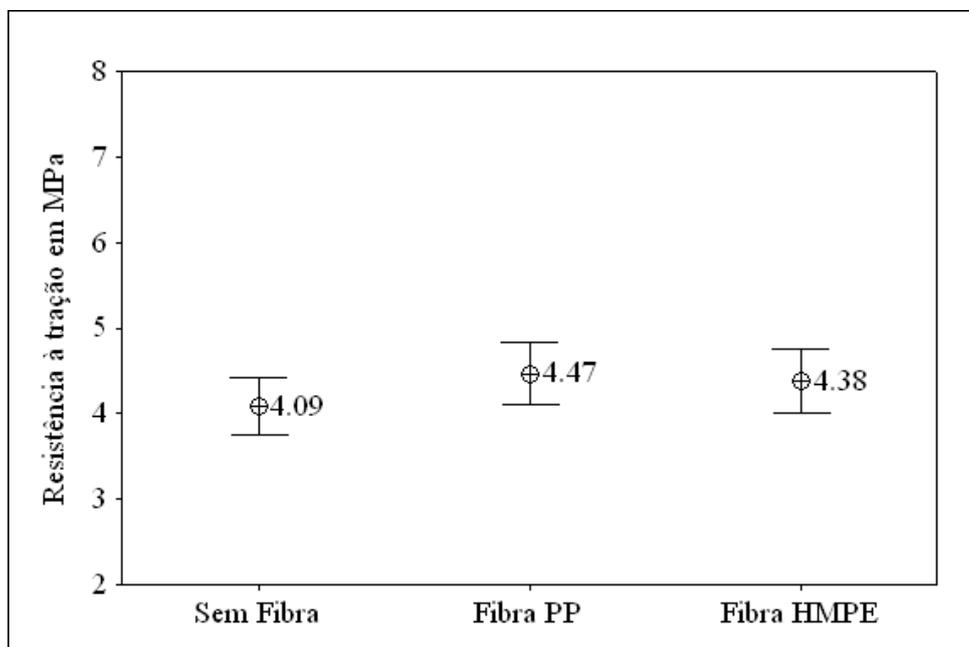


Figura 5.11 – Resistência à tração na flexão em MPa, média e intervalo dos resultados.

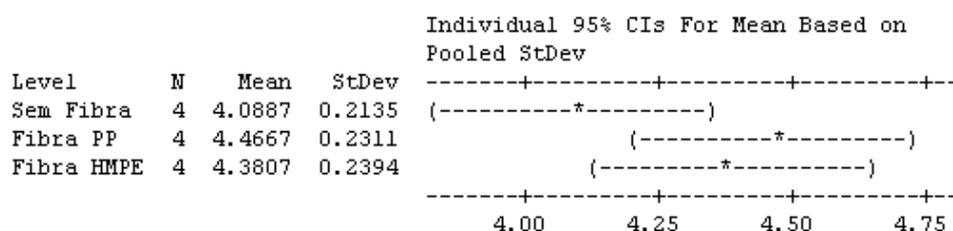
Para o concreto sem adição de fibras o valor encontrado para resistência à tração foi de 4.09 MPa. Para o concreto com adição de fibras de PP e para o concreto com adição de fibras de HMPE o valor encontrado para a resistência à tração foi de 4,47 MPa e 4,38 MPa respectivamente.

A análise de variância realizada com os resultados obtidos nos ensaio de resistência à tração está apresentada na figura 5.12

One-way ANOVA: Sem Fibra, Fibra PP, Fibra HMPE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	2	0.3141	0.1570	3.01	0.100
Error	9	0.4689	0.0521		
Total	11	0.7830			

S = 0.2283 R-Sq = 40.11% R-Sq(adj) = 26.80%



Pooled StDev = 0.2283

Figura 5.12 – Análise de variância para os resultados de resistência à tração na flexão.

Nota-se que o valor de P encontrado é igual a 0,1. Isso significa que a hipótese nula deve ser tomada como verdade, e portanto, as médias são estatisticamente iguais. Porém ao analisar a representação gráfica dos intervalos de confiança, nota-se que as médias obtidas para o concreto com fibras de PP e para o concreto com fibras de HMPE estão próximas, e uma está contida no intervalo da outra. Já a média do concreto sem fibras, não está contida no intervalo de confiança dos concretos com fibras. Dessa forma, pode-se afirmar que as médias dos concretos com fibras são estatisticamente iguais entre si e diferentes em relação à média do concreto sem fibras.

Em relação ao concreto sem adição de fibras, o concreto com adição de fibras de PP e o concreto com adição de fibras de HMPE apresentaram valores médios para a resistência à tração de 9,3 % e 7,1 % respectivamente. Essa melhoria observado no comportamento mecânico do concreto com adição de fibras quando submetido a esforço de tração na flexão se deve ao fato das fibras absorverem parte da energia aplicada sobre o material e

interceptarem a abertura de fissuras, permitindo que o material resista a uma carga maior.

Na tabela 5.3 estão apresentados alguns dados estatísticos a respeito da variação interna do grupo de amostras. Todos os concretos analisados apresentaram valores semelhantes, aproximadamente 0,12 para a variância e aproximadamente 5,2 % de coeficiente de variação. Nesse caso, a variação interna dos resultados de todos os grupos de amostras para esse ensaio foi pequena.

Tabela 5.3 – Resultados da análise estatística para resistência à tração na flexão.

Concreto	Média (MPa)	Variância	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)
Sem fibra	4,09	0,11	0,21	5,13
Fibra PP	4,47	0,12	0,23	5,51
Fibra HMPE	4,38	0,12	0,24	5,47

A baixo estão apresentadas as curvas de todos os corpos de provas ensaiados para resistência à tração na flexão. Para facilitar a comparação entre os diferentes traços de concreto estudados nesse trabalho, as curvas foram combinadas para que cada gráfico possuísse uma curva do concreto sem adição de fibras, uma curva do concreto com adição das fibras de polipropileno e uma curva do concreto com adição de fibras de HMPE. A

figura 5.13 contém os resultados dos corpos de provas de todos os corpos de provas agrupados em 4 conjuntos.

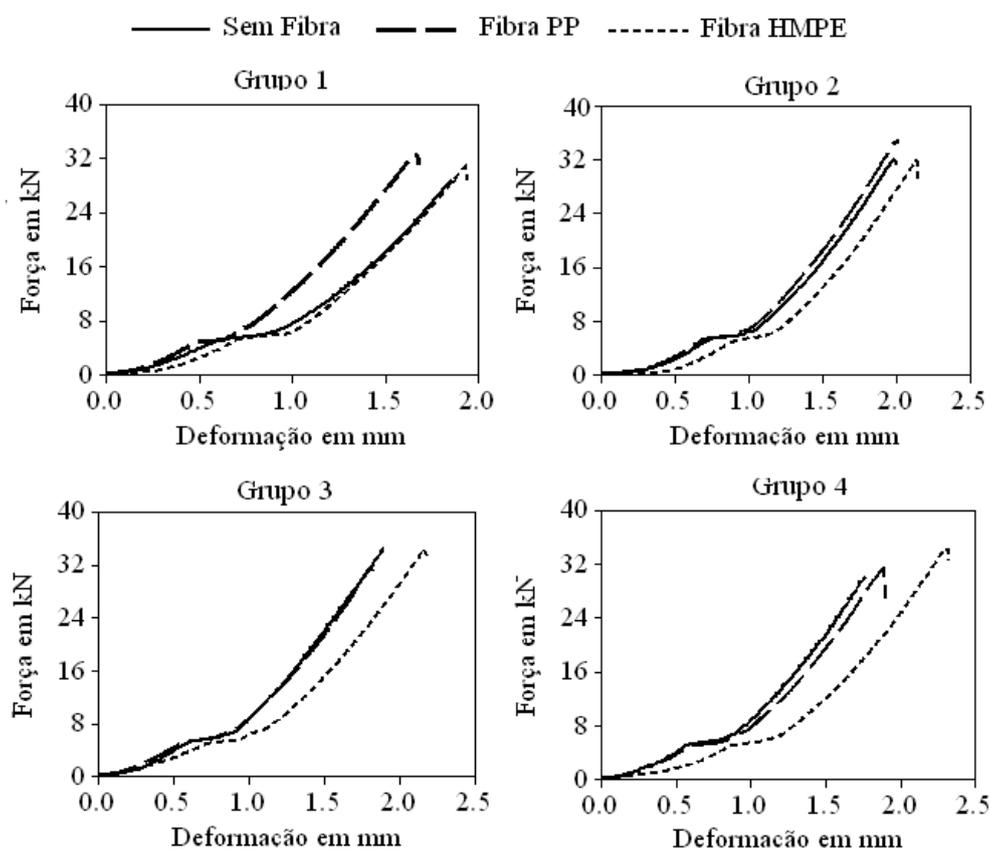


Figura 5.13 – Curvas Força x Deformação dos ensaios de tração na flexão

As curvas de todos os corpos de provas possuem formatos semelhantes. Nota-se que as curvas dos corpos de provas dos grupos 2, 3 e 4 apresentam uma tendência onde apesar da resistência à tração não sofrer alteração significativa de um traço para outro, o concreto com adição de fibra de HMPE apresentou nesses 3 casos uma maior deformação antes da ruptura, enquanto o concreto com adição de fibras de polipropileno e o concreto sem adição de fibras se comportaram de maneira muito semelhante, rompendo com praticamente a mesma quantidade de deformação nos 3 casos. O gráfico

referente aos corpos de provas do grupo 1 não seguiu essa tendência, sendo que o concreto sem adição de fibras se comportou de maneira semelhante ao concreto com adição de fibra de HMPE.

A tenacidade de cada corpo de prova foi calculada em cima dos resultados obtidos no ensaio de resistência à tração na flexão. Os valores médios encontrados para a tenacidade estão ilustrados na figura 5.14. O concreto sem adição de fibras apresentou tenacidade de 19,15 kNmm, a tenacidade observada para o concreto com adição de fibras de PP foi de 22,3 kNmm e para o concreto com adição de fibras de HMPE foi observada uma tenacidade de 24,70 kNmm.

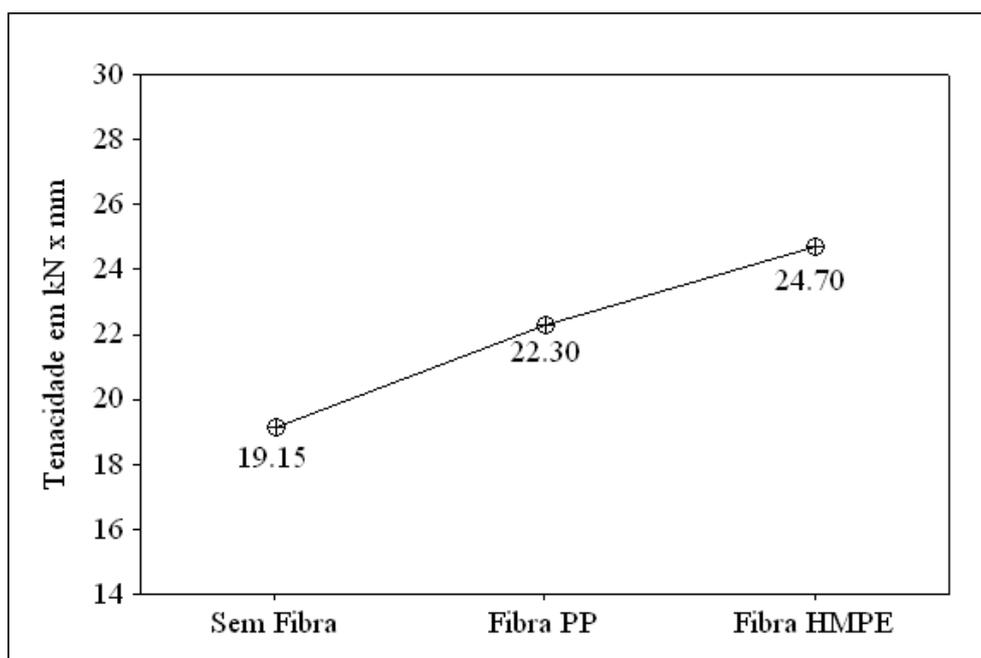


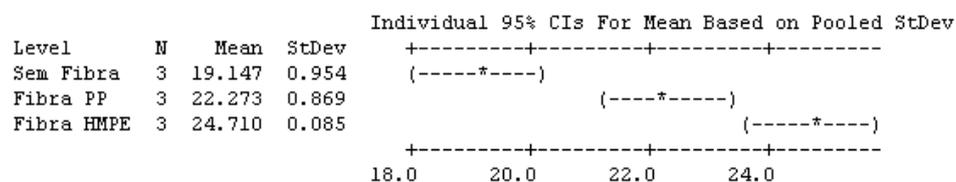
Figura 5.14 – Média dos resultados de tenacidade em kN x mm.

A análise estatística feita em cima dos valores de tenacidade encontrados para cada traço estudado está exposta na figura 5.15.

One-way ANOVA: Sem Fibra, Fibra PP, Fibra HMPE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	2	46.664	23.332	41.83	0.000
Error	6	3.346	0.558		
Total	8	50.010			

S = 0.7468 R-Sq = 93.31% R-Sq(adj) = 91.08%



Pooled StDev = 0.747

Figura 5.15 – Análise de variância para os resultados de tenacidade.

Na análise de variância fica claro que as médias são de fato diferentes, além de ser possível observar isso na representação gráfica das médias e seus intervalos, onde nenhuma média está contida no intervalo de outra média, o coeficiente P encontrado é igual a 0, significando que não existe possibilidade da hipótese nula ser tomada como verdadeira.

Os concretos com adição de fibras poliméricas apresentaram valores de tenacidade superiores ao valor encontrado para o concreto sem adição de fibras. Para o concreto com fibras de PP o valor encontrado foi 11% maior do que concreto sem fibras, e o concreto com fibras de HMPE apresentou uma tenacidade 29% maior do que o concreto sem fibras. Esse aumento de tenacidade já era esperado e acontece devido a energia que as fibras absorvem antes e depois da matriz de cimento fissurar, permitindo que o material sofra maiores deformações antes da ruptura.

Para analisar a variância interna dos grupos de amostras foram calculados alguns parâmetros estatísticos que estão apresentados na tabela 5.4. O concreto sem fibras apresentou uma variância de 0,55 e coeficiente de variação de 4,9%. O Concreto com fibras de PP apresentou uma variância

de 0,50 e coeficiente de variação de 3,9%. O concreto com fibras de HMPE apresentou uma variação de 0,08 e coeficiente de variação de 0,5 %. Em todos esses casos, a variação interna do grupos de amostra foi pequena.

Tabela 5.4 – Resultados da análise estatística para tenacidade.

Concreto	Média (kN x mm)	Variância	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)
Sem fibra	19,14	0,55	0,95	4,9
Fibra PP	22,27	0,50	0,87	3,9
Fibra HMPE	24,72	0,08	0,12	0,5

5.7. Dilatação Térmica

A figura 5.15 exemplifica o comportamento observado em todos os ensaios realizado quando comparados todos os traços juntos.

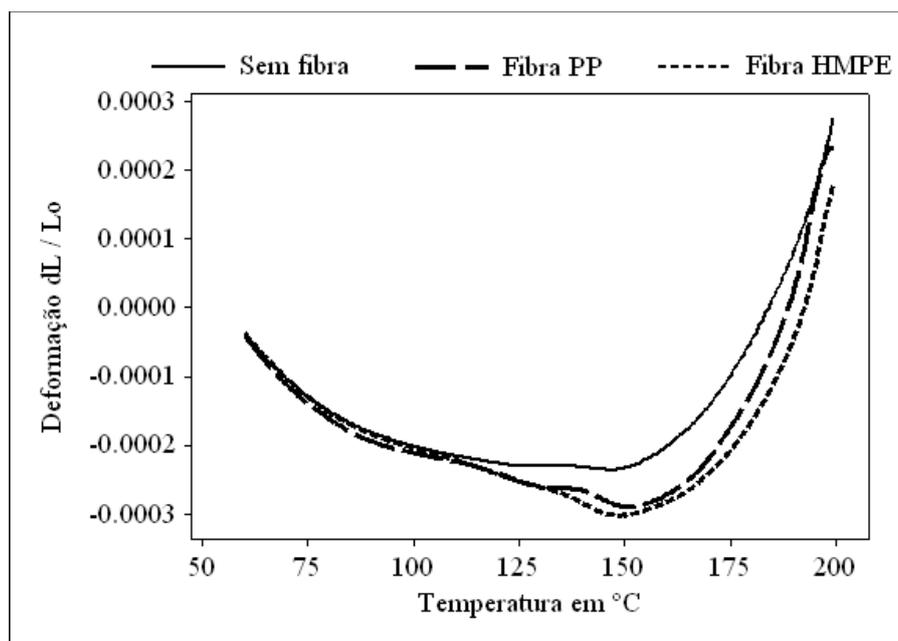


Figura 5.16 – Dilatação térmica do concreto de referência, concreto com fibra de polipropileno e concreto com fibra de HMPE.

A retração dos corpos de prova observada até a temperatura em torno de 150°C se dá devido a perda de água do concreto. O concreto de referência apresentou a maior deformação dos 3 traços quando comparados a uma mesma temperatura. A presença de fibras no concreto diminui a dilatação do material pois as fibras funcionam como reforço da matriz, absorvendo parte da energia da deformação.

A tabela 5.5 apresenta os coeficientes de dilatação linear térmico (α) para uma mesma temperatura de referência (140°C) encontrados para cada traço estudado.

Tabela 5.5 – Coeficientes de dilatação térmica.

Concreto	Coeficiente de dilatação térmica. (x 10 ⁻⁶ / K)
Sem fibra	17,67
Fibra PP	16,81
Fibra HMPE	15,90

Houve uma redução do coeficiente de dilatação térmica dos concretos com adição de fibras em relação ao concreto sem fibras. O concreto com adição de fibras de polipropileno mostrou uma redução em relação ao concreto sem adição de fibras de 4,87 %. Já o concreto com adição de fibras de HMPE apresentou uma redução, em relação ao concreto sem fibras, de 9,86%. As fibras diminuíram a dilatação que o concreto apresentou devido ao aumento da temperatura.

O concreto com adição de fibras de HMPE apresentou um coeficiente de dilatação linear térmica menor que o concreto com adição com fibras de polipropileno pois o HMPE é um material mais rígido que o polipropileno. O módulo de elasticidade médio do polipropileno é de 1,35 GPa enquanto o HMPE tem um módulo de elasticidade médio de 120,50 GPa.

5.8. Condutividade Térmica

Na figura 5.16 estão expostos os valores médio de coeficiente de condutividade térmica encontrados para cada traço estudado. Para o

concreto sem adição de fibras foi encontrado um valor médio de 0,44 W/m·K. Esse valor se encontra dentro da faixa normal de valores encontrados para concretos com densidade semelhante ao traço estudado nesse trabalho. O concreto com fibra de polipropileno apresentou uma redução no coeficiente de condutividade e o concreto com fibra de HMPE apresentou um aumento no valor do coeficiente.

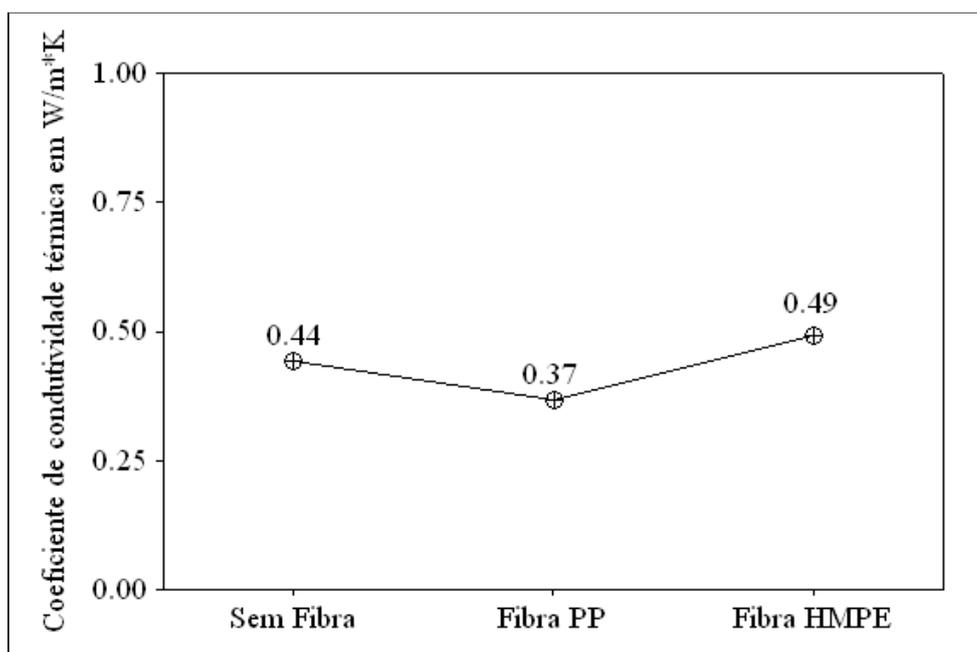


Figura 5.17 – Coeficiente de condutividade térmica do concreto de referência e dos concretos reforçados com fibras.

A tabela 5.6 apresenta os resultados da análise estatística para o coeficiente de condutividade térmica. O concreto sem fibras apresentou coeficiente de variação de 5,4%. O concreto com fibras de PP apresentou coeficiente de variação de 2,1% e o concreto com fibras de HMPE apresentou coeficiente de variação de 0,9%. Levando em consideração os coeficientes de variação de cada conjunto de resultados e o erro de leitura (5%) do próprio equipamento utilizado para realizar o ensaio, essas variações encontradas entre os traços estudados não apresenta valor significativo, sendo muito pequena para que se possa afirmar que a adição de fibras afetou significativamente o valor de coeficiente de condutividade térmica do concreto.

Tabela 5.6 – Resultados da análise estatística para o coeficiente condutividade térmica.

Concreto	Média (W/m*K)	Variância	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)
Sem fibra	0,44	$5,66 \times 10^{-4}$	$2,38 \times 10^{-2}$	5,41
Fibra PP	0,37	$5,77 \times 10^{-5}$	$7,64 \times 10^{-3}$	2,06
Fibra HMPE	0,49	$2,24 \times 10^{-5}$	$4,74 \times 10^{-3}$	0,96

5.9. Resistência à compressão do concreto pós exposição a temperatura de 200° C.

A figura 5.17 expõe os resultados médios encontrados para resistência à compressão após a exposição de 1 hora dos corpos de prova a temperatura de 200°C em uma estufa. Não foi notado mudança significativa na resistência à compressão do concreto de referência e no concreto com fibras de HMPE. O concreto com fibra de PP apresentou uma mudança um pouco maior, porém ainda assim essa variação não se tornou significativa.

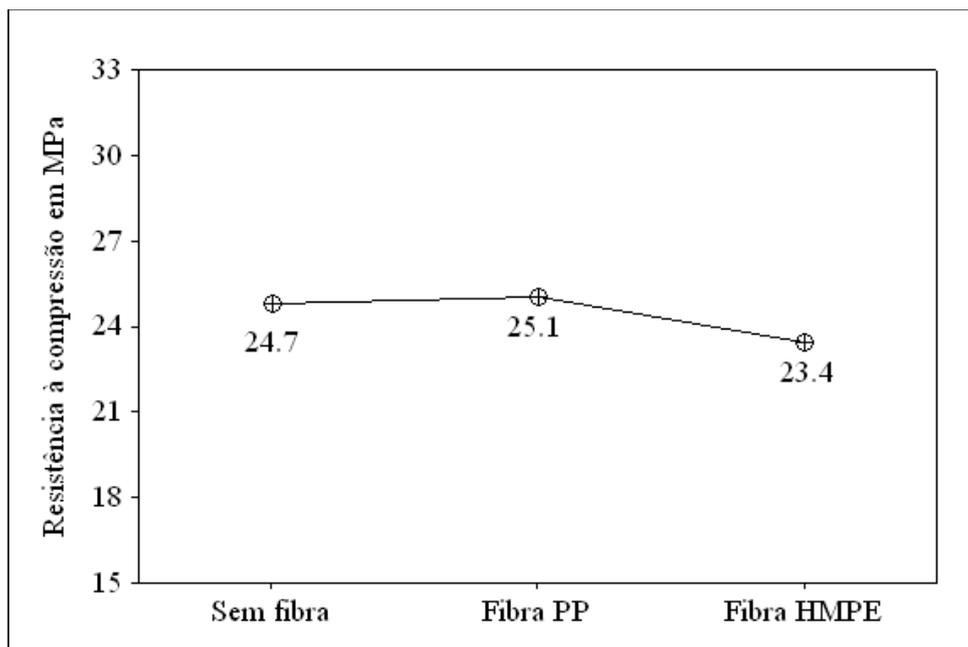


Figura 5.18 – Resistência à compressão do concreto pós exposição a temperatura de do concreto sem fibra e dos concreto com adição de fibras poliméricas.

A variação observada foi de 1,62% entre o valor médio obtido pelo concreto sem fibras e o concreto com fibras de polipropileno. Entre o concreto sem fibras e o concreto com fibras de HMPE, a variação foi de 5,26.

O fato do concreto com fibra de PP ter apresentado a maior variação na resistência a compressão quando exposto a temperatura de 200°C durante uma hora em comparação aos outros traços estudados, confirma a conclusão obtida no ensaio da TGA em que o polipropileno mostrou menor estabilidade térmica do que o HMPE.

6. Conclusões

A análise termogravimétrica (TGA) mostrou que as fibras de polipropileno sofrem de degradação acentuada na temperatura em torno de 250°C, enquanto nas fibras de HMPE o início da degradação só foi observado na temperatura de 360° C. Também foi observado que a fibra de polipropileno apresentou uma perda de massa mais acentuada que a fibra de HMPE na temperatura de degradação do polímero. A fibra de HMPE apresentou melhor estabilidade térmica do que a fibra de polipropileno

Na análise da superfície das fibras através da microscopia eletrônica de varredura (MEV), notou-se que as fibras de polipropileno possuem uma textura rugosa e sólida. As fibras de HMPE também apresentaram superfície rugosa, mas diferentemente da fibra de polipropileno, apresentaram um corpo formado por vários filamentos menores. Em relação a natureza da zona de interface entre a fibra e a matriz cimentícia, o MEV revelou que para os dois tipos de fibras estudados a zona de interface se mostrou sólida e a argamassa apresentou boa aderência no corpo da fibra.

Foram observados diversos emaranhados de fibras (nódulos) nos corpos de prova que receberam a adição de fibras de HMPE, enquanto nos corpos de prova com a fibra de polipropileno esses nódulos não aconteceram ou aconteceram em menor quantidade. A presença desses emaranhados afetaram de maneira negativa e significativa as propriedades mecânicas dos materiais estudados.

O concreto com adição de fibras de polipropileno apresentou uma resistência à compressão média 3,60% maior do que o concreto sem adição de fibras. O concreto com adição de fibras de HMPE apresentou uma redução no valor médio da resistência à compressão de 7,20% em relação ao valor médio obtido no concreto sem fibras. A redução observada no

concreto com fibras de HMPE em relação ao concreto sem fibras se deve a formação de emaranhados de fibras no momento da moldagem, criando descontinuidades, e portanto, zonas de concentração de tensões no corpo de prova, reduzindo o seu desempenho.

A média módulo de elasticidade do concreto com fibra de polipropileno foi 3,88% menor do que o concreto sem fibras, e o valor médio do módulo de elasticidade do concreto com fibra de HMPE foi 7,33% maior do que o concreto sem fibra. Isso significa que o concreto com fibra de polipropileno permitiu uma maior deformação no regime elástico em comparação ao concreto sem fibra, enquanto o concreto com fibra de HMPE deformou menos de forma elástica comparando com o concreto sem fibra.

A média da resistência à tração dos concretos que receberam adição de fibras poliméricas foi superior à média da resistência à tração encontrada para o concreto sem adição de fibras. A melhora foi de 9,30% para concreto o concreto que recebeu a fibra de polipropileno e 7,10% para o concreto que recebeu a fibra de HMPE. As fibras atuaram como reforço na matriz do material, absorvendo parte da deformação e melhorando o desempenho do concreto quando submetido a esforços de tração.

A tenacidade dos dois traços de concreto que receberam, a adição de fibras foi significativamente maior em relação à tenacidade do concreto de referência. O concreto com adição e fibras de polipropileno apresentou uma tenacidade média 11% maior em relação ao concreto sem fibras. O concreto com adição de fibras de HMPE apresentou um aumento na tenacidade em relação ao concreto sem fibras de 29%. A adição de fibras poliméricas no concreto contribuíram significativamente para o aumento da tenacidade.

A dilatação térmica do concreto com adição de fibras poliméricas foi menor do que a dilatação observada no concreto sem adição de fibras. Em relação a condutividade térmica, os resultados apontam que a adição de fibras em

quantidade igual a 1% do volume de concreto não afeta significativamente essa propriedade.

Os corpos de provas, de todos os traços estudados nesse trabalho, expostos a temperatura de 200°C durante 1 hora não apresentaram modificação no valor médio encontrado para a resistência à compressão.

A adição de fibras poliméricas apresentou pouca influência no comportamento térmico e mecânico do concreto convencional.

7. Relevância dos resultados

Os resultados deste trabalho demonstram a influência da adição de fibras poliméricas nas propriedades mecânicas e térmicas do concreto. Não foram encontrados, até o momento da publicação deste trabalho, outros estudos a respeito do uso de fibras de HMPE como adição ao concreto. As únicas propriedades onde foi observado influência positiva da adição de fibras poliméricas foram a tenacidade e a dilatação térmica. Nas demais propriedades estudadas neste trabalho a adição de fibras poliméricas não apresentou influência significativa.

8. Sugestões para trabalhos futuros

Os seguintes temas são propostos pelo presente trabalho como sugestões de trabalhos futuros:

- Avaliação da influência de fibras de HMPE no comportamento mecânico do concreto com aditivos plastificantes.

- Influência das fibras de HMPE no comportamento do concreto em situação de incêndio.

- Investigação a respeito do volume crítico e comprimento crítico de fibras de HMPE como adição ao concreto.

9. Referências Bibliográficas

ANDERSON, D., R.; SWEENEY, D., J.; WILLIAMS, T., A. **Estatística aplicada à administração e economia**. 2ª edição. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

ASLANI, F.; SAMALI. **High strength polypropylene fibre reinforcement concrete at high temperature**. Springer Science and Business Media New York, United States, 2014

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estrutura de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733:Cimento Portland de alta resistência inicial**. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:Concreto -Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522– Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.** Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142: Determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

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

BARCELLOS, E. **Braskem bate recorde de produção de polipropileno.** Revista Exame, São Paulo, 19 de abril de 2012. Disponível em: <http://exame.abril.com.br/negocios/noticias/braskem-bate-recorde-de-producao-de-polipropileno-2> Acesso em 05 de agosto de 2015

BERNARDI, S., T. **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibra de aramida kevlar.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

BEZERRA, A., C., S. **Concreto com fibras curtas de aço submetido à altas temperaturas.** Tese de doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, 2012

BRUICE, P., Y. **Organic Chemistry.**6^a ed. United States of America: Prentice Hall, 2010.

BUCKNER, C., D. **Concrete Design:** for the civil PE and structural SE exams. 2ª edição. Belmont, California: Professional Publications, 2014

CAETANO, L., F.; GRAEFF, A., G.; GARCEZ, E., O.; BERNARDI, S., T.; SILVA FILHO, L., C., P. **Compósito de Matriz Cimentícia Reforçada com Fibras.** Porto Alegre, 2004.

CALLISTER, W., D. **Materials science and engineering:** an introduction. 8ª edição, United States of America: John Wiley & Sons, Inc, 2010.

CEPED, Centro de pesquisa e Desenvolvimento. **Utilização de fibras vetais no fibrocimento e no concreto-fibra.** Rio de Janeiro, BNH/DEPEA , 1982.

DAVIES, P.; REAUD, Y.; DUSSUD, L.; WOERTHER, P. **Mechanical behavior of HMPE and aramid fibre ropes for deep sea handling operations.** Ocean Engineering. Elsevier, 2011.

EBEWELE, R., O. **Polymer Science and Technology.** Nigéria: CRC press LLC, 1996

FIGUEIREDO, A., D. **Concreto com fibras de aço.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2000.

GRDIC, Z., J.; CURCIC, G., A., T.; RISTIC, N., S.; DESPOTOVIC, I., M. **Abrasion resistance of concrete micro-reinforced with polypropylene fibers.** Construction and Building Materials. Servia, 2011.

GUPTA, R., S. **Principals of structural design: wood, steel and concrete.** 2ª Edição. Boca Raton: CRC Press, 2014.

HASSOUN, M., N.; AL-MANASEER, A. **Structural concrete: theory and design.** 6ª edição. New Jersey: John Wiley & Sons. 2015

LIMA, R., C., A. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas.** Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, 2005.

LOPES, F., F., M. **Estudo dos efeitos da acetilação em fibras de sisal.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.14, n.7, p.783 – 788. Campina Grande, 2010

MACHADO, A., C.; SILVA, A., A.; FILHO, R., D., T; PFEIL, M., S.; LIMA, I; LOPES, R.; T. **3D investigation of steel fiber distribution in reinforced concrete by x-ray microtomography.** Revista Ibracon de estruturas e materiais, volume 8, São Paulo, 2015

MANO, E., B.; MENDES L., C. **Introdução a polímeros.** 2ª edição, São Paulo: Edgard Blucher, 1999.

MARTIN, A., R. **Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade Agave sisalana.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, São Carlos, 2009.

MARTINS, G., S.; IOZZI, M., A.; MARTINS, M., A.; MATTOSO, L., H., C.; FERREIRA, F., C. **Caracterização mecânica e térmica de compósitos**

de poli (cloreto de vinila) reforçados com fibras de sisal. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 14, n° 5, p. 326-333, 2004.

MEDINA, J. C. **O Sisal.** São Paulo: Secretaria da Agricultura, Diretoria de Publicidade Agrícola, 1954, p. 286.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, properties and materials.** 3ª Edição. 2006.

MINDNESS, S. **Fiber reinforced concrete: myth and reality** advances in cement and concrete – ASME, 1994

SALVADOR, R., P. **Análises comparativas de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concretos reforçados com fibras.** Dissertação de mestrado. São Paulo, 2013.

SALVADOR, R., P.; FIGUEIREDO, A., D. **Análise comparativa de comportamento mecânico de concreto reforçado com macrofibra polimérica e com fibra de aço.** Revista Matéria, São Paulo, 2013.

SALVADOR, R., P.; FERNANDES, J., F.; FIGUEIREDO, A., D. **Avaliação do concreto reforçado com baixos teores de fibras para fins estruturais segundo a norma.** Revista Matéria, São Paulo, 2015.

SACHT, H., M.; ROSSIGNOLO, J., A.; SANTOS, W., N. **Avaliação da condutividade térmica de concretos leves com argila expandida.** Revista Matéria, São Paulo 2010.

SOUNTHARARAJAN, V., M.; JAIN, A.; SINGH, A.,K.; SIVAKUMAR, A. **Evaluation of composite polypropylene fibre reinforced concrete.** International Journal of Engineering and Technology. Tami Nadu, India. 2013

STISON, S. **Discovers of polypropylene share prize.** Chemical and Engineering News. American Chemical Society. Volume 65, nº10. New York, 1987.

SUN, Z.; XU, Q. **Microscopic, physical and mechanical analaysis of polypropulene fiber reinforced concrete.** Materials Science and Engineering A – Elsevier, 2009

TASSEW, S., T.; LUBELL, A., S. **Mechanical properties of glass fiber reinforced ceramic concrete.** Dept. of Civil & Environmental Engineering, University of Alberta, Edmonton. Construction and Building Materials: Elsevier, 2013.

VENTURA, O., S., P.; PASSOS, O., S.; LOBO, J., B., A.; FUJIYAMA, R., T. **Caracterização Mecânica em Flexão de Compósito de Argamassa de Cimento reforçada com Fibras Naturais.** Foz do Iguaçu, 2006