

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS - PPGCEM
MESTRADO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

RENATA POSSAMAI RIBEIRO

**PASTA DE CIMENTO PORTLAND REFORÇADA COM
FIBRA DE VIDRO: EFEITO DA ADIÇÃO SOBRE AS
PROPRIEDADES MECÂNICAS**

Dissertação de Mestrado apresentada
ao Programa de Pós-Graduação em
Ciência e Engenharia de Materiais –
PPGCEM da Universidade do Extremo
Sul Catarinense – UNESC, como
requisito à obtenção do título de Mestre
em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Michael
Bernardin

**CRICIÚMA
2019**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

R484p Ribeiro, Renata Possamai.

Pasta de cimento Portland reforçada com fibra de vidro : efeito da adição sobre as propriedades mecânicas / Renata Possamai Ribeiro. - 2019.

135 p. : il. ; 21 cm.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2019.

Orientação: Adriano Michael Bernardin.

1. Cimento Portland. 2. Fibra de vidro - axial. 4. Resistência à tração por compressão diametral. I. Título Desempenho mecânico. 3. Resistência à compressão.

CDD. 22. ed. 620.135

Bibliotecária Eliziane de Lucca Alosilla - CRB 14/1101
Biblioteca Central Prof. Eurico Back - UNESC

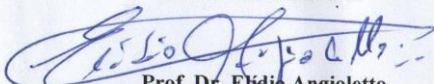
Renata Possamai Ribeiro

Pasta de cimento *Portland* reforçada com fibra de vidro: efeito da adição sobre as propriedades mecânicas.

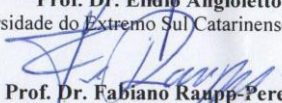
Esta dissertação foi julgada adequada à obtenção do grau de Mestre (a) em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (Área de concentração: Tecnologia de Materiais) da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

Criciúma, SC, 28 de fevereiro de 2019.

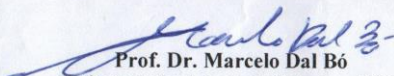
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Elídio Angioletto
Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC



Prof. Dr. Fabiano Raupp-Pereira
Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC



Prof. Dr. Marcelo Dal Bó
Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Elizete Maria Possamai e Uilton Luiz Trevisol Ribeiro, por todo amor, por sempre me apoiarem, carinho e cuidado comigo.

Ao meu filho Pietro Ribeiro Scaburri, um amor incondicional.

Ao Prof. Dr. Adriano Michael Bernardin, grande sabedoria, dedicação e paciência no desenvolvimento dessa dissertação,

À UNESC pela estrutura disponibilizada.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais – PPGCEM/ UNESC, pelo conhecimento adquirido.

À CAPES, pelo apoio e oportunidade de desenvolver esta dissertação.

A todos que de alguma forma contribuíram, quero deixar meus sinceros agradecimentos. Muito Obrigada!

“Bom mesmo é ir à luta com determinação, abraçar a vida e viver com paixão, perder com classe e viver com ousadia. Pois o triunfo pertence a quem se atreve e a vida é muito bela para ser insignificante.”

(Charles Chaplin)

RESUMO

O concreto tem uma série de características que lhe garantem o posto de material de construção mais utilizado no mundo. Uma das grandes vantagens do concreto é sua capacidade de absorver os esforços de compressão, com baixo custo, versatilidade e durabilidade. Entretanto, também apresenta algumas limitações, como baixa deformação antes de romper quando solicitado em tração, comportamento frágil, e uma reduzida resistência à tração quando comparada à resistência à compressão. Uma das formas de minimizar essas limitações é a adição de fibras no concreto. Desta forma, este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento mecânico de pastas cimentícias reforçadas com fibras de vidro. Foi utilizado um planejamento experimental do tipo fatorial 2^k , onde os fatores foram a adição de fibra de vidro (0,2 a 0,8 % em massa), o comprimento da fibra de vidro (0,3 a 1 cm) e a adição de cinza leve (0 a 10 % em massa), esta com objetivo de reduzir a alcalinidade da pasta cimentícia, evitando o ataque químico à fibra de vidro. Nove composições cimentícias foram formuladas, sendo ensaiadas quanto a sua resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, densidade aparente e microestrutura. Os resultados mostram que, para a resistência à compressão axial, aos 30 dias a cinza leve reduz o f_c , enquanto as fibras mais curtas o aumentam. Aos 60 dias a adição de cinza leve altera significativamente a resistência à compressão axial das composições, mostrando que a cinza leve provavelmente altera a alcalinidade da matriz cimentícia, evitando o ataque às fibras. A densidade aparente é reduzida com a adição da cinza leve e das fibras. E as fibras de vidro evitam a propagação das trincas na matriz, com típico efeito de ponte.

Palavras-chave: Cimento Portland CP V; fibra de vidro tipo E; resistência à compressão axial; resistência à tração por compressão diametral; compósitos cimentícios.

ABSTRACT

Concrete is the most used construction material in the world. One of the great advantages of concrete is its ability to undergo compression loads with low cost, versatility and durability. However, it also presents some limitations, such as low deformation before breaking when requested in traction, brittle behavior, and reduced tensile strength when compared to compressive strength. One way to minimize these limitations is to add fiber to the concrete. In this way, this work aims to evaluate the mechanical behavior of cementitious pastes reinforced with glass fibers. A 2^k factorial design was used, where the factors were the addition of glass fiber (0.2 to 0.8 %), glass fiber length (0.3 to 1 cm) and addition of fly ash (0 to 10 %), the later aimed at reducing the alkalinity of the cement paste, avoiding the chemical attack on the glass fiber. Nine cementitious compositions were formulated, being tested for their axial compressive strength, tensile strength by diametral compression, bulk density and microstructures. The results show that, for axial compressive strength at 30 days age, the fly ash reduces the f_c , while the shorter fibers increase it. At 60 days age the addition of fly ash significantly alters the axial compressive strength of the compositions, showing that the fly ash probably changes the alkalinity of the cementitious matrix, avoiding the chemical attack on the glass fibers. The bulk density is reduced with the addition of fly ash and glass fibers. And the glass fibers prevent the propagation of cracks in the matrix, with a typical bridge effect.

Keywords: Portland cement CP V; E glass fiber; axial compressive strength; tensile strength by diametral compression; cement composites.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Venda de cimento Portland entre os anos de 2009 a 2017. ...	25
Figura 2- Venda de cimento Portland no primeiro semestre de 2016 em relação a 2017.....	26
Figura 3- Venda acumulada de cimento Portland em 12 meses. Mercado Interno	33
Figura 4- Reações de fase em sistema de forno com pré-aquecedor e pré-calcinador.	36
Figura 5- Fluxograma de fabricação do cimento Portland	38
Figura 6- Reforços fibrosos a) tecido unidirecional; (b) tecido bidirecional c) fibras picadas e (d) manta contínua	48
Figura 7- Micrografia do concreto na região da interface entre pasta e agregado, que forma a zona de transição; ampliação de 110 × em MEV.	49
Figura 8- Esquema da distribuição de tensões para concreto sem reforço de fibras.	51
Figura 9- Esquema da distribuição de tensões para concreto com reforço de fibras.	51
Figura 10- Classificação dos tipos de fibras	54
Figura 11- Classificação geométrica das fibras de aço.....	55
Figura 12- Esquema de fabricação de fibra de vidro.	59
Figura 13: Procedimento experimental.	72
Figura 14- Estratégia para redução da alcalinidade da pasta de cimento Portland.	75
.....	75
Figura 15- Ensaio de compressão axial: (a) amostra antes da compressão axial; e (b) depois da compressão axial.	80
Figura 16- Ensaio de compressão diametral: (a) amostra antes da compressão diametral; e (b) depois da compressão diametral.....	81
Figura 17- Gráfico de Pareto para a resistência à compressão axial aos 30 dias de cura.....	86
Figura 18- Superfície de resposta para a resistência à compressão axial aos 30 dias de cura, em função do comprimento da fibra de vidro e do % de cinza leve adicionada	87
Figura 19- Gráfico de Pareto para a resistência à compressão axial aos 60 dias de cura.....	90

Figura 20-. Gráfico de médias para a resistência à compressão axial aos 60 dias de cura, em função do % de cinza leve adicionada.....	91
Figura 21- Gráfico de Pareto para a resistência à tração por compressão diametral aos 60 dias de cura	95
Figura 22- Superfície de resposta para a resistência à tração por compressão diametral aos 60 dias de cura, em função do % de cinza leve e do % de fibra de vidro adicionadas	96
Figura 23- Superfície de resposta para a resistência à tração por compressão diametral aos 60 dias de cura, em função do % de cinza leve e do comprimento da fibra de vidro adicionada	97
Figura 24- Superfície de resposta para a resistência à tração por compressão diametral aos 60 dias de cura, em função do % de fibra de vidro e do comprimento da fibra de vidro.....	98
Figura 25- Gráfico de Pareto para a resistência à compressão diametral aos 120 dias de cura	102
Figura 26- Superfície de resposta para a resistência à tração por compressão diametral aos 120 dias de cura, em função do % de cinza leve e do % de fibra de vidro	103
Figura 27- Gráfico de Pareto para a densidade aparente aos 60 dias de cura.....	107
Figura 28- Superfície de resposta para a densidade aparente aos 60 dias de cura, em função do % de cinza leve e do % de fibra de vidro adicionadas.....	107
Figura 29- Superfície de resposta para a densidade aparente aos 60 dias de cura, em função do % de cinza leve e do comprimento da fibra de vidro	109
Figura 30- MO das composições sem adição de cinza leve e com adição de 0,2 % de fibra de vidro, com comprimento de fibra de (a) 0,3 cm; e (b) 1 cm.....	110
Figura 31- MO das composições sem adição de cinza leve e com adição de 0,8 % de fibra de vidro, com comprimento de fibra de (a) 0,3 cm; e (b) 1 cm.....	110
Figura 32- MO das composições com adição de cinza leve e com adição de 0,2 % de fibra de vidro, com comprimento de fibra de (a) 0,3 cm; e (b) 1 cm.....	111
Figura 33- MO das composições com adição de cinza leve e com adição de 0,8 % de fibra de vidro, com comprimento de fibra de (a) 0,3 cm; e (b) 1 cm.....	112

Figura 34- MO das composições (a) do ponto central do experimento, com adição de 5 % de cinza leve e de 0,5 % de fibra de vidro, com comprimento de fibra de 0,65 cm; e (b) da pasta de referência, sem adições.....	113
Figura 35- MO das composições: (a) 3 (0 % de cinza leve, 0,8 % de fibra de vidro, 0,3 cm de fibra); e (b) 6 (10 % de cinza leve, 0,2 % de fibra de vidro, 1 cm de fibra), mostrando o efeito de ponte das fibras	113
Figura 36- Espectros de difração de raios X para as amostras 01, 09 e padrão, aos 120 dias de cura.....	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Produção de cimento no mundo, de 2013 a 2016.....	32
Tabela 2- Composição de clínquer convencional de cimento Portland. 39	
Tabela 3- Principais reações do processo de sinterização do clínquer. . 39	
Tabela 4- Tipos de cimento fabricados no Brasil.	40
Tabela 5: Tipos de fibras e suas propriedades mecânicas.	57
Tabela 6- Principais vantagens e características da fibra de vidro	60
Tabela 7-Diferenciação entre os vários tipos de fibras de vidro produzidas	61
Tabela 8- Composição média por tipo de vidro, onde, apresenta resistente a álcalis (RA), condutividade, resistência química (RQ), resistência mecânica (RM) e resistência térmica (RT).....	63
Tabela 9- Propriedades mecânicas comparativas entre diversos tipos de fibras sintéticas.	64
Tabela 10- Valores esperados para algumas propriedades do cimento Portland tipo CP V ARI.....	73
Tabela 11- Análise química do cimento Portland tipo CP V ARI.....	73
Tabela 12- Análise química da cinza leve.	74
Tabela 13- Composição fibra de vidro tipo E.....	75
A Tabela 14 apresenta o planejamento experimental fatorial 2^k do sistema compósito, mostrando os fatores estudados e seus níveis.	77
Tabela 14- Planejamento experimental fatorial 2^k para o sistema compósito de pasta cimentícia reforçada com fibras, com adição de cinza leve (% em massa).....	77
Tabela 15- Ensaio realizados para caracterização das pastas cimentícias	78
Tabela 16: Resistência à compressão axial (f_c , MPa) aos 30 dias de cura, onde CL: cinza leve, FV: fibra de vidro, CF: comprimento da fibra, desvio padrão d.p	84
Tabela 17-. ANOVA para a resistência à compressão axial aos 30 dias de cura ($R^2 = 0,832$).	85
Tabela 18- ANOVA para a resistência à compressão axial aos 30 dias de cura, com exclusão de alguns fatores ($R^2 = 0,841$).	85
Tabela 19- Resistência à compressão axial (f_c , MPa) aos 60 dias de cura, onde CL: cinza leve, FV: fibra de vidro, CF: comprimento da fibra.....	87

Tabela 20- ANOVA para a resistência à compressão axial aos 60 dias de cura ($R^2 = 0,726$)	88
Tabela 21- ANOVA para a resistência à compressão axial aos 60 dias de cura, sem as interações ($R^2 = 0,642$)	89
Tabela 22: Resistência à compressão diametral (fd, MPa) aos 60 dias de cura, onde CL: cinza leve, FV: fibra de vidro, CF: comprimento da fibra	93
Tabela 23-. ANOVA para a resistência à tração por compressão diametral aos 60 dias de cura ($R^2 = 0,999$).....	93
Tabela 25- Resistência à compressão diametral (fd, MPa) aos 120 dias de cura, onde CL: cinza leve, FV: fibra de vidro, CF: comprimento da fibra	99
Tabela 26- ANOVA para a resistência à tração por compressão diametral aos 120 dias de cura ($R^2 = 0,867$).....	100
Tabela 27- ANOVA para a resistência à compressão diametral aos 120 dias de cura, sem alguns fatores ($R^2 = 0,861$)	101
Tabela 24- Densidade aparente (dAP, g/cm ³) aos 60 dias de cura, onde CL: cinza leve, FV: fibra de vidro, CF: comprimento da fibra	104
Tabela 25- ANOVA para a densidade aparente aos 60 dias de cura ($R^2 = 0,85$)	106
Tabela 26- ANOVA para a densidade aparente aos 60 dias de cura, sem os fatores principais ($R^2 = 0,642$).....	106

ABREVIATURAS E SIGLAS

CF: Comprimento da fibra;

CL: Cinza leve;

CRF: Concreto Reforçado por Fibras;

d: Diâmetro do corpo de prova [mm];

F: Força máxima obtida no ensaio [N];

f_c : Resistência à compressão [MPa];

$f_{ct,sp}$: Resistência à tração por compressão diametral [MPa];

FV: Fibra de vidro;

l: Comprimento do corpo de prova [mm];

MEV: Microscopia Eletrônica de Varredura;

SNIC: Sindicato Nacional da Indústria do Cimento;

d.p: Desvio padrão

dap: Densidade aparente.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	25
2 OBJETIVOS.....	31
2.1 OBJETIVO GERAL	31
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	31
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	32
3.1 CIMENTO	32
3.1.1 Conceito de Cimento	32
3.1.2 Cimento Portland.....	35
3.1.3 Composição química do Cimento	38
3.1.4 Tipos de Cimento	40
3.1.5 Concreto e Argamassa	41
3.1.6 Adições de minerais na matriz cimentícia.....	42
3.2 FIBRAS.....	46
3.2.1 Conceito de Fibras	46
3.2.2 Concreto com Fibras.....	48
3.2.3 Tipos de Fibras	53
3.2.3.1 Fibra de Vidro	58
3.2.3.1.1 <i>Tipos de Fibras de Vidro.....</i>	<i>61</i>
3.2.3.1.2 <i>Propriedades Mecânicas da Fibra de Vidro.....</i>	<i>63</i>
3.2.4 Efeito da alcalinidade da matriz de cimento Portland sobre a durabilidade das fibras de vidro tipo E.....	65
3.3 Planejamento Fatorial Estatístico	66
4. PROCEDIMENTO DO TRABALHO	72
4.1. Seleção das Matérias-primas	73
4.1.1 Cimento Portland do tipo CP V ARI.....	73
4.1.2 Cinza leve de termelétrica	74
4.1.3 Fibra de vidro tipo E.....	74
4.1.2 Preparação da pasta de cimento Portland	76
4.1.2.1 Preparação da pasta e moldagem dos corpos de prova.....	76
4.1.2.2. Compósitos de pasta de cimento Portland com adição de fibras de vidro e cinza leve.....	77
4.2 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO.....	78
ABNT NBR 7222 (2011)- Concreto e argamassa-Determinação da Resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos.....	79
4.2.1. Densidade aparente.....	79

4.2.2. Determinação da resistência à compressão axial.....	79
4.2.3. Determinação da resistência à tração por compressão diametral	81
4.2.4. Análise microestrutural	82
4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS	82
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	83
5.1 Resistência à compressão axial	83
5.2 Resistência à tração por compressão diametral	92
5.3. Densidade aparente.....	104
5.4. Análise microestrutural	109
6 CONCLUSÕES	116
7. REFERÊNCIAS	118

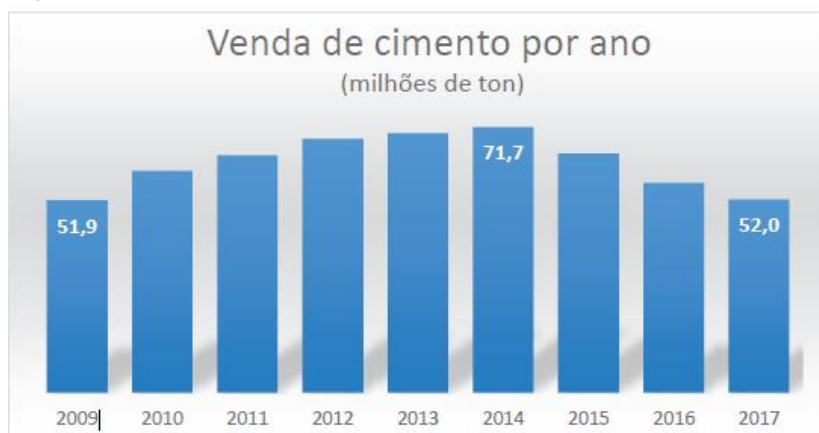
1 INTRODUÇÃO

O cimento é o material mais utilizado na construção civil, sendo o componente básico para produção de concreto. O tipo mais comum de cimento, o cimento Portland, foi primeiro produzido na Inglaterra em 1824 pela britânico Joseph Aspdin (ABCP, 2002).

O cimento Portland é um material obtido pela pulverização do clínquer, o qual é composto por silicatos de cálcio hidráulicos havendo, também, certa quantidade de sulfato e adições de algumas substâncias que modificam suas propriedades ou facilitam seu emprego (RODRIGUES, 2017).

Após a crise de 2014 a venda de cimento Portland caiu consideravelmente, sendo que nos anos de 2015 e 2016 houve uma queda mais acentuada, como mostra a Figura 1. Estes anos foram caracterizados pela instabilidade econômica do Brasil e pela falta de crédito ao consumidor. A Figura 2 mostra um comparativo do primeiro semestre dos anos de 2016 e 2017, realizado pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, SNIC.

Figura 1- Venda de cimento Portland entre os anos de 2009 a 2017.

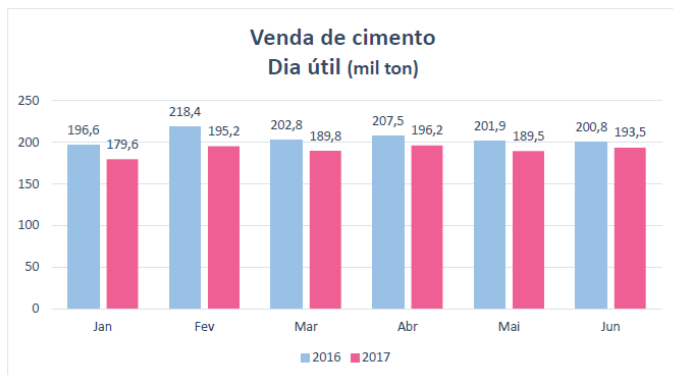


Fonte: SNIC, 2017.

Porém, a produção de cimento Portland continuou a aumentar em alguns países em desenvolvimento como China e Índia, com alta taxa de urbanização e aumento na atividade econômica. No Brasil, as vendas de cimento atingiram 52 milhões de toneladas em 2017, com uma queda de

6,4% em relação ao ano anterior, de acordo com o SNIC. Em janeiro de 2018 ocorreu uma queda de 0,1% em relação a janeiro de 2017.

Figura 2- Venda de cimento Portland no primeiro semestre de 2016 em relação a 2017.



Fonte: SNIC, 2017.

Segundo o desenvolvimento da indústria da construção civil há a evolução da produção de diferentes tipos de cimento, fato que amplia o campo de atuação deste material e proporciona misturas com maior desempenho na suas aplicações. Em função disso são criados novos materiais capazes de resistir e durar mais do que os concretos convencionais (TUTIKIAN et al., 2011).

Neste sentido, há possibilidade de avanço na aplicação do concreto reforçado com fibra, com objetivo de superar a natureza frágil do concreto convencional e de possibilitar novos usos como material de construção. No Brasil, o uso da fibra é economicamente viável quando seu consumo no concreto é baixo, como nos casos de pavimentação de concreto que vem sendo executado desde a década de 1990, e como reforço secundário, como concreto armado (CARNIO, 2017).

Hoje, as fibras são incorporadas a diversos tipos de materiais, como cimentícios, cerâmicos, plásticos, formando compósitos com propriedades otimizadas. Essas propriedades incluem: resistência à tração, resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à fissuração, controle de fissuração, resistência à abrasão e à fadiga, controle de retração e expansão térmica e resistência ao incêndio.

O concreto simples, sem nenhum tipo de armadura, apresenta uma série de limitações, como o comportamento frágil e uma baixa capacidade de deformação, antes de o material entrar em ruptura quando

for submetido a esforços de tração (FIGUEIREDO, 2011). Como consequência de sua fragilidade a sua resistência à tração é muito reduzida quando comparada à sua resistência à compressão (FIGUEIREDO, 2011).

Por outro lado, uma nova geração de materiais cimentícios reforçados com fibras tem como objetivo ampliar a capacidade de deformação do material e aumentar a sua capacidade de suporte de carga, principalmente quando submetida a esforços de tração, pois as fibras reduzem a propagação de fissuras. Logo, cimento com adição de fibras podem atuar nas microfissuras durante o endurecimento da pasta de cimento, controlando o surgimento das microfissuras e a macrofissura, e também atuam na pasta endurecida, funcionando como obstáculo ao desenvolvimento da abertura (FIGUEIREDO, 2011).

Há vários tipos de fibras, cada uma com sua aplicabilidade e suas características, podendo ser divididas segundo o seu material em metálicas, cerâmicas e poliméricas, estas sintéticas ou naturais.

As fibras metálicas têm grande aplicação na construção civil, tendo mercado consolidado devido às suas características mecânicas e sua morfologia (QUININO, 2015). As fibras de aço são as fibras metálicas mais utilizadas, e contemplam uma grande variedade de geometrias e diversos processos de produção das mesmas.

As fibras poliméricas são classificadas em naturais e sintéticas, sendo que, dentre as sintéticas, as mais utilizadas são as de polipropileno, poliéster, polietileno e poliamida. As fibras de polipropileno são produzidas a partir da resina de polipropileno do tipo homopolímero em vários tamanhos e formas, e com diferentes propriedades (LUCENA, 2017). As principais vantagens dessas fibras são relativo alto ponto de fusão (165 °C), resistência a álcalis e o baixo preço do material. Em contrapartida, suas desvantagens são baixa resistência com a matriz cimentícia (BENTUR et al., 2007).

As fibras de vidro, carbono e asbesto são fibras cerâmicas, sendo as últimas também conhecidas como fibras minerais. As fibras de vidro geralmente são produzidas na forma de ‘cachos’, fios compostos de centenas de filamentos individuais, apresentam propriedades satisfatórias para o emprego na construção civil, tais como: baixo coeficiente de dilatação térmica, resistência à tração e à vibração, retenção das propriedades mecânicas a altas temperaturas, grande alongamento na ruptura, facilidade de processamento, baixo custo em relação às outras fibras dúcteis, além de não serem passíveis de inalação, o que representa uma grande vantagem se comparadas ao amianto (PERUZZI, 2002).

As propriedades mecânicas dos materiais cimentícios e as suas características físicas e químicas vêm sendo pesquisadas por vários autores em todo o mundo. Outros trabalhos, realizados no Brasil, tiveram como objetivo o desenvolvimento do material compósito, principalmente em estudos tecnológicos, avaliando-se os tipos e teores de dosagens, a influência da qualidade das fibras no comportamento mecânico do compósito, possibilitando a utilização do material em aplicações estruturais (CARNIO, 2017).

Desta forma, este trabalho tem como objetivo estudar o efeito da adição de fibra de vidro em pasta de cimento Portland CP V ARI em relação a suas propriedades em estado endurecido, pela determinação da resistência à compressão axial, resistência à tração na flexão, densidade, e microestrutura.

O cimento CP V ARI, usado neste trabalho, representa o cimento mais desfavorável para a fibra de vidro, pois contém grande teor de C_3S e nenhum teor de escória. Apresenta endurecimento rápido e alta resistência inicial, com alto calor de hidratação, além de produzir grande quantidade de Portlandita. Segundo Peruzzi (2002), os resultados obtidos pelo ensaio de compressão confirmam grande susceptibilidade da fibra de vidro tipo E a ser degradada ao meio alcalino do cimento Portland. Porém, os resultados apresentados apontam que a modificação com látex e a adição de sílica ativa reduzem a intensidade do ataque alcalino do cimento Portland à fibra de vidro E, mas este ataque ainda ocorre com grande intensidade, necessitando de estudos posteriores, com novos tipos de látex e maiores teores de sílica ativa.

O cimento CP V ARI foi escolhido para este trabalho por ser um cimento mais agressivo à fibra de vidro, permitindo o estudo do efeito da alcalinidade da pasta cimentícia sobre as fibras.

Logo, para reduzir a alcalinidade da pasta cimentícia, evitando o ataque químico à fibra de vidro, fez-se a adição de cinza volante, oriunda de termelétrica, por apresentar propriedade pozolânica, isto é, dar origem a materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes (NBR 12653, 1994). Muitos trabalhos já foram realizados sobre a utilização da cinza volante, por apresentar propriedades pozolânicas.

DHIR et al (2000) mediram a quantidade de hidróxido de cálcio presente em misturas de concreto contendo cinzas leves até 28 dias. Pelos resultados demonstrados, houve um consumo do hidróxido de cálcio a partir dos 7 dias para os concretos com cinza leve, sendo mais destacado

o consumo para as misturas com cinza leve seca, pois para as cinzas com grande tempo de estocagem, os autores tiveram indícios de redução no potencial pozolânico (KREUZ, 2002).

CHERIAF et al (1999) estudaram a utilização da técnica de análise térmica diferencial para medir o consumo de hidróxido de cálcio. Utilizando argamassa de cal com cinza pesada, e ensaiando nas idades de 7, 14, 28 e 90 dias, demonstraram correlações significativas para a resistência à compressão com o consumo de hidróxido de cálcio (KREUZ, 2002). Os pesquisadores observaram que até os 14 dias a atividade pozolânica com cal é baixa. Porém, esta atividade pozolânica começa aos 28 dias e o consumo de hidróxido de cálcio é bastante significativo aos 90 dias, a última idade que eles pesquisaram.

De um modo geral, as incorporações de cinzas à pasta cimentícia ou em concreto podem ser úteis na melhoria de algumas propriedades, como: aumento da trabalhabilidade, redução do calor de hidratação, redução do consumo do cimento, redução da permeabilidade e aumento da durabilidade (KREUZ, 2002).

A escolha por se estudar a interação das fibras de vidro apenas com a pasta de cimento (cimento Portland + água), em vez de argamassa (cimento Portland + água + areia) ou concreto (cimento Portland + água + areia + brita), deve-se a dois fatores. As fibras de vidro foram adicionadas em fração mássica inferior a 1 % em relação à massa de cimento. Os traços de adição de areia (agregado miúdo) nas argamassas, ou areia e brita (agregado médio/gráudo) nos concretos são de 1:1 a 1:3 ou mais de cimento:areia ou cimento:brita, representando de 200 a 400 % em relação à massa de cimento. Desta forma, concluiu-se que o efeito da adição dos agregados seria superposto ao efeito da adição das fibras de vidro.

Alguns autores estudaram o reforço de argamassa com fibras, porém, segundo Barros (2017) a argamassa reforçada com as fibras de PVA promove um elevado ganho de resistência à flexão e permite a obtenção de uma maior deformação, quando comparada com muretes sem qualquer tipo de revestimento.

Apesar de Barros (2017) ter conseguido bons resultados nos seus experimentos com argamassa, este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho da fibra de vidro E em uma pasta cimentícia sem a interferência de agregados miúdos ou gráudos. Barghigiani (2013) também estudou pastas cimentícias que apresentaram um alto desempenho utilizando cimento, sílica ativa (como adição mineral), aditivo superplastificante e fibras sintéticas poliméricas de polipropileno (PP) e álcool polivinílico (PVA). As pastas fibrosas obtidas apresentaram

um aumento no limite de escoamento com o incremento das fibras, e em relação ao comportamento sob compressão, houve uma redução mais expressiva na tensão de ruptura da pasta com um maior reforço de fibra de polipropileno. Logo, o maior benefício proporcionado pelas fibras foi observado no comportamento sob flexão, com o aumento da capacidade de absorção de energia.

Outro efeito é o tamanho médio dos materiais adicionados. As fibras de vidro têm diâmetro entre 10 – 20 μm . A areia padrão tem distribuição granulométrica entre 0,2 – 6 mm e a brita entre 6 – 75 mm. O efeito do tamanho médio dos agregados seria superposto ao das fibras de vidro, também influenciando o estudo.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste estudo foi estudar a influência da adição de fibras de vidro do tipo E em pasta de cimento Portland, determinando a variação das propriedades físico-mecânicas em relação à pasta sem adição de fibras.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho consistem em:

Determinar se a adição de fibras de vidro altera a resistência à compressão diametral, resistência à compressão axial e microestrutura das amostras obtidas em relação à pasta de cimento sem adição.

Determinar, estatisticamente, qual o efeito da adição de fibra de vidro em pasta de cimento Portland CP V.

Determinar se a adição de cinza leve evita a degradação das fibras de vidro devido à alcalinidade da pasta de cimento Portland.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nos próximos itens são descritos os temas que serviram de fundamentação teórica para este trabalho.

3.1 CIMENTO

3.1.1 Conceito de Cimento

O cimento é o ingrediente básico para a construção civil. Atualmente, a produção de cimento é um índice representativo para a construção e para a infraestrutura da sociedade (SCHNEIDER, 2011). Nos últimos 100 anos a população mundial cresceu de 1,5 para 7 bilhões e quase 3 bilhões de pessoas vivem dentro ou ao redor das cidades (CLELAND, 2013). A população e a taxa de urbanização continuam aumentando, especialmente nos países em desenvolvimento (MOHAMMED et al., 2013).

Consequentemente, a produção de cimento continua a aumentar em alguns países, como na China, Índia e outros países em desenvolvimento com alta taxa de urbanização e crescimento econômico. A Tabela 1 ilustra a produção mundial de cimento, no período entre 2013 e 2016.

Tabela 1- Produção de cimento no mundo, de 2013 a 2016

PAÍS/ANO	RANKING (2016)	2016	2015	2014	2013
Total Mundo	-	4.200	4.100	4.180	4.080
China	1º	2.410	2.350	2.480	2.420
India	2º	290	270	260	280
EUA	3º	85,9	83,4	83,2	77,4
Turquia	4º	77	77	75	71,3
Brasil	5º	60	72	72	70

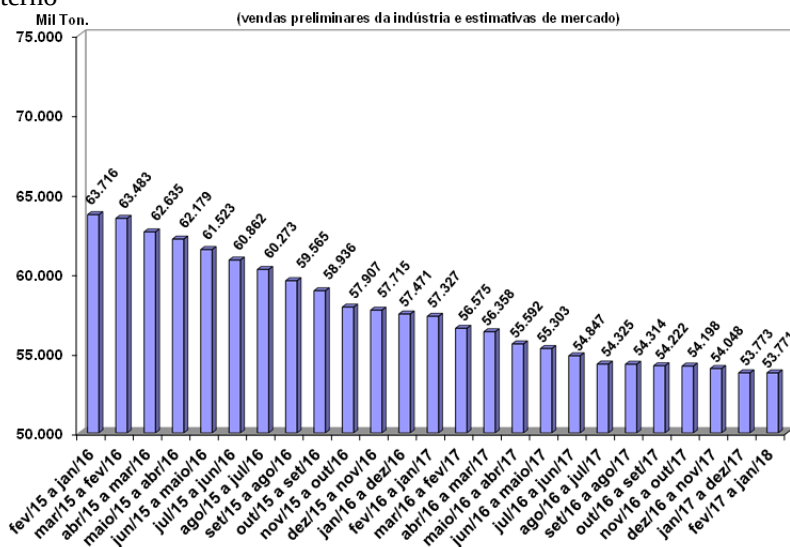
Fonte: Mineral Commodity Summaries 2017 e cimento.org.

A década de 1980, e parte da década de 1990, foi um período de redução no consumo e produção de cimento (SANTOS, 2005). Estes anos foram caracterizados por períodos de altas taxas de inflação e instabilidade da economia. Neste período, diversos planos de estabilização econômica foram implantados sem sucesso duradouro, gerando incertezas e queda do poder aquisitivo da população, que influenciaram no consumo de cimento (SANTOS, 2005).

Com a estabilização da economia no Brasil, decorrente da implantação do plano real em 1994, houve um crescimento no consumo de diversos produtos, resultado do aumento do poder aquisitivo da população brasileira, após a estabilização econômica (SANTOS, 2005).

Em 2017, no Brasil, as vendas de cimento atingiram 53,8 milhões de toneladas, uma queda de 6,4% em relação ao ano anterior, de acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC). Como se pode observar na Figura 3, nos últimos meses houve uma contínua desaceleração no ritmo da queda.

Figura 3- Venda acumulada de cimento Portland em 12 meses. Mercado Interno



Fonte: SNIC, 2017.

Em janeiro de 2018 ocorreu uma queda de 0,1% em relação a janeiro de 2017.

O SNIC (2018) apontou alguns fatores que estão levando a uma perspectiva positiva da indústria do cimento em 2018. A melhora no ambiente macroeconômico que vem ocorrendo no país, de retomada do crescimento do PIB, redução da inflação e das taxas de juros, crescimento do emprego e da renda, além dos avanços em outros indicadores importantes para a demanda do cimento, como crédito imobiliário e redução no estoque de imóveis disponíveis, levaram o SNIC a projetar expansão entre 1% a 2% em 2018 (SNIC, 2018).

Historicamente, o cimento foi utilizado há milênios. Em 1950 a.C. há uma descrição do emprego de argamassa e um material semelhante ao concreto num mural de Tebas no Egito. Especula-se que as pirâmides foram construídas com uma mistura de inertes e um ligante, provavelmente cal ou gesso. A evidência mostra que os assírios e os babilônios usavam argila como material de ligação. Cal foi obtida pela calcinação de calcário, com a reação, de acordo com Li (2011):



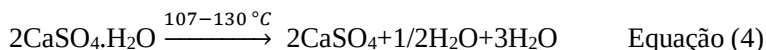
Quando o CaO é misturado com água, ele pode reagir para formar:



E depois, reage novamente com CO₂ para formar calcário novamente:



Os egípcios usaram argamassa de gesso na construção, e o gesso foi obtido por calcinação. Gesso impuro pode ser obtido pela reação de:



Quando misturado com água, o gesso semi-hidratado pode se transformar em gesso di-hidratado e ganhar resistência:

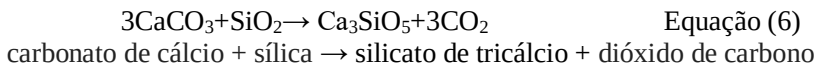


Logo, os egípcios usavam gesso em vez de cal, pois esta poderia ser calcinada em temperatura muito mais baixa.

Mas foi com os romanos que se deu a produção de um cimento de notável durabilidade, ao serem acrescentadas cinzas vulcânicas às argamassas de argila e cal (KIHARA et al, 2005). Verificou-se que a argamassa feita de tal cal hidráulica poderia resistir à água.

Assim, as primeiras formas de cimentos hidráulicos baseados em clínquer continham compostos básicos de cálcio, para os quais as principais matérias-primas são calcário e argila.

A definição da calcinação consiste na decomposição de carbonato de cálcio para o óxido de cálcio, a fim de produzir cimento. O processo de calcinação para um clínquer de cimento moderno consiste em carbonato de cálcio e óxidos de silício, que são combinados à temperatura elevada (aproximadamente 1450 °C), é (AMATO, 2013):



Isto produz um pó que irá reagir com água e alterar-se para uma pasta ou solução líquida para formar uma massa sólida. Quanto mais fino o clínquer é moído, mais rápida a reação, devido à maior área de superfície do clínquer em pó em contato com a água (AMATO, 2013).

3.1.2 Cimento Portland

Cimento Portland é o material de construção mais popular e amplamente utilizado, devido à disponibilidade de matérias-primas básicas em todo o mundo, e sua facilidade de uso na preparação e fabricação de todo tipo de formas. A NBR 5732 (ABNT, 1991) define como aglomerante hidráulico o pó obtido pela moagem de clínquer ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio.

O clínquer é o principal componente, e está presente em todos os tipos de cimento Portland. É produzido pelo aquecimento até 1450 °C de uma mistura de calcário e argila, ou de outros materiais em proporções adequadas. Logo, as adições do clínquer podem variar de um tipo de cimento para outro e são principalmente elas que definem os diferentes tipos de cimento.

Para facilitar a formação dos compostos desejados no clínquer é necessário que a mistura da matéria-prima esteja bem homogeneizada, passando por uma série de etapas como os processos de britagem e moagem, obtendo-se partículas menores que 75 µm, antes do tratamento térmico (COSTA, 2013).

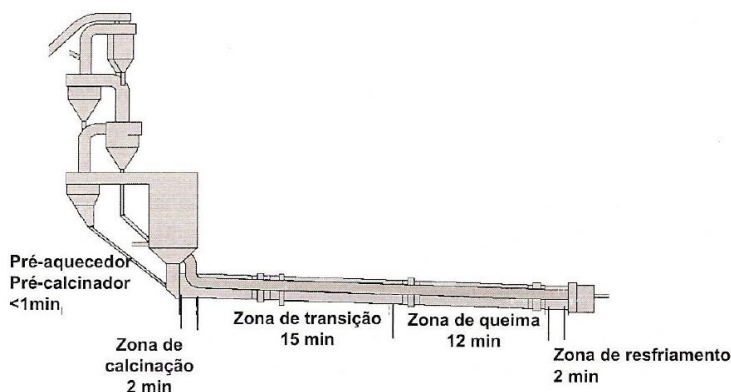
O processo de fabricação preferido das fábricas modernas é a via seca, devido ser mais eficiente energeticamente do que o processo por via úmida (MEHTA et al., 2008).

O sistema dos fornos passou por modificações, para se adaptar ao processo por via seca, e se tornou um processo mais econômico, reduzindo o consumo de combustível. Logo, os fornos usados consomem energia da ordem de 800 kcal por quilograma de clínquer, comparado com

cerca de 1.440 kcal para os fornos do processo via úmida (NÓBREGA, 2009).

O forno de clinquerização teve seu comprimento diminuído e também reduziu o tempo entre as etapas de clinquerização, devido à implementação dos pré-aquecedores e pré-calcinadores (Figura 4). Outra consequência da diminuição no tempo em que a matéria-prima permanece no forno é o aumento na vida útil do revestimento refratário, isto é, maior intervalo de tempo entre os serviços de reparo e manutenção (LYRA, 2010).

Figura 4- Reações de fase em sistema de forno com pré-aquecedor e pré-calcinador.



Fonte: ODLER, 2000.

A matéria-prima para produção de cimento é constituída principalmente de material calcário, alumina e sílica, encontrados em argilas e xisto. As argilas também contêm alumina (Al_2O_3) e, frequentemente, óxidos de ferro (Fe_2O_3) e álcalis. A presença de Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO e álcalis na mistura de matérias-primas tem efeito mineralizante na formação de silicatos de cálcio. Quando não estão presentes quantidades suficientes de Al_2O_3 e Fe_2O_3 nas matérias-primas principais, estes são propositalmente incorporados à mistura por adição de materiais secundários, como a bauxita e o minério de ferro (MEHTA et al , 1994).

De uma forma sucinta, Catarino (2012) descreve o processo produtivo do cimento, da seguinte maneira:

- O processo tem início na extração das matérias-primas (calcário e argila); a fim de reduzir o tamanho das rochas extraídas, as matérias-primas passam pelo processo de britagem.

- A próxima etapa é a moagem do cru, em que a mistura crua (denominada também de farinha) é colocada em um moinho de bolas a fim de reduzir a granulometria do material (fator de extrema importância no processo de clínquerização), passando, posteriormente, para a homogeneização da farinha. Assim, a farinha obtida por moagem das matérias primas, que devem conter em sua composição química CaO , SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , os principais óxidos componentes do clínquer (basicamente calcário e argila), é homogeneizada e conduzida continuamente para o pré-aquecedor (CATARINO, 2012).

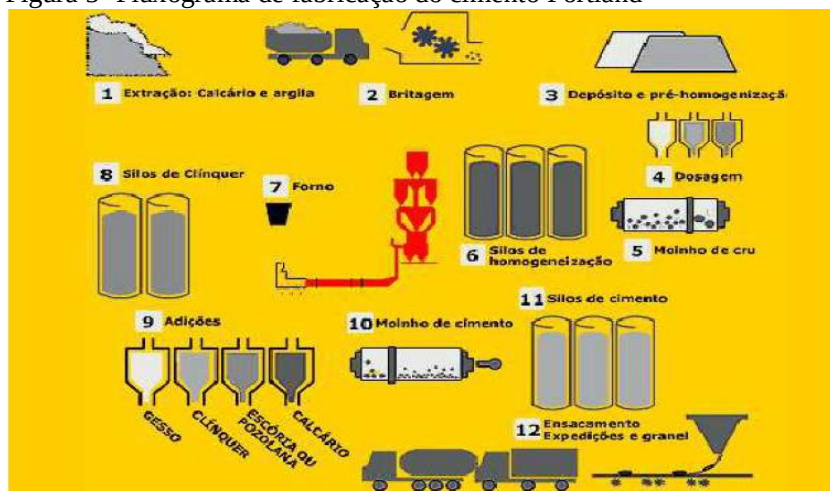
- Este material então passa pela torre de ciclones para que haja um aquecimento prévio, para ser então enviado para o forno rotativo, onde a temperatura atinge valores superiores a $1500\text{ }^\circ\text{C}$, ocorre a queima (ou clínquerização) do cru, dando origem à formação do clínquer. O clínquer obtido é formado, na sua maior parte, por silicatos de cálcio com propriedades hidráulicas e, em menor proporção, por aluminatos e ferroaluminatos de cálcio (CATARINO, 2012).

- Na saída do forno o clínquer é arrefecido bruscamente para que o silicato tricálcico formado, que é instável a temperaturas inferiores a $1250\text{ }^\circ\text{C}$, conserve a sua estrutura. Após a saída do arrefecedor, a aproximadamente $125 - 180\text{ }^\circ\text{C}$, o clínquer é armazenado, terminando o seu arrefecimento e entrando no moinho de bolas (CATARINO, 2012).

- A moagem do clínquer em moinhos de bolas é feita conjuntamente com aditivos, que promovem a dispersão das partículas do cimento, facilitando a moagem, como um regulador de hidratação (o gesso, sulfato de cálcio, CaSO_4) e eventualmente com outras adições minerais tais como filler calcário, cinzas volantes, escórias siderúrgicas, etc. Estas adições alteram as propriedades da mistura, dando origem a diferentes tipos de cimento (CATARINO, 2012). Dessa forma, o cimento está pronto para ser embalado e distribuído (MORENO, 2001; MATOS NETO, 2013).

O processo de fabricação é esquematizado de um modo simples na Figura 5.

Figura 5- Fluxograma de fabricação do cimento Portland



Fonte: ABCP, 2017.

3.1.3 Composição química do Cimento

O cimento mais simples utilizado, o cimento Portland CP I, é essencialmente composto por clínquer e gesso. A ação das temperaturas elevadas durante a fase de queima das matérias-primas do clínquer promove reações químicas que dão origem à formação dos componentes principais nele existentes, que cristalizam de uma forma mais ou menos individualizada (CATARINO, 2012). A Tabela 2 apresenta a composição de clínquer convencional de cimento Portland.

Tabela 2- Composição de clínquer convencional de cimento Portland.

Constituinte	Notação	Fórmula	% (*)
Silicato tricálcico (alita)	C ₃ S	Ca ₃ SiO ₅ /3CaO.SiO ₂	60 – 65
Silicato dicálcico (belita)	C ₂ S	Ca ₂ SiO ₄ /2CaO.SiO ₂	10 – 20
Aluminato tricálcico	C ₃ A	Ca ₃ Al ₂ O ₆ /3CaO.Al ₂ O ₃	8 – 12
Ferroaluminato tetra cálcico	C ₄ AF	Ca ₄ Al ₂ Fe ₂ O ₁₀ /4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	8 – 10

(*) percentual em massa

Fonte: NONAT, 2014.

Após a entrada da mistura crua nos fornos rotativos até a saída do clínquer, à medida que a temperatura no forno vai aumentando, são observadas diversas reações. Centurione (1993) define as principais reações que ocorrem a cada intervalo de temperatura no interior do forno durante o processo de clínquerização, e o processo de sinterização do clínquer, conforme a Tabela 3.

Tabela 3- Principais reações do processo de sinterização do clínquer.

Temperatura (°C)	Reação
100 – 200	Liberação de água livre, parcialmente, dos argilominerais.
500 – 700	Desidroxilação dos argilominerais com deslocamento acentuado da estrutura cristalina e consequente elevação da reatividade; transformação do quartzo α em quartzo β .
700 – 900	Decomposição dos carbonatos, com liberação de CO ₂ ; colapso completo das estruturas dos argilominerais. Os óxidos de cálcio, silício, alumínio e ferro liberados encontram-se em um estado ativo devido ao aumento da entropia e às áreas superficiais muito grandes; as primeiras reações de estado sólido ocorrem, conduzindo à formação de aluminatos e ferroaluminatos cálcicos e, de modo incipiente, da belita.
900 – 1200	Até essa faixa de temperatura as reações que ocorrem são de estado sólido, salientando-se a conversão dos ferritos e aluminatos em C ₄ AF e C ₃ A, além da formação de belita a partir da sílica remanescente e dos cristais de cal livre.
1200 – 1300	Por volta de 1200 °C já ocorre a cristalização das primeiras alitas, a partir de cristais pré-existent de belita e cal livre.

		Ao redor de 1280 °C essa reação é incrementada com a formação de fase líquida a partir dos aluminatos e ferroaluminatos cálcicos, com consequente nodularização do clínquer.
Acima de 1350	de	Desenvolvimento da fase alita e, dependendo do tipo de combustível, assimilação de cinzas.

Fonte: NONAT, 2014.

3.1.4 Tipos de Cimento

Há uma variedade de tipos de cimento comercializados no Brasil, com diversas adições minerais e diferentes aplicações. Logo, os cimento Portland são designados por sigla e classe de resistência, sendo o prefixo CP (cimento Portland) acrescido dos algarismos romanos I a V, conforme o tipo do cimento corresponde à sigla, podendo ainda ser adicionada uma letra S, E, Z, F e ARI conforme adição especial (CANCIAN, 2013). Já a classe de resistência representa a resistência, em MPa, aos 28 dias de cura e é representada pelos números 25, 32 e 40 (ABCP, 2012). A Tabela 4 apresenta os tipos de cimentos fabricados no Brasil:

Tabela 4- Tipos de cimento fabricados no Brasil.

Tipo	Denominação
Comum	CP I
Comum com adição	CP I-S
Composto com escória	CP II-E
Composto com pozolana	CP II-Z
Composto com filler	CP II-F
De alto-forno	CP III
Pozolânico	CP IV
De alta resistência inicial	CP V-ARI
Resistente a sulfatos	RS
De baixo calor de hidratação	BC
Branco	CPB

Fonte: ABCP (2012).

Os cimentos para uso de compósitos fibrosos são os CP II-Z, CP II-F, com a possibilidade de se ajustar, por dosagem apropriada, com base em análises das características e propriedades de cada tipo de cimento para melhor desempenho.

3.1.5 Concreto e Argamassa

O concreto é resultado de uma mistura de aglomerante sendo o cimento *Portland* o mais conhecido e utilizado agregados miúdos (areia natural ou artificial), agregados graúdos (pedra britada, argila expandida etc), água e, geralmente, aditivos (plastificante, acelerador de pega etc) (FORTES, 2000).

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), cada uma das fases do concreto é de natureza multifásica, sendo que cada partícula de agregado pode conter vários minerais, além de fissuras e vazios. A matriz da pasta de cimento apresenta uma distribuição heterogênea, de diferentes tipos e quantidades de fases sólidas, poros e microfissuras, e as mudanças microestruturais que ocorrem nos compostos formados na hidratação do cimento com o decorrer do tempo. A zona de transição localizada entre agregados e a pasta cimentícia torna-se o ponto frágil da mistura e o local da nucleação de fissuras, possibilitando a propagação da abertura devido o aumento de esforços (MEHTA *et al.* 1994).

Assim, distribuição granulométrica do agregado influencia o empacotamento dos grãos alternando a fração volumétrica de agregado a ser incorporada em uma mistura de concreto. A fração volumétrica está relacionada principalmente ao módulo de deformação do concreto e à demanda de água na mistura.(DAL MOLIN, 1995).

O fato da matriz ser seccionada em 3 diferentes fases torna-a ineficiente aos esforços de tração gerados, logo, sem o uso de reforço, é inevitável a formação de fissura que, por sua vez, podem ser propagados facilmente (EHRENBRIG, 2018).

A fase representada pelo agregado é a principal responsável pela massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional do concreto (FORTES, 2000). Alguns agregados possuem elementos que reagem com alguns compostos do cimento, prejudicando o concreto. A forma, a granulometria e a textura do agregado influenciam também nas propriedades do concreto (FORTES, 2000). Segundo Fontes, (2000) os agregados com grande diâmetro característico ou de forma lamelar facilitam a formação de um filme de água junto às paredes de agregado (exsudação),aumentando a porosidade da região e conseqüentemente enfraquecendo sua ligação com a pasta (zona de transição pasta de cimento e agregado). Agregados com diâmetro grande podem apresentar maior probabilidade de conter vazios e microfissuras internas.

E a argamassa, pode-se definir como uma mistura homogênea de um ou mais aglomerantes, agregadaos miúdos e água, além de outros

materiais a fim de melhorar determinadas propriedades (OLIVEIRA, 2001).

Segundo Oliveira (2009), argamassas são materiais de construção constituídos por aglomerantes, agregados minerais e água, tendo como principais funções revestir e assentar elementos da construção em geral, como blocos de vedação, cerâmica, blocos estruturais.

A NBR 13281 (ABNT, 2001) prescreve que argamassa é a mistura homogênea de agregado(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditiva e adições, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalações próprias (argamassas industrializadas). Elas podem ser classificadas, quanto ao emprego, ao aglomerante utilizado, aos elementos ativos, à dosagem.

As argamassas são classificadas de acordo com sua finalidade em: argamassas para assentamento e argamassas para revestimento (LEMES, 2013). Além disso, as argamassas possuem suas propriedades de acordo com o estado em que se apresenta, seja ele fresco ou endurecido (LEMES, 2013).

Logo, a eficiência de uma argamassa, depende da qualidade dos materiais que a compõem, assim como da aplicação de traços apropriados para cada serviço específico (RIPPER, 1995). O mau uso das argamassas, em obra, ocasiona desempenhos ruins a curto e longo prazo, gerando manutenções contínuas e onerosas (PINTO, 1996).

3.1.6 Adições de minerais na matriz cimentícia

As adições inseridas no cimento são definidas de acordo com a NBR 11172/90 como produtos de origem mineral adicionados aos cimentos, argamassas e concretos, com a finalidade de alterar suas características (SILVA, 2018). Segundo Polisseni (2018), as adições minerais entram na matriz cimentícia como material de substituição parcial do cimento a fim de proporcionar um desempenho tecnológico diferenciado, melhorando propriedades físico-química-mecânicas e a durabilidade das misturas produzidas. As principais adições minerais usadas em cimento no Brasil são:

Pozolanas:

A pozolana é classificada como material cimentício. É dividida em dois grupos quanto à sua origem, natural ou artificial, sendo considerados naturais os materiais de origem vulcânica ou sedimentar, e artificiais os resultantes de tratamento térmico ou subprodutos industriais.

Trata-se de um material silicoso ou silícico-aluminoso que, por si só, tem pouco ou nenhum valor cimentício mas, quando finamente subdividido e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades cimentícias (PERUZZI, 2002).

De acordo com Guedert (1989) e Santos (2006), o uso de pozolanas em adição ao cimento confere ao concreto e à argamassa características como: menor calor de hidratação, pela substituição de reações exotérmicas (hidratação do cimento) por reações atérmicas (pozolânicas); melhor resistência ao ataque ácido em função da estabilização do hidróxido de cálcio oriundo da hidratação do clínquer de Portland e pela formação de um C-S-H com menor relação CaO/SiO_2 de menor basicidade; maior durabilidade, contribuindo para a inibição da reação álcali-agregado e diminuição do diâmetro dos poros da pasta hidratada, reduzindo o ataque do material por substâncias externas como cloretos e sulfatos.

Cinza volante:

Mehta (2014) relaciona a produção de cinzas com a geração de energia elétrica em usinas termelétricas, onde o carvão pulverizado passa pela zona de queima, a elevadas temperaturas, queimando o carbono e os materiais voláteis, enquanto ocorre a fusão das impurezas, tais como a argila e o feldspato. Segundo a NBR 12653/1992, as cinzas volantes, definidas como pozolanas artificiais, são materiais finamente divididos que resultam da combustão de carvão pulverizado ou granulado com atividade pozolânica.

Recena (2011) afirma que as cinzas volantes têm como principal componente a sílica, além do carbono, mesmo que em pequenas quantidades. Complementando, Cezar (2011) apresenta além da sílica, a presença de alumina na composição das cinzas. A quantidade desses componentes presentes nas cinzas é usada como parâmetro para a sua classificação.

Segundo a ASTM C 618 (2005), as cinzas volantes são classificadas de acordo com a sua composição em duas classes distintas: classe C, originárias da queima de carvão subbetuminoso por possuírem grandes quantidades de CaO, apresentam propriedades cimentantes na presença de água; e classe F, originárias da queima de carvão betuminoso e, por isso, possuem baixo teor de cálcio e consequentemente não têm propriedades cimentantes (CEZAR, 2011).

Segundo Vasconcelos, (2018), as cinzas são materiais particulados sílico-aluminosos, tipicamente mais finos do que o cimento

Portland, formados por partículas esféricas, tipicamente variando em tamanho entre 10 e 100 μm . Quanto às características químicas, as cinzas volantes são, em geral, constituídas por sílica, alumina e óxido de ferro, além de óxido de cálcio, magnésio, sódio, potássio, titânio e outros elementos em menores teores (VASCONCELOS, 2018).

Logo, a pozolanicidade das cinzas está relacionada com o teor de SiO_2 , visto ser a sílica amorfa que se combina com a cal livre e a água, dando origem à formação de quantidades suplementares de C-S-H. Segundo Castro (2008), a pozolana possui como principal propriedade sua capacidade de reagir e combinar com o hidróxido de cálcio (CH), o que gera compostos estáveis e com características aglomerantes. Assim, no cimento Portland, o hidróxido de cálcio (CH) liberado durante a hidratação dos silicatos reage com a pozolana, incorporada parcialmente no cimento, o que gera uma produção extra de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), que possuem mais estabilidade que o cimento hidratado. A substituição parcial de cimento Portland por pozolana pode manter ou aumentar as características de resistência mecânica e durabilidade.

Quanto às características físicas, as cinzas volantes são normalmente caracterizadas por granulometria de tamanho de silte, por consistência não plástica e materiais não coesivos (VASCONCELOS, 2018). A massa específica dos grãos em geral varia entre 2.050 e 2.200 kg/m^3 (ROHDE et al. 2006).

Assim, a utilização das cinzas volantes na fabricação de concretos tem sido estudada há décadas em decorrência dos benefícios econômicos e técnicos proporcionados ao produto final (HORNAIN et al, 1992). Devido a sua heterogeneidade, existem dificuldades na utilização do material, justificando as recorrentes pesquisas realizadas, encontradas na literatura (NOGUEIRA, 2011). Grande parte dos estudos que tratam da substituição de cimento Portland por cinzas volantes no concreto apresenta as propriedades mecânicas correlacionando com sua durabilidade (CEZAR, 2011).

Pozzobon (2000) estudou a comercialização da cinza volante produzida no complexo Jorge Lacerda em Santa Catarina e concluiu que sua utilização sempre foi restrita à indústria cimenteira. Além disso, a autora apresenta a produção de 42 toneladas de cinza volante para 100 toneladas de carvão mineral.

A incorporação da cinza volante em pasta de cimento/concretos influencia diretamente o processo de hidratação e, conseqüentemente, a microestrutura do material (WITZKE, 2018). A diferença ocorre no processo de hidratação do ligante. O cimento Portland hidrata-se

formando hidróxido de cálcio. Ao contrário da cinza volante, que ao hidratar-se consome hidróxido de cálcio.

Quando cinza volante e o hidróxido de cálcio são misturadas em água, ocorre a rápida dissociação iônica do hidróxido de cálcio provendo íons de cálcio e hidroxila para a solução. Depois, os íons de cálcio são rapidamente adsorvidos pela superfície das partículas de cinza volante (MASSAZZA, 1998). Então, as hidroxilas atacam a matriz vítrea, aniquilando as ligações entre o oxigênio e o alumínio ou a sílica, além de liberar íons alcalinos de potássio e sódio (MALEK *et al.*, 2005). O consumo de cálcio necessita da solubilização do hidróxido de cálcio para manutenção da saturação da solução. O Malek (2005), desceve que o primeiro produto a ser formado é o C-S-H. Os íons de alumínio formam aluminato tricálcico hidratado, que posteriormente se converterá em hidrogranada e katoita.

A taxa de reação da interação entre o hidróxido de cálcio e a cinza volante é influenciada por alguns fatores (HOPPE, 2008), como: a relação hidróxido de cálcio/cinza volante influencia na solubilização das partículas de cinza (BIERNACKI, 2001), assim como o pH da solução, que deve ter um valor mínimo de 13,2 para uma dissolução significativa (BROUWERS, 2003).

Além disso, a reatividade, que também influencia a taxa de reação, é determinada pelo teor de fase vítrea da pozolana e do óxido de cálcio (UCHIKAWA, 1986).

Portanto, a influencia nas propriedade na pasta de cimento/concreto a fresco e no processo endurecido se dá pela:

- inclusão de cinzas volantes na mistura de concreto acarretará em mudanças em seu estado fresco. É possível afirmar que as cinzas podem proporcionar maior plasticidade à mistura (REIS, 2009). Güneyisi *et al.* (2015) afirma que as cinzas volantes são o principal fator de aumento da fluidez em concretos
- e no processo de endurecimento da mistura de concreto, a cinza volante contribui para a diminuição da temperatura da massa. Tal fato ocorre devido às reações de hidratação mais lentas. É percebido, também, que ocorre o refinamento dos poros da pasta, e ganho de resistência mais tardio, aproximadamente aos 28 dias (CEZAR, 2011).

Escória granulada de alto forno:

Escórias são resíduos da indústria do aço e do ferro, que possuem caráter predominantemente vítreo devido à sua composição contendo constituintes neutralizantes, especialmente Ca, Mg, e Si, na forma de silicatos e sílico-aluminatos de cálcio amorfos (ALMEIDA, 2004).

As escórias são geradas na fabricação do ferro gusa em alto forno, onde a fusão da ganga (minério de ferro e impurezas) e dos fundentes (calcário, coque ou carvão vegetal) gera, por meio de reações químicas, a escória (MIZUMOTO et al., 2012). O calcário é o principal fornecedor de cálcio para a escória.

Assim, as especificações das escórias para uso como material cimentício são baseadas nas normas de cimento Portland e o uso como adição mineral está citado na norma de controle tecnológico do concreto NBR 12654 (ABNT, 1992), uma vez que o Brasil ainda não possui uma norma específica para as escórias de alto-fornos (ALMEIDA, 2009).

Como consequências benéficas, a adição de escórias confere uma série de características ao cimento Portland, tais como o controle da velocidade e menor liberação de calor na hidratação, tornando o cimento de alto forno adequado para obras de cimento e argamassa em ambientes marinhos. Segundo Massucato (2005), a adição de escória proporciona a redução da reação álcali-agregado, do calor de hidratação e da retração por secagem, assim como o aumento da resistência a sulfatos, da resistência mecânica à compressão em idades avançadas e o aumento da resistência à tração.

3.2 FIBRAS

3.2.1 Conceito de Fibras

Fibras são elementos descontínuos, longos e finos, caracterizados por alta resistência à tração em sua direção longitudinal. Em termos gerais, Quinino (2015) destaca as fibras como bons elementos de reforço, as quais podem proporcionar ganhos estruturais à matriz e também fornecer propriedades que aumentem a durabilidade do compósito. Logo, a função principal das fibras é a de reforçar mecanicamente matrizes frágeis, por exemplo, as matrizes de cimento, cal ou gesso.

Para atuar eficientemente como reforço, as fibras devem: apresentar, no mínimo, módulo de elasticidade duas vezes superior ao da matriz (cimento), e também não sofrer deterioração no contato com a matriz e ou constituintes químicos da mesma (FERRAZ, 2016). Assim, as fibras conferem elevadas rigidez e resistência mecânica, aumentando

o módulo de elasticidade, a tensão máxima suportada pelo compósito e, conseqüentemente, sendo obtido um menor alongamento (FERRAZ, 2016).

Martineau (2002) acrescenta que a ação das fibras nos materiais compósitos é impor um obstáculo à propagação de fissuras. Segundo Tanesi et al. (1997) e Matsumoto et al. (1998), as fibras funcionam como uma ponte de transferência dos esforços através da fissura, garantindo assim uma capacidade resistente após a abertura da mesma.

Ainda, pode-se dizer que a melhora que a fibra proporciona ao material frágil deve-se ao fato das fibras minimizarem o surgimento das fissuras, logo impedem o seu crescimento. Contudo, as características da matriz cimentícia são melhoradas, fazendo com que o gasto energético de nucleação e de abertura de fissuras seja bem grande. Para Figueiredo (2011), a eficácia da fibra está relacionada ao seu desempenho como ponte de transferência de tensão na fissura do concreto.

De acordo com Casagrande (2001), a adição de fibras nem sempre está condicionada a aumentar a resistência à tração de materiais suscetíveis a deformações por cisalhamento e a outros problemas derivados do surgimento de tensões. A adição das fibras não impede que o material sofra fissuração, mas ela atua no controle da propagação das fissuras, melhorando assim as propriedades do material (LOPES, 2017).

Os materiais na forma de fibra apresentam elevada resistência, porém sua aplicação direta na estrutura é impraticável por não resistirem isoladamente à compressão longitudinal e aos esforços transversais (CAZARREDO, 2002).

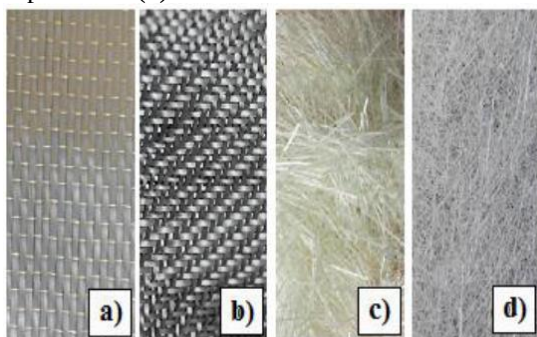
Cada fibra possui peculiaridades e processo de fabricação distinto, sendo as fibras de carbono as mais indicadas em técnicas de reforço estrutural (GOLIATH, 2017). Outro fator importante é o teor de fibras adicionadas à mistura, que exerce forte influência sobre a capacidade de reforço da mesma. Portanto, quanto maior for o teor adotado, maior será o número de fibras desempenhando a função de ponte de transferência de tensão, aumentando assim o reforço pós fissuração do concreto (BONIFÁCIO et al., 2014). Além do teor, outras propriedades como geometria e resistência das fibras influenciam no seu desempenho pós fissuração.

Considerando-se que, em linhas gerais, a tecnologia de materiais compósitos consiste na disposição de fibras de grande rigidez e alta resistência mecânica em uma matriz de menor resistência, o estudo da fibra é de fundamental importância e várias opções de fibras estão disponíveis, entre fibras sintéticas ou fibras naturais (MORAES, 2016).

Podem ser distribuídas de diferentes formas, de acordo com a aplicação requerida: particulada, descontínua, contínua e nas orientações: aleatória, unidirecional ou bidirecional (MORAES, 2016), conforme ilustrado pela Figura 6.

Como dito, as fibras possuem relação direta com a eficiência dos compósitos e deve-se atentar para sua orientação, comprimento, forma e material utilizado (GOLIATH, 2017). As fibras que apresentam maior módulo de elasticidade atribuem maior resistência para o reforço. O peso específico das fibras também é observado, sendo em média de três a seis vezes menor do que o do aço (GOLIATH, 2017). As fibras com pequeno diâmetro e longas são apontadas como as mais apropriadas para o reforço, por possuírem ótima capacidade de transferência de carga (ARAÚJO, 2002).

Figura 6- Reforços fibrosos a) tecido unidirecional; (b) tecido bidirecional c) fibras picadas e (d) manta contínua



Fonte: CAMPOS, 2017.

Nos tópicos seguintes tem-se breves descrições sobre cada um destes tipos de fibras.

3.2.2 Concreto com Fibras

O concreto tem uma série de características que lhe garantem o posto de material de construção mais utilizado no mundo, sendo que uma das grandes vantagens do concreto é sua capacidade de absorver os esforços de compressão, sendo que aos 28 dias após a concretagem, o concreto já adquire a resistência de projeto.

O concreto é composto por cimento Portland e é uma mistura formada a partir da interação entre pasta de cimento, os agregados e a

zona de transição, conforme ilustra a Figura 7 (MEHTA et al., 2014). A zona de transição, localizada entre os agregados e a pasta cimentícia, torna-se o ponto frágil da mistura e local da nucleação de fissuras, possibilitando a propagação da abertura devido ao aumento de esforços (MEHTA et al., 1994). A Figura 7 ilustra a micrografia do concreto, na região da interface entre pasta e agregado, que forma a zona de transição; ampliação de $110\times$ em microscopia eletrônica de varredura, MEV.

Figura 7- Micrografia do concreto na região da interface entre pasta e agregado, que forma a zona de transição; ampliação de $110\times$ em MEV.



Fonte: MEHTA et al., 2014.

O fato da matriz ser seccionada em 3 diferentes fases torna-a ineficiente aos esforços de tração. Além disso, o concreto apresenta uma série de limitações, como o comportamento frágil e uma baixa capacidade de deformação, antes de o material entrar em ruptura, quando for submetido a esforços de tração (FIGUEIREDO, 2011). Logo, sem uso de reforços, é inevitável a formação de fissuras que, por sua vez, podem ser propagadas facilmente.

Por outro lado, a mistura, além de sua heterogeneidade, possui grande chance de ser confeccionada indevidamente, podendo desvincular-se dos princípios de dosagem estipulados desde o início (HELENE et al., 2010). Mesmo sendo material facilmente confeccionado, os processos de dosagem e mistura dessa matriz geram anomalias irreversíveis. Caso as tomadas de decisão sejam feitas erroneamente, suas consequências promovem a redução de resistência, diminuição da

durabilidade, aumento no potencial de retração e fissuração (EHRENBRING, 2017).

Portanto, devido ao seu comportamento frágil destacam-se algumas características inerentes às matrizes à base de cimento, tais como: retração, variação volumétrica sob condições térmicas, baixa capacidade de deformação e resistência à compressão (TUTIKIAN et al., 2011). Diante dessas variáveis, adotam-se medidas alternativas, utilizando-se outras matérias-primas para melhorar as propriedades do compósito (DAWOOD et al., 2011).

Como consequência de sua fragilidade, a sua resistência à tração é muito reduzida quando comparada à sua resistência à compressão. A combinação com armadura de aço provê aos elementos estruturais de concreto resistência à tração e a ductilidade necessária. Logo, uma vez fissurado, o concreto perde completamente a capacidade de resistir aos esforços de tração e, por essa razão, surgiram alternativas tecnológicas, ao concreto armado, onde estas limitações são compensadas pelo reforço do concreto pelo uso de fibra (EHRENBRING, 2017). Com o objetivo de melhorar a ductilidade, a durabilidade e controlar a fissuração, esse tipo de reforço – fibras – ganhou muito interesse do mercado e de pesquisadores a partir da década de 1960 (BERNADI, 2003).

A maioria dos materiais compósitos consistem em elementos de reforço envolvido por uma matriz, constituída de resina colante, com o objetivo de obter características específicas e propriedades desejadas. O concreto simples, sem fibras, é um compósito feito com partículas grandes, onde as fases matriz e dispersa são compostas por materiais cerâmicos.

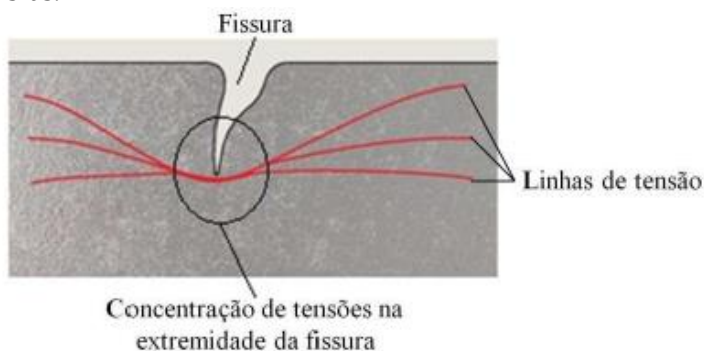
Barros (2009) explica que, para o concreto sem fibras, no momento em que ocorre a formação de fissuras, a tensão que percorria o local em que se formou a fissura desvia sua trajetória para um local mais próximo que permita sua propagação, isto é, na extremidade da fissura, conforme explicitado na Figura 8. Diante disso, tem-se uma concentração de tensões na extremidade da fissura, de modo que no instante em que esta tensão se tornar superior à resistência do concreto, ocorrerá a ruptura do material (PEREIRA, 2017). Logo, o concreto sem fibras tem um comportamento mais frágil do que o concreto com adição de fibras (AMARAL, 2016).

Os compósitos com fibras possuem capacidade portante mais elevada, deformação antes da ruptura do elemento e diminuição do número de nucleação de fissuras, quando comparados às matrizes convencionais (EHRENBRING, 2017), como ilustra a Figura 9.

Diante disso, elementos com esse tipo de material apresentam maior durabilidade e, por sua vez, o prolongamento da vida útil do sistema

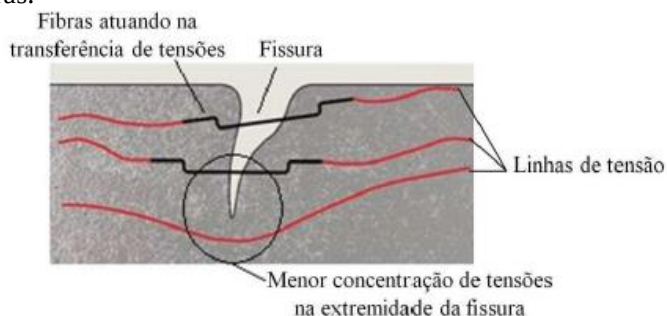
(EHRENBRING, 2017). Ou seja, o concreto com adição de fibras sofre maior deformação antes da ruptura, visto que as fibras interceptam as fissuras diminuindo assim sua abertura (AMARAL, 2016). Dessa forma, ao se comparar com o concreto sem adição de fibras e para um mesmo nível de tensão aplicada ao elemento, há uma redução nas concentrações das tensões na extremidade da fissura (BARROS, 2009).

Figura 8- Esquema da distribuição de tensões para concreto sem reforço de fibras.



Fonte: PEREIRA, 2017.

Figura 9- Esquema da distribuição de tensões para concreto com reforço de fibras.



Fonte: PEREIRA, 2017.

Conforme Figueiredo (2000), como as fibras atuam como pontes de transferência de tensões pelas fissuras e, assim, há uma redução na concentração de tensões das mesmas, o concreto deixa de possuir um comportamento frágil e passa a apresentar um comportamento pseudo-frágil. Dessa forma, há uma diminuição da velocidade de propagação das

fissuras no concreto e este passa a apresentar determinada capacidade portante pós-fissuração (PEREIRA, 2017).

Figueiredo (2011) relata que o papel que a fibra irá desempenhar no concreto dependerá de uma série de características da mesma. No entanto, os principais parâmetros que interferem na interação entre a fibra e a matriz são o tipo de fibra; o teor de fibras no compósito; as dimensões das fibras e as propriedades mecânicas da matriz e das fibras, tais como resistência à compressão e módulo de elasticidade (NUNES, 2006).

A fratura é um fenômeno irreversível quando, na área sob deformação (região afetada) existirem vazios que coalescem e formam a fratura propriamente dita. Para Meyers (2009), a fratura de um material por meio de fissuração pode ocorrer de muitas maneiras, principalmente: aplicação lenta de cargas externas; aplicação rápida de cargas externas (impacto); carregamento cíclico (fadiga); e efeitos ambientais, como corrosão nas armaduras do concreto.

O processo da fratura pode ser interpretado considerando o acúmulo de dano, nucleação de uma ou mais fissuras ou vazios e o crescimento de fissuras ou vazios.

Anderson (1995) exemplifica o trinômio da mecânica da fratura com base num modelo relacionando a tensão aplicada, o tamanho do defeito e a resistência do material relacionado ao crescimento do defeito.

A propagação de fissuras em estruturas de concreto é antecipada pela formação de uma zona de dano, conhecida como Zona do Processo de Fratura, onde o material dentro da zona é alterado e suas propriedades são diferentes do restante da parte da estrutura (VASCONCELOS, 2012). Portanto, a zona do processo da fratura tem a capacidade de transferir a tensão final através da face da trinca (VASCONCELOS, 2012).

Logo, a mecânica da fratura não linear é uma teoria racional para ensaios dos materiais e análise estrutural e, com ela, é possível prever com precisão e simular o processo da fratura. Isso é necessário para concreto reforçado com fibra, cujo comportamento de propagação das fissuras é diferente do concreto convencional (BARROS, 1995).

Para classificação básica do material, as propriedades que são mais relevantes são módulo de elasticidade e a resistência mecânica, pois estas duas propriedades irão definir a capacidade de reforço que a fibra pode proporcionar ao concreto (FIGUEIREDO, 2005). As fibras de baixo módulo de elasticidade, como as de polipropileno e náilon, apresentam módulo inferior ao do concreto. Já as fibras que possuem módulo de elasticidade superior ao do concreto são conhecidas como fibras de alto módulo.

Assim, nas últimas décadas surgiram grandes avanços tecnológicos, novas pesquisas e aplicações dos concretos com fibras. Este material é utilizado cada vez mais em todo o mundo e hoje existem vários tipos de fibras disponíveis no mercado; de aço, poliméricas e cerâmicas.

No Reino Unido e Austrália a tecnologia e fabricação de elementos em GRC (*Glass-fiber reinforced composite*, ou compósito reforçado por fibra de vidro) está muito evoluída, por outro lado, Japão, Estados Unidos e Canadá avançam na direção do uso de chapas de reforços em diversos tipos de fibras, não se restringem às fibras de vidro, mas principalmente às constituídas de tecidos unidirecionais de fibras de carbono (ORTENZI, 2007).

Segundo Figueiredo, 2017, no exterior já se constroem edifícios em concreto só com fibras, com a execução de lajes sem vergalhões. No Brasil o uso da fibra é economicamente viável quando seu consumo no concreto é baixo, como nas estruturas hiperestáticas com alto grau de redundância (caso dos pavimentos de concreto) e como reforço secundário (reforço com fibras em estruturas de concreto armado) (FIGUEIREDO, 2017).

3.2.3 Tipos de Fibras

As fibras podem ser classificadas em micro ou macrofibras, conforme suas dimensões, e têm diferentes funções. As microfibras apresentam diâmetro entre 10 e 30 μm e comprimento entre 3 e 18 mm e as macrofibras possuem diâmetro maior que 0,30 mm e comprimento entre 30 e 60 mm (SALVADOR, 2013).

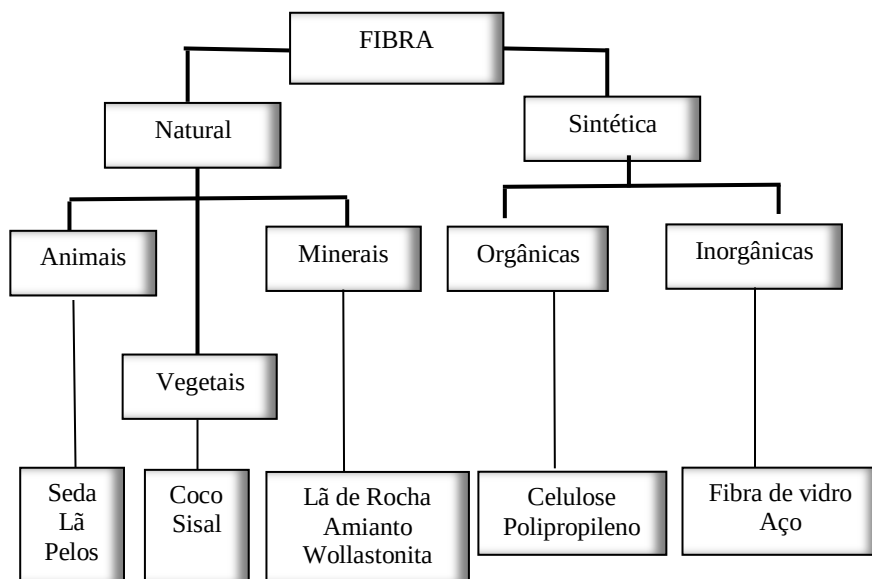
A classificação das macrofibras volta-se ao desempenho do reforço após a microfissura da matriz (EHRENBRING, 2017), assim, contribuindo principalmente na fase pós-fissuração, conferindo resistência residual ao CRF (Concreto reforçado com fibras) (BENTUR et al., 2007).

Já as microfibras agem nas idades iniciais da mistura, retardando a propagação das microfissuras (QUININO, 2015). De acordo com Bernardi (2003), as microfibras atuam em conjunto com a matriz desde o início do carregamento e, assim, auxiliam no controle da retração e fissuração de matrizes cimentícias na fase plástica.

Além dos atributos geométricos das fibras, sua composição química também deve ser atendida. Existem muitas opções de reforços com potencial de incorporação em concretos, podendo ser originados por componentes metálicos, sintéticos e naturais (SANTIAGO, 2002)

A Figura 10 mostra uma classificação dos tipos de fibras.

Figura 10- Classificação dos tipos de fibras



Fonte: Adaptado de BATISTA, 2013.

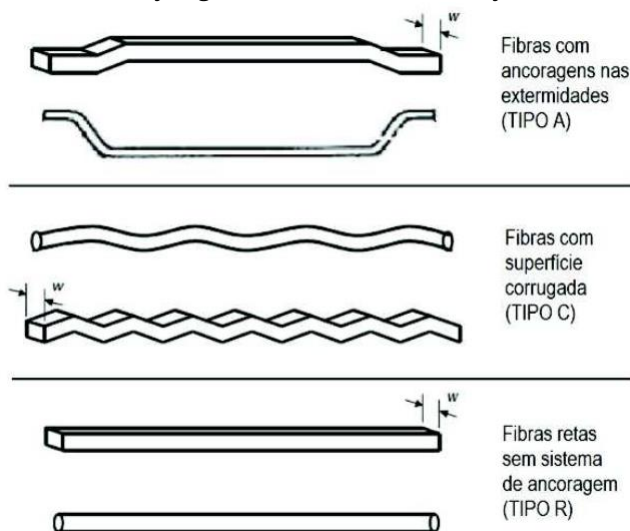
Sathishkumar et al. (2014) diferenciam as fibras naturais das sintéticas. Segundo os autores as fibras feitas a partir de produtos químicos são chamadas de fibras sintéticas (exemplos: vidro, carbono, aramida, boro, fibras cerâmicas), enquanto que as fibras feitas a partir de produtos químicos naturais (celulose, hemicelulose, lignina, pectina), são chamadas de fibras naturais, por exemplo, juta, linho, curauá, cânhamo, sisal, coco, banana e agave.

Logo, pesquisas evidenciam resultados satisfatórios com fibras de aço e PVA, como mostram Ostertag et al. (2010); fibras de polipropileno, segundo Tanesi et al. (1999) e Barghigiani (2013); e compósitos reforçados com fibras naturais, visto por Savastano (2000) e Lertwattananuruk (2015).

As fibras metálicas, segundo Quinino (2015), são muito aplicadas na construção civil, tendo mercado consolidado devido às suas características mecânicas e sua morfologia, conforme ilustra a Figura 11. Em detrimento das boas propriedades mecânicas, as fibras de aço são

ótimas opções para fins estruturais, reforçando concretos de maneira a proporcionarem ganhos mecânicos à mistura (EHRENBRING, 2017).

Figura 11- Classificação geométrica das fibras de aço.



Fonte: Figueiredo, 2008.

Portanto, as fibras de aço podem ser classificadas conforme sua geometria em lisas, onduladas e com ganchos nas extremidades (CHENG et al., 2010). Bentur et al. (2007) ressaltam que as fibras de geometria lisa já são pouco empregadas, uma vez que a ligação com a matriz pode ser insuficiente.

As fibras de carbono são as mais novas e promissoras fibras no desenvolvimento de materiais compósitos, com base na resistência das ligações carbono-carbono e na leveza do átomo de carbono. Estas fibras podem ser classificadas como: fibras de alta resistência (2.400 MPa) com módulo de elasticidade de 240 GPa e fibras de alto módulo (420 GPa) com resistência à tração de 2.100 MPa (VAZ, 2015).

As fibras de vidro, carbono e asbesto são as fibras cerâmicas, sendo a de asbesto conhecida como fibra mineral. As fibras de vidro geralmente são produzidas na forma de ‘cachos’, fios compostos de centenas de filamentos individuais (VAZ, 2015).

Existem fibras produzidas a partir do vidro tipo E (*electrical*) que são atacadas pelos álcalis presentes nos materiais baseados em cimento Portland, e fibras tipo AR (*alkalis resistant*) que apresentam resistência

ao meio alcalino e por isso têm sido utilizadas com sucesso nas matrizes cimentícias à base de cimento Portland (VAZ, 2015).

E as fibras poliméricas podem ser divididas em sintéticas e naturais. Entre as fibras de polímeros naturais estão as produzidas de amianto (asbesto) e celulose. De acordo com Bento (2006), as fibras naturais foram as primeiras a serem empregadas como reforço na história da humanidade, sendo sua maioria de origem vegetal, destacando-se o bambu, juta, coco, linho e sisal, sendo esta última a mais utilizada devido a sua alta tenacidade e resistência.

Segundo Sarzalejo et al. (2014), as fibras mais comuns de polímeros sintéticos são: polipropileno, vinil, acrílico modificado, poliamida ou náilon e aramida. A mais usual entre as apresentadas são as de polipropileno.

De acordo com Carnio (2009), as fibras de polipropileno, por sua vez, são compostas por material termoplástico e exercem papel relevante na construção civil, quer no aspecto financeiro, custo relativamente baixo comparado a outros tipos de fibras, quer na sua resistência mecânica.

As de polietileno, cujo módulo de elasticidade é relativamente baixo, dispõe de alta resistência a álcalis, mas percebe-se que são fracamente aderidas à matriz de concreto e pouco usuais na construção civil (OLIVEIRA, 2017).

Por fim, as fibras naturais, segundo Bernardi (2003), podem ser disseminadas em diferentes classes, dentre elas a classe vegetal, animal ou mineral. Sua aplicabilidade na construção civil já é feita há milênios, mostrando ser uma alternativa convincente. Provenientes de fontes naturais, estas fibras ganham força no mercado da construção civil por terem baixo custo, baixa massa específica e não serem abrasivas, o que é desejável do ponto de vista prático, evitando maiores desgastes nos equipamentos de mistura e lançamento (LI et al., 2007).

Hoje, as fibras naturais vêm mostrando avanços em pesquisas (SUNTIJITTO, 2015). Um dos grandes motivos que alimentam as pesquisas sobre concretos com fibras vegetais volta-se à capacidade mecânica desses reforços (BERTUR et al., 2007).

As fibras diferem também pelas suas propriedades. Conforme Pereira (2017), as propriedades físicas e químicas das fibras são distintas quanto à massa específica, rugosidade superficial, reatividade com a matriz de cimento, estabilidade química e resistência ao fogo. Por fim, as fibras apresentam diferentes propriedades mecânicas, tais como resistência à tração, módulo de elasticidade e ductilidade (NAAMAN, 2003). A Tabela 5 apresenta resumidamente algumas propriedades

mecânicas, de acordo com o tipo de fibras. A composição química da fibra de vidro E está descrita na tabela 13.

Tabela 5: Tipos de fibras e suas propriedades mecânicas.

Tipo	Material	Densidade (g/cm³)	Limite de resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Fibras cerâmicas	Carbono	1,78 - 2,15	1500-4800	228-724
	Boro	2,57	3600	400
	Carbeto de silício	3,00	3900	400
	Vidro E	2,54	3500	72
Fibras Poliméricas	Aramida (kevlar 49)	1,44	3600-4100	131
	Polietileno UHMW	0,97	2600	117
Fibras Naturais	Linho	1,4-1,5	345-1500	27,6-80
	Sisal	1,33-1,45	468-700	9,4-38
	Curauá	1,4	500-1150	11,8

Fonte: Adaptado pelo autor e ORNAGHI, 2009.

De acordo com Caldeira (2012), deve-se considerar certas características relevantes na escolha das fibras para reforço de materiais de maneira a não comprometer o desempenho do material compósito. A fibra deve ser quimicamente neutra e não deteriorável, não sofrer ataques de fungos, bactérias ou álcalis e não ser prejudicial à saúde humana, assim como também deve apresentar características físicas e mecânicas adequadas à finalidade a que se destinam (SANTIAGO, 2011).

Percebe-se que o comportamento mecânico dos materiais compósitos mostra uma forte influência das propriedades de acordo com seus constituintes, tal como os tipos de reforços e matrizes, as percentagens destes constituintes e, principalmente, da distribuição e orientação das fibras (TINÔ et al., 2014).

Conforme Figueiredo (2005), a escolha de um determinado tipo de fibra a ser usada depende das características que se quer obter no compósito. O módulo de elasticidade e a resistência mecânica são duas

propriedades mais importantes na definição da capacidade de reforço que a fibra pode proporcionar ao concreto (SHNEIDER, 2016).

De acordo com Oliveira et al. (2000), as fibras com módulo de elasticidade baixo e alongamento maior do que as matrizes de concreto, como as fibras de polipropileno, são capazes de absorver grande energia, com elevada tenacidade e grande resistência ao impacto, mas não contribuem para o aumento da resistência à tração do compósito. As fibras com alto módulo de elasticidade e de resistência, como as fibras de aço, de vidro e de carbono, produzem compósitos com elevada resistência à tração, rigidez e capacidade de resistir a cargas dinâmicas (SHNEIDER, 2016).

3.2.3.1 Fibra de Vidro

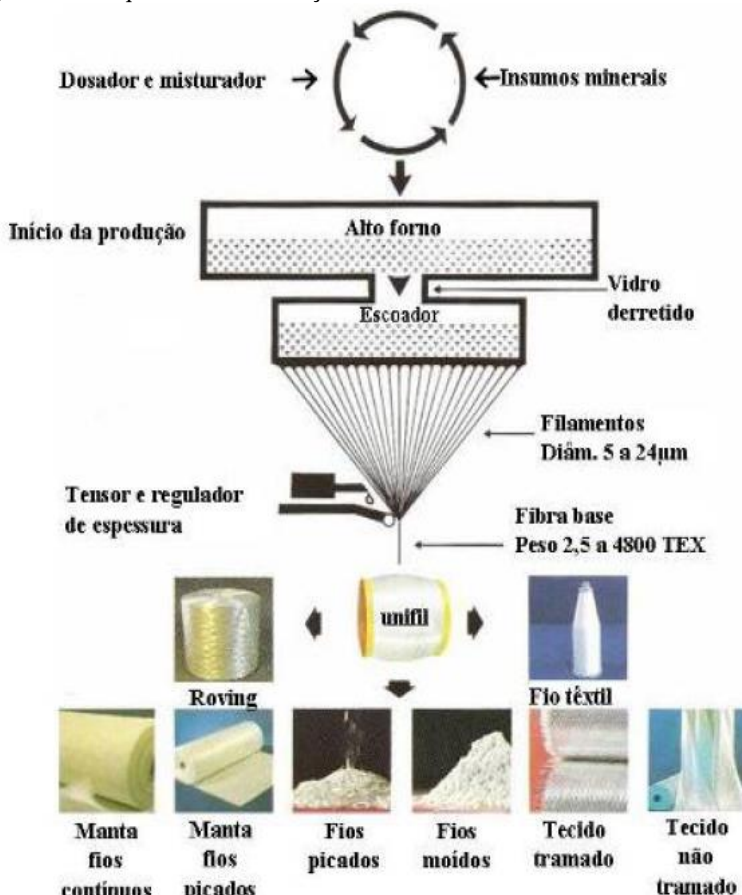
Embora as fibras de vidro sejam confeccionadas com um material frágil, o vidro, possuem propriedades satisfatórias para o emprego na construção civil, tais como: baixo coeficiente de dilatação térmica, resistência à tração e à vibração, retenção das propriedades mecânicas a altas temperaturas, grande alongamento na ruptura, facilidade de processamento, baixo custo se comparadas às outras fibras dúcteis, além de não serem passíveis de inalação, o que representa uma grande vantagem se comparada ao amianto (PERUZZI, 2002).

A justificativa para maior resistência das fibras de vidro em relação ao vidro está na menor quantidade de defeitos microscópicos que a primeira tem frente ao segundo, defeitos esses que são responsáveis pelo enfraquecimento dos materiais (OLIVEIRA et al., 2000).

O processo de produção das fibras de vidro tem início a partir do aquecimento de uma mistura formada de areia e calcário, que é colocada num refratário até uma temperatura em forno de 1.400 °C (CARNEIRO, 2004).

Logo, a Figura 12 apresenta um esquema de produção a partir dos insumos básicos até a fabricação da matéria-prima básica que é o filamento de fibra (ORTENZI, 2007). A partir desse filamento, podem ser obtidos inúmeros subprodutos conforme se observa na mesma Figura 12.

Figura 12- Esquema de fabricação de fibra de vidro.



Fonte: Saint-Gobain VETROTEXO, 2000.

Na segunda fase o vidro, já em fusão, atravessa por peneiras metálicas feitas de ligas de platina circulares com milhares de orifícios entre 1 e 2 mm, que irão gerar filamentos, e a partir desse ponto esses filamentos são resfriados em meio de água ou ar, conforme mostra a Figura 12 (ORTENZI, 2007).

Ao saírem pelos orifícios, pela simples ação da gravidade, esses filamentos são estirados mecanicamente até adquirir o diâmetro final.

Um sistema tensor, composto por enroladores que tracionam os filamentos para carretéis a uma velocidade aproximadamente de 80 km/h, deixa os filamentos com diâmetro entre 5 a 30 µm (ORTENZI, 2007).

Durante esse processo pode ser efetuado o controle de espessura dos filamentos que serão a matéria-prima básica para a confecção das chamadas fibras de vidro (ORTENZI, 2007).

Como se pode observar, as fibras de vidro podem ser fabricadas para diversas finalidades, e dependendo do processo de filamentação resultam em produtos variados, como descreve Ortenzi (2007):

- Feltros para isolamento termo-acústico;
- Fios para tecelagem de tecidos especiais diversos;
- Fios para fabricação de mantas e tecidos com finalidades estruturais.

Devido à diversidade de aplicações decorativas e estruturais dos diversos tipos de vidro, este fato torna-o um material bastante versátil, Tabela 6. Segundo Ortenzi (2007) as fibras de vidro utilizadas na construção civil e em outros setores produtivos são, em sua maioria, produzidas a partir dos filamentos de vidro E. As fibras de vidro em geral são os reforços mais utilizados porque elas apresentam uma série de características favoráveis que fazem com que se opte por elas.

Tabela 6- Principais vantagens e características da fibra de vidro

Excelente aderência fibra-matriz	Quando modelado o compósito a fibra apresenta excelente aderência em relação à matriz.
Facilidade no processamento	Material com boa trabalhabilidade, o que facilita o seu processamento.
Alta resistência à tração	Comparada com outras fibras têxteis, sua resistência à tração específica (por densidade) é superior à maioria delas.
Leveza	Fibras de vidro são leves. Os laminados moldados por contato têm peso específico 1,4, contra 2,7 para alumínio e 7,8 para o aço.
Resistência ao calor e ao fogo	Devido a sua origem inorgânica (mineral), as fibras de vidro são incombustíveis. Por seu alto ponto de fusão, estas são indicadas para aplicações em meios com temperatura elevada.
Resistencia à corrosão	Fibra de vidro não sofre corrosão e tem excepcional resistência a ambientes altamente agressivo aos materiais convencionais.
Resistência química elevada	Sofre ataque ou degradação por parte dos agentes químicos.

Resistência à umidade	As fibras de vidro não absorvem umidade, portanto não se dilatam ou desintegram além de manter sua máxima resistência mecânica na presença de umidade.
Resistência térmica	Estas fibras apresentam um coeficiente de dilatação linear térmica muito baixo e um baixo coeficiente de condutividade térmica, o que garante um baixo coeficiente de condutividade térmica, e um excelente desempenho em ambiente com variações térmicas bruscas.
Resistência elétrica	Por não serem condutores, as fibras de vidro são ideais para serem usadas como isolante térmicos.
Baixo custo	Material com baixo custo de aquisição.

Fonte: CARVALHO, 1992. Adaptado pelo autor.

Pesquisas utilizando concreto reforçado com fibras de vidro mostram que as propriedades do concreto (resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade, tenacidade, fadiga) são melhoradas quando a fibra de vidro é adicionada ao concreto (VAZ, 2015).

3.2.3.1.1 Tipos de Fibras de Vidro

Atualmente são produzidos quatro tipos de fibra de vidro, como ilustra a Tabela 7, que destaca as diferenciações entre os vários tipos de fibras de vidro produzidas.

Tabela 7-Diferenciação entre os vários tipos de fibras de vidro produzidas

Tipo de vidro	Características principais	Resistência mecânica	Resistência química
E	Isolamento eletro-magnético	Muito boa	Boa
AR	Alcali-resistente	Boa	Ótima
S	Alta resistência mecânica/térmica	Ótima	Muito boa
C	Alta resistência química	Boa	Ótima

Fonte: Saint-Gobain, 2000.

Segundo a empresa Saint-Gobain (2000) as fibras de vidro podem ser dos tipos: E, AR, C, S, entre outras. O primeiro tipo a ser utilizado foi o vidro AR, que possui uma alta resistência a álcalis (CUNHA, 2015).

Posteriormente, foi utilizada a fibra de vidro tipo E, algumas vezes chamada de convencional, que tem inadequada resistência ao meio alcalino da matriz de cimento Portland, o que causa uma deterioração das propriedades mecânicas, fazendo com que a fibra de vidro convencional perca sua flexibilidade e sua resistência à tração, o que fragiliza todo o compósito (CUNHA, 2015). Este foi o primeiro tipo de formulação utilizado para a formação de um filamento contínuo, sendo, ainda, a fibra de vidro mais utilizada no mundo (CUNHA, 2015).

A fibra de vidro tipo S é uma formulação que fornece maior resistência mecânica e a fibra do tipo C foi desenvolvida para resistir a ataques químicos, na maioria por compostos ácidos (ORNAGHI, 2009).

Entre os quatro tipos de vidro apresentados, atualmente são produzidos em larga escala industrial os vidro tipo “E” e o vidro tipo “AR”. O vidro tipo “S” está restrito à produção específica para a indústria aeroespacial, enquanto o vidro tipo “C” está sendo substituído por outros tipos de fibras mais eficazes e de custo mais competitivo para uso em ambientes de alta agressividade química (ORTENZI, 2007).

De acordo com Daniel et al. (1994), os dois tipos de fibra de vidro mais usados são E e S. Essas fibras têm como vantagem alta resistência e baixo custo e, como desvantagem, baixa dureza, baixa resistência à fadiga, baixa resistência a altas temperaturas e alta degradação quando submetidas à exposição em severas condições de umidade (ALMEIDA, 2004). A Tabela 8 apresenta algumas propriedades referentes aos dois tipos mais usados de fibra de vidro.

Portanto, é possível notar, por exemplo, o que torna o vidro AR mais resistente à alcalinização. O menor teor de óxido de cálcio, óxido de magnésio e óxido de alumínio melhora suas propriedades para ser utilizado em ambientes alcalinos (ORTENZI, 2007). Por outro lado, o vidro “R”, possui o maior teor de óxido de alumínio e óxido de magnésio de todos ou outros tipos, conferindo ao mesmo, resistência mecânica superior aos demais (ORTENZI, 2007).

Tabela 8- Composição média por tipo de vidro, onde, apresenta resistente a álcalis (RA), condutividade, resistência química (RQ), resistência mecânica (RM) e resistência térmica (RT).

Composição média em % massa	AR Resistente a álcalis	E ou D Baixa condutividade	C RQ	R RM	S RT
SiO ₂	72,1	54,3	64,4	64,2	65
Al ₂ O ₃	0,6	15,2	4,1	24,8	25
B ₂ O ₃	-	8	4,7	0,01	-
MgO	2,5	4,7	3,3	10,27	10
CaO	10	17,2	13,2	0,01	-
Fe ₂ O ₃	-	-	-	0,21	-
Na ₂ O	14,3	0,6	7,7	0,3	-
K ₂ O	-	-	1,7	-	-
BaO	-	-	0,9	0,2	-
Outros	0,5	-	-	-	-

Fonte: Saint Gobain (2000).

De acordo com a pesquisa de Vaz (2015), as primeiras tentativas de usar a fibra de vidro E (*Electrical*) mostraram-se desvantajosas devido ao ataque alcalino da pasta de cimento hidratada às fibras, que afeta as propriedades do concreto como resistência e durabilidade. Isso levou ao desenvolvimento das fibras de vidro álcali resistentes, AR, que mantêm sua resistência por longos períodos no concreto de cimento Portland (GHUGAL et al. 2006).

3.2.3.1.2 Propriedades Mecânicas da Fibra de Vidro

As fibras de vidro utilizadas como reforço estrutural são constituídas basicamente de feixes de filamentos. As principais normas de ensaios de caracterização e propriedades mecânicas para as fibras são as normas editadas pela American Society for Testing and Materials (ASTM), de onde as demais normas derivaram.

Assim, com o avanço tecnológico da utilização do CRF como material estrutural, é de fundamental importância o aprofundamento de estudos no que concerne à terminologia, requisitos, métodos de ensaio e procedimentos para projetos e execução. Neste sentido, os trabalhos desenvolvidos no Comitê Técnico IBRACON/ABECE 303- CT3 03 são um primeiro passo para a normalização do CRF para aplicações estruturais.

Segundo Ortenzi (2007), os ensaios das fibras de vidro pode ser feitos direta ou indiretamente:

- Diretamente: são ensaiados os filamentos de vidro em relação ao diâmetro médio, uniformidade, resistência ao fogo, resistência a agentes químicos e compatibilidade aos polímeros e outros materiais.
- Indiretamente: os ensaios são realizados em associação com a matriz onde a fibra está acomodada ou dispersa, conforme o caso.

Os ensaios mecânicos da fibra de vidro associada a uma matriz devem considerar sempre a direção da disposição das fibras, o tipo de fibra, o percentual de fibra em relação à matriz e a técnica de elaboração dos corpos de prova (Ortenzi, 2007). Todos esses aspectos influenciam conjuntamente para que a fibra associada à matriz tenha maior ou menor resistência e rigidez, além de outras propriedades, como a aderência da fibra na matriz, que poderá influenciar no início das falhas do material compósito (Ortenz, 2007).

Tabela 9- Propriedades mecânicas comparativas entre diversos tipos de fibras sintéticas.

Tipo de fibra de vidro	Massa específica (g/cm ³)	Resistência à tração (MPa)	Módulo na tração (GPa)	Deformação até a ruptura (%)
E	2,58	3.330	72,5	2,5
S	2,48	4.600	88,0	3,0
R	2,62	4.400	86,0	3,0
Aramida (K49)	1,44	3.620	131,0	2,9
Carbono (AS4C)	1,80	3.790	234,0	1,7

Fonte: Owens Corning, 1995.

O arranjo ou orientação das fibras entre si, a sua concentração e a sua distribuição têm uma influência significativa sobre a resistência e sobre outras propriedades dos compósitos reforçados com fibras (SILVA, 2014). Normalmente, as fibras contínuas estão alinhadas, enquanto as fibras descontínuas podem estar alinhadas, orientadas aleatoriamente ou parcialmente orientadas.

Carnio (2017) descreve o aumento da resistência mecânica do material. Entretanto, para se incrementar a resistência de maneira significativa constatou-se a necessidade de incorporar altos teores de fibras (>1% em volume) nas matrizes de concreto ocasionando perdas de

fluidez, características muito importantes para a moldagem da maioria dos elementos de construção.

Posteriormente, observou-se que era possível, com menores teores de fibras, melhorar outras propriedades, que poderiam ser úteis para sua aplicação como material de construção. Mesmo não incrementando a resistência mecânica de maneira significativa em relação à matriz de concreto sem reforço com fibras, observa-se que, mesmo com teores menores do que 1% em volume, há um aumento significativo da tenacidade; outra propriedade mecânica muito importante (CARNIO, 2017).

3.2.4 Efeito da alcalinidade da matriz de cimento Portland sobre a durabilidade das fibras de vidro tipo E

O estudo da água presente nos poros da pasta de cimento hidratada é de grande relevância para a durabilidade dos compósitos de cimento Portland reforçados com fibras de vidro tipo E, frente ao meio alcalino, pois a água livre pode reagir com os grãos anidros, com produtos hidratados, com espécies químicas externas que eventualmente penetram no interior da pasta e da fibra de vidro (PERUZZI, 2002).

Quando são utilizadas fibras de vidro do tipo E, deve-se considerar a vida útil do compósito. As fibras do tipo E têm baixa resistência ao meio alcalino da matriz de cimento Portland, o que causa a deterioração de suas propriedades mecânicas, resultando em perda de flexibilidade e resistência à tração das fibras, o que enfraquece todo o compósito. Logo, a durabilidade pode ser prejudicada devido ao consumo de álcalis provenientes da matriz cimentícia pela fibra, que por consequência enfraquece sua estrutura (RODRIGUES, 2015).

Sefundo Purnell et al.(2000), há duas alternativas para contornar a degradação das fibras de vidro em matriz cimentícia: a primeira consiste na melhoria da resistência das fibras, por meio de fibras de vidro AR (álcali resistente) ou preparo da sua superfície. A segunda alternativa é a modificação das matrizes de cimento.

Para a redução da alcalinidade da matriz cimentícia, estudos como os de Lima (2004) sugerem a substituição parcial do cimento Portland por materiais cimentícios suplementares.

Os materiais cimentícios suplementares podem ser industrializados, como, por exemplo, a escória de alto-forno, sílica ativa e cinzas volantes, e podem ser naturais como argilas vermelhas (CHENG *et al.*, 2017).

Segundo Czarnecki et al. (2010) os materiais cimentícios suplementares maximizam as propriedades da matriz, como redução da temperatura máxima durante a hidratação do cimento, redução da permeabilidade à água e da penetração de íons, melhorando o acabamento.

Logo, a matriz composta por cimento consiste em partículas discretas com diâmetros de 1 a 100 μm em mistura fresca e durante a hidratação reagem formando partículas coloidais de C-S-H (silicato de cálcio hidratado) e cristais de CH (hidróxido de cálcio). A região da matriz em torno da fibra (zona de transição) é caracterizada pela porosidade elevada, permitindo acúmulo de água com pH superior a 13 devido à presença de grandes quantidades de hidróxido de cálcio (SAVASTANO et al., 1992).

Esta natureza da mistura fresca exerce influência sobre a zona de transição, tendo como consequência a produção de espaços com água em torno das fibras (BENTUR et al., 2007).

Durante a hidratação do cimento ocorre a formação de diversos compostos. Mas na hidratação, ambos a alita e a belita formam o silicato hidratado de cálcio (C-S-H) e o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (KIHARA et al. 2005).

O hidróxido de cálcio representa de 20 a 25 % do volume de sólidos na pasta. Esses cristais não contribuem para a resistência da pasta de forma significativa, mas são responsáveis pela alcalinidade da mistura, com pH igual a 12,5 (SENNFF et al., 2005).

Para melhorar o desempenho das fibras de vidro em compósitos de cimento Portland, novas matrizes de cimento têm sido desenvolvidas, principalmente, através de adições ao cimento, tais como escória de alto forno moída, sílica ativa, cinza volante, metacaulinita ou sulfoaluminato de cálcio (PERUZZI, 2002). Essas adições têm por objetivo baixar o pH da solução dos poros e/ou reduzir ou eliminar a formação de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ durante a hidratação do cimento Portland (PURNELL et al., 2000).

3.3 PLANEJAMENTO FATORIAL ESTATÍSTICO

Em análise estatística uma série de conceitos e notações deve ser empregada. Supondo-se um experimento onde se procura verificar qual a melhor condição de adição de fibra de vidro a uma pasta de cimento, denominam-se fatores as variáveis em estudo, como teor da fibra na formulação, comprimento desta fibra, e adição de redutor de alcalinidade do meio.

Níveis são os valores dados aos fatores, como a variação do teor de fibra adicionada à pasta, para o exemplo anterior. Tratamentos são as combinações dos fatores com todos os seus níveis, ou seja, as várias combinações incluindo as diferentes comprimentos de fibra, teores de fibra e teores de cinza leve.

Variável de resposta é a propriedade ou o fenômeno que está sendo analisada, neste caso, força para ruptura por compressão diametral. Erro experimental é a variação ou flutuação de uma observação ou medida; é uma variável aleatória e não controlável ((Montgomery, 2017).

Quando uma determinada propriedade é medida, ou seja, quando dados são coletados, há sempre uma variação dos valores dos mesmos. Uma propriedade medida nunca é absoluta: uma avaliação, no caso a resistência à compressão, nunca terá exatamente o mesmo valor em todas as amostras; uma mistura, por melhor que seja efetuada, nunca terá o mesmo desempenho em todas as pastas cimentícias. É inerente a toda medição uma variação em torno de um valor central. Esta flutuação é devida a fatores não controláveis e inevitáveis, chamados de erros experimentais (BARROS NETO et al., 1995).

Assim, um conjunto de valores observados de uma propriedade ou fenômeno em estudo, denominado variável aleatória, estrutura-se segundo uma distribuição de probabilidades. Um tipo de distribuição é a normal, com média $\mu = \sum y/n$ e variância $\sigma^2 = \sum (y - \mu)^2 / (N - 1)$, onde y é um valor sendo medido e N é o número de medidas, ou seja, o número de replicações. Observa-se que, como σ^2 é obtido do somatório do quadrado de uma diferença (SS), $\sum (y - \mu)^2$ é definido em análise estatística como soma dos quadrados. O valor $N - 1$ é denominado número de graus de liberdade de SS, indicando quantos valores medidos são totalmente independentes, ou seja, sua medida não interfere na medida de outro valor ((Montgomery, 2017).

As observações, ou seja, as medidas realizadas podem ser descritas segundo um modelo estatístico de regressão linear genérico

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad \text{Equação (6)}$$

onde y é a medida realizada, μ é a média de todas as medidas, τ é a medida do efeito de uma variável de estudo e ε é a componente de erro aleatória. O efeito é a medida do desvio de um valor em relação à média geral, também sendo uma soma de quadrados, mas associada a um fator

(análise da resistência à compressão, neste caso) e não ao erro experimental.

O modelo de análise de variância a três fatores, ou para três variáveis sendo estudadas, é:

$$Y_{abcn} = \mu + \tau_a + \beta_b + \gamma_c + (\tau\beta)_{ab} + (\tau\gamma)_{ac} + (\beta\gamma)_{bc} + (\tau\beta\gamma)_{abc} + \varepsilon_{abcn}$$

Equação (7)

que é o modelo de regressão linear. O modelo de regressão quadrático é um pouco mais complexo (BARROS NETO et al., 1995).

A maneira usual de se fazer uma experimentação é pelo estudo de uma variável a cada vez: fixam-se todas as outras variáveis em determinado valor ou nível e altera-se apenas uma variável. Tal procedimento não permite a exploração das possíveis combinações de efeitos.

Se, por exemplo, no estudo da adição de fibra de vidro a uma pasta cimentícia deseja-se estudar o efeito da variação do teor de fibra adicionada ou do teor de cinza leve utilizando-se o modelo de variação de um fator por vez, não será possível avaliar qual destes fatores é predominante no resultado final, a resistência à compressão, mas apenas uma condição a cada vez.

O efeito de um fator é definido como a alteração produzida na resposta (a propriedade sendo medida) quando este fator é alterado de um valor fixo para outro. Isto é chamado efeito principal, pois se refere às variáveis iniciais sendo estudadas. No exemplo do estudo da adição de fibra à pasta de cimento, o efeito de determinado teor de adição de fibra é obtido quando se altera o mesmo de A para B, verificando-se o que ocorreu com determinada propriedade.

Como em planejamento fatorial é possível a variação de todos os fatores (as variáveis de estudo) ao mesmo tempo, se a tendência de variação do efeito de um fator B não for o mesmo de um fator A, diz-se que existe interação entre A e B; assim, quando os percentuais de duas condições A e B são alterados de x para y, se a resposta medida não tiver a mesma tendência para ambas, há interação entre A e B, chamado efeito AB (Montgomery, 2017).

Para se estudar o efeito das variáveis principais e suas interações é utilizado o planejamento fatorial completo, que prevê o efeito das interações entre todos seus fatores. Porém, o número de experimentos pode tornar-se muito elevado se houver muitos fatores ou níveis. Para

experimentos mais rápidos pode-se utilizar o planejamento fatorial fracionado, que desconsidera as interações.

Para análise dos resultados da experimentação utiliza-se a técnica de análise de variância (ANOVA). Nesta, a variação dos resultados de um experimento em relação a outro é obtida pela soma quadrática dos seus efeitos, dada por:

$$SS_T = \sum y_{abcn}^2 - \frac{(\sum y_{abcn})^2}{abcn} \quad \text{Equação (8)}$$

As somas dos quadrados para os efeitos principais são encontradas a partir dos totais dos fatores A, B e C, resultando em:

$$SS_A = \frac{(\sum y_a)^2}{bcn} - \frac{(\sum y_{abcn})^2}{abcn}; SS_B = \frac{(\sum y_b)^2}{acn} - \frac{(\sum y_{abcn})^2}{abcn} \text{ e } SS_C = \frac{(\sum y_c)^2}{abn} - \frac{(\sum y_{abcn})^2}{abcn} \quad \text{Equação (9)}$$

Para se obter as somas dos quadrados para as interações a dois fatores são necessários os totais para as células A×B, A×C e B×C (BARROS NETO et al., 1995):

$$SS_{AB} = \frac{(\sum y_{ab})^2}{cn} - \frac{(\sum y_{abcn})^2}{abcn} - SS_A - SS_B; SS_{AC} = \frac{(\sum y_{ac})^2}{bn} - \frac{(\sum y_{abcn})^2}{abcn} - SS_A - SS_C \text{ e } SS_{BC} = \frac{(\sum y_{bc})^2}{an} - \frac{(\sum y_{abcn})^2}{abcn} - SS_B - SS_C \quad \text{Equação (10)}$$

A soma dos quadrados para a interação a três fatores é dada por:

$$SS_{ABC} = \frac{(\sum y_{abc})^2}{n} - \frac{(\sum y_{abcn})^2}{abcn} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} \quad \text{Equação (11)}$$

A soma dos quadrados para o erro é encontrada subtraindo-se a soma dos quadrados relativa a cada efeito principal e cada interação da soma dos quadrados total:

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} - SS_{ABC} \quad \text{Equação (12)}$$

A significância dos efeitos em planejamento experimental é obtida pelo teste de hipóteses: como os quadrados médios são todos relacionados à variância, então a relação $MS_{\text{efeitos}}/MS_{\text{erro}}$ chamada teste F_0 é uma medida da importância da variável em estudo.

O teste é feito por comparação: o F_0 calculado é comparado a um F_0 tabelado. Com os números de graus de liberdade do numerador e do denominador da razão $MS_{\text{efeitos}}/MS_{\text{erro}}$, obtém-se um valor para $F_{0(\text{tabelado})}$, para vários graus de confiabilidade, por exemplo, 90%, 95%, 99%. Este valor é comparado ao calculado: se for menor que o calculado, $F_{0\text{calculado}} > F_{0\text{tabelado}}$, então a hipótese é verdadeira, ou seja, o fator analisado é significativo.

Os métodos de regressão são utilizados como um modelo de otimização, onde se exploram as relações existentes entre as variáveis estudadas. O modelo de regressão é ajustado aos valores medidos da propriedade em análise. A forma funcional da relação entre y, a variável medida, e os fatores estudados, normalmente é desconhecida. Assim, os modelos polinomiais são amplamente utilizados como funções de aproximação.

A utilização de planejamento experimental justifica-se porque em experimentação é necessário que a variabilidade decorrente de fontes estranhas seja sistematicamente controlada. Quando, no experimento de adição de fibra de vidro à pasta de cimento, as várias combinações são comparadas entre si, deve-se evitar que certas condições – umidade ambiente, temperatura ambiente, diferentes operadores – influam no resultado final. Como se deseja que o erro experimental seja o menor possível, ou seja, que a experimentação reflita apenas os efeitos das variáveis sendo analisadas, as variações devidas a essas fontes externas devem ser eliminadas (BARROS NETO et al., 1995).

O planejamento fatorial, como é um planejamento particionado ou em blocos, garante que as variações entre as formulações sejam eliminadas, pois cada tratamento (formulação) contém todas as variáveis sendo analisadas simultaneamente.

Como descrito anteriormente, neste estudo foi utilizado projeto fatorial completo utilizando-se três fatores (teor de fibra de vidro, teor de cinza leve, e comprimento de fibra de vidro) variados em dois níveis cada. O uso de dois níveis permite o uso de um projeto fatorial completo.

Para três fatores a dois níveis o projeto fatorial completo resulta em oito experimentos (2^3). Neste caso optou-se por uma experimentação mais completa, utilizando um ponto central, o que resulta em uma matriz

com 9 experimentos (2^{3+1}). A vantagem do uso do projeto fatorial completo reside na possibilidade de analisar as interações entre os fatores principais, mas as interações não são analisadas no caso de projeto fatorial fracionado.

No presente trabalho optou-se por um projeto fatorial do tipo (2^{3+1}), ou seja, três fatores analisados variados em dois níveis cada, com um ponto central, formando um bloco de análises com 9 experimentos.

Logo, neste trabalho utilizou-se o cimento CP V, pois produz uma maior quantidade de portlandita na sua hidratação, já que tem em sua composição aproximadamente 50 % de clíquer, que produz Ca(OH)_2 e foi utilizado a cinza volante, como forma de corrigir a alcalinidade da pasta cimentícia.

O objetivo da utilização de fibra de vidro convencional (tipo E) neste trabalho, para reforço do cimento Portland, deve-se a maior viabilidade de uso desta fibra em relação à fibra AR, e à possibilidade de estudar a compatibilidade do seu uso em pasta de cimento Portland. Assim, foi analisado o efeito da adição de fibras de vidro do tipo E em pasta de cimento Portland, sendo determinada a variação de suas propriedades físico-mecânicas em relação à pasta sem adição de fibras.

Porém, a pasta cimentícia induz a degradação da fibra de vidro devido ao ataque do meio alcalino à fibra, principalmente o hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , produzido na hidratação do cimento. Para contornar a degradação da fibra de vidro, foi utilizada a cinza volante, com o objetivo de baixar o pH da pasta cimentícia, pois, reagem com o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 aonde podem representar uma considerável diminuição do valor de pH da pasta.

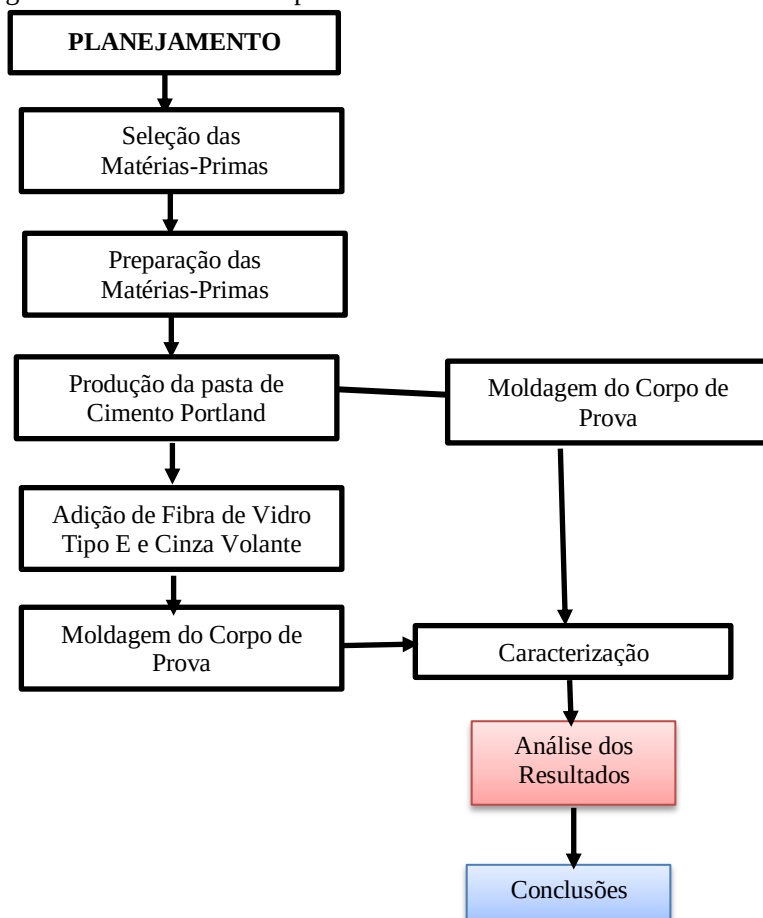
O cimento usado foi o Portland do tipo CP V ARI, que favorece a maior formação de Portlandita, pois apresenta maior teor de C_3S , que acaba se tornando um material desfavorável para a fibra de vidro. Porém, atinge alta resistência mecânica em um curto intervalo de tempo, permitindo o estudo do efeito da alcalinidade da pasta sobre as fibras.

Este trabalho visa, então, o estudo do comportamento da pasta cimentícia com adição de fibra de vidro tipo E e adição de cinza volante.

4. PROCEDIMENTO DO TRABALHO

O procedimento experimental descrito na Figura 13 apresenta os ensaios que foram realizados para caracterização do sistema compósito fibroso, para fazer a comparação das influências causadas nas matrizes em estado endurecido do teor de fibra adicionada e o efeito da cinza volante.

Figura 13: Procedimento experimental.



Fonte: Autor, 2018.

A descrição das etapas citadas pela Figura 13 é feita a seguir.

4.1. SELEÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

Conforme os dados analisados nas referências, principalmente a base de dados Scopus foi observado que não há pesquisa desenvolvida sobre a produção de pasta cimentícia, principalmente com adição de fibras. Há poucos trabalhos sobre o uso de fibras de vidro tipo E em concreto. Desta forma, os materiais utilizados para este trabalho foram o cimento Portland do tipo CP V ARI, fibra de vidro tipo E e cinza volante. A fibra de vidro foi obtida de sobras de fibra utilizadas no laboratório do Grupo de Materiais Cerâmicos da UNESC da empresa Redelease, o cimento CP V ARI foi fornecido pela empresa Imbralit, de Criciúma, SC (www.imbralit.com.br), e a cinza volante foi fornecida pela empresa Engie Brasil, de Capivari de Baixo, SC (www.engie.com.br).

4.1.1 Cimento Portland do tipo CP V ARI

O cimento utilizado nos experimentos foi o de alta resistência inicial, CP V ARI, que apresenta as propriedades físicas citadas na Tabela 10, e a análise química mostrada na Tabela 11. Os dados foram fornecidos pelo fabricante do cimento (Votorantim Cimentos Brasil, www.votorantimcimentos.com.br).

Tabela 10- Valores esperados para algumas propriedades do cimento Portland tipo CP V ARI.

Características e propriedades		Unidade	Limites
Finura	Resíduo na peneira 75 µm	%	6,0
	Área específica	m²/kg	300
Tempo de início de pega		h	1
Expansibilidade a quente		mm	5
Resistência à compressão	1 dia de idade	MPa	14,0
	3 dias de idade	MPa	24,0
	7 dias de idade	MPa	34,0

Fonte: NBR 5733, 1991.

Tabela 11- Análise química do cimento Portland tipo CP V ARI.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	CO ₂	K ₂ O	PF
CP V	19,4	5	3,4	63,8	0,74	3,1	2,0	0,57	0,44

Fonte: www.votorantimcimentos.com.br.

Optou-se por utilizar o cimento CP V ARI devido a sua rápida hidratação, apesar de sua elevada alcalinidade, pois contém grande teor de C_3S e nenhum teor de escória.

4.1.2 Cinza leve de termelétrica

A cinza leve utilizada neste trabalho foi obtida da empresa Tractebel Energia, hoje Engie do Brasil, e foi caracterizada por Sabedot et al. (2011). Para confirmar a análise de Sabedor, a Tabela 12 mostra a análise química da cinza leve. A análise química neste trabalho foi realizada por espectrometria de fluorescência de raios X e teve por objetivo identificar os óxidos presentes em cada material utilizado. Para isso, utilizou-se um espectrômetro EDS modelo S2 Ranger Bruker. As amostras foram preparadas como pérolas fundidas em tetraborato de lítio, metodologia padrão utilizada pelo laboratório da empresa Colorminas Colorifício e Mineração, onde a análise foi realizada. A cinza é composta majoritariamente por aluminossilicatos ($SiO_2 + Al_2O_3$), além de óxidos alcalinos (Na_2O e K_2O) e alcalinoterrosos (MgO e CaO), contendo também, Fe_2O_3 e TiO_2 .

Tabela 12- Análise química da cinza leve.

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	TiO_2	Na_2O	K_2O	PF
C. L.	60,8	26,3	4,4	1,8	0,42	1,2	0,12	1,5	1,4

Fonte: Autora (2019).

Com relação a seu tamanho de partículas, a cinza leve, segundo Sabedot et al. (2011), apresenta um D_{50} de 14 μm , sendo um material muito fino. 95 % de sua distribuição está abaixo de 70 μm .

4.1.3 Fibra de vidro tipo E

Foi utilizada fibra vidro do tipo E, fornecida pela empresa Redelease (www.redelease.com.br). As fibras foram obtidas de retalhos de fibra de vidro. A Tabela 13 apresenta a composição química da fibra. A análise química também foi realizada por espectrometria de fluorescência de raios X, utilizando um espectrômetro EDS modelo S2 Ranger Bruker. As amostras foram preparadas como pérolas fundidas em tetraborato de lítio, e a análise foi realizada na empresa Colorminas Colorifício e Mineração

Tabela 13- Composição fibra de vidro tipo E.

Óxido (% massa)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O+K ₂ O
Fibra de vidro tipo E	55	8	7	29	5	6

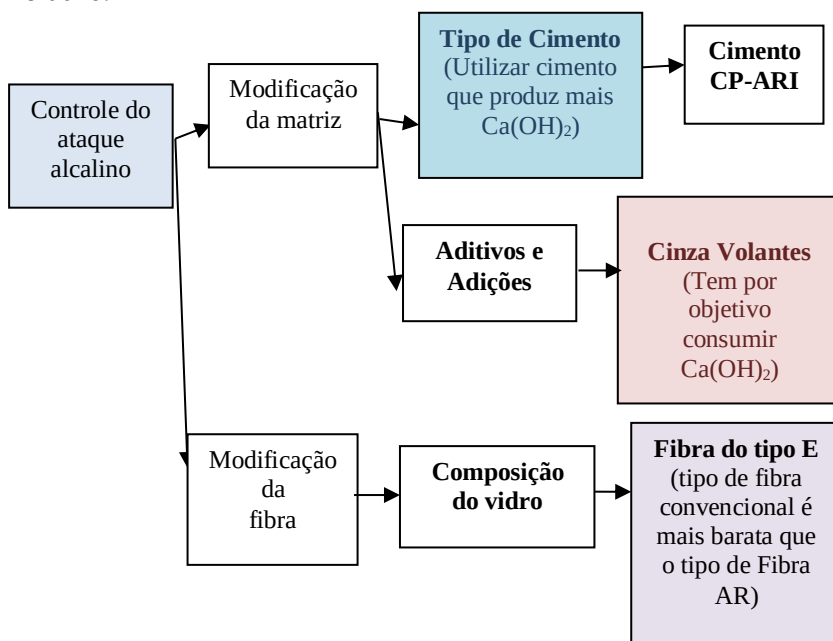
Fonte: Autota (2019).

Segundo Guimarães (2005), o tamanho da fibra, relativamente ao comprimento crítico, tem influência não só na eficiência, resistência, mas também no modo de fratura. Além, do comprimento da fibra influenciar nas propriedades do material, ele pode prejudicar na trabalhabilidade do mesmo.

Para este trabalho optou-se em adotar dois comprimentos da fibra de vidro tipo E, 0,3 e 1 cm, e um intermediário de 0,65 mm como ponto central. Para tanto, fibras de vidro obtidas de “rovings” foram cortadas nos tamanhos mencionados. Os tamanhos foram adotados em função de pesquisas preliminares realizadas pelo Grupo de Materiais Cerâmicos e trabalhos de conclusão (TCC) do curso de Engenharia Civil da UNESC. Comprimentos maiores comprometem a trabalhabilidade das pastas (não medida neste trabalho).

A Figura 14 apresenta um resumo da solução usada para este trabalho, com intuito de reduzir a alcalinidade do cimento Portland.

Figura 14- Estratégia para redução da alcalinidade da pasta de cimento Portland.



Fonte: Adaptado Autor, 2018.

A fibra de vidro tipo E tem resistência inadequada ao meio alcalino da matriz de cimento Portland, causando deterioração das propriedades mecânicas e fazendo com que a fibra de vidro convencional perca sua flexibilidade e sua resistência à tração, o que fragiliza todo o compósito (PERUZZI, 2002). Para este trabalho utilizou cinza volante para a possibilidade de evitar o ataque químico sobre à fibra de vidro.

Além do cimento tipo CP V ARI, foi utilizada a cinza volante. A cinza volante para este trabalho tem como objetivo reduzir o pH da solução e consumir o Ca(OH)_2 , pois a fibra de vidro do tipo E sofre degradação das propriedades físicas com o tempo, devido ao ataque alcalino da matriz de cimento Portland, prejudicando sua flexibilidade, tornando-a frágil.

4.1.2 Preparação da pasta de cimento Portland

4.1.2.1 Preparação da pasta e moldagem dos corpos de prova

A preparação da pasta cimentícia, moldagem dos corpos-de-prova e seu armazenamento foram realizados no laboratório do Grupo de Materiais Cerâmicos, em argamassadeira de laboratório com capacidade de 5 litros. O cimento foi utilizado como referência, em base seca. Inicialmente, 300 g de cimento foram colocados na argamassadeira. A razão cimento:água foi otimizada, até se obter o traço de 1:0,5. Este traço foi testado com adição de fibra de vidro (1% em massa) e de cinza volante (10% em massa), mostrando-se adequado para desenvolvimento de todas as pastas do planejamento experimental.

Tendo sido obtida a razão adequada cimento:água, o programa de mistura para as pastas cimentícias e compósitos foi então determinado. Após adição da alíquota de cimento, a água era adicionada, iniciando-se a mistura em baixa rotação por dois minutos em uma temperatura de 25 °C. A mistura era interrompida para remover o cimento não misturado preso à pá e em pontos mortos da cuba de mistura, sendo reiniciado o processo por mais dois minutos, em alta rotação em uma temperatura de 25 °C.

Ao final do processo, a pasta pronta era colocada em moldes de plástico com dimensões de 6 a 7 cm de altura e 3 cm de diâmetro, aproximadamente. As amostras moldadas permaneceram ao ar por 24 a 48 h, sendo então desmoldadas, obtendo-se os corpos-de-prova cilíndricos, que foram então imersos em água de acordo com a norma

NBR 5738, permanecendo assim até o ensaio de resistência mecânica, com a finalidade de evitar a evaporação da água, mantendo a pasta saturada.

A mistura da pasta de cimento com fibras de vidro seguiu o mesmo procedimento de mistura para a produção da pasta padrão. Logo, para evitar aglomeração, as fibras de vidro foram adicionadas lentamente na argamassadeira de laboratório em movimento, durante os dois minutos finais da mistura, havendo uma boa homogeneização das mesmas. A cinza leve foi adicionada juntamente com o cimento para formar a pasta.

Aos 28 dias as amostras foram retiradas da água e suas superfícies foram regularizadas por corte, resultando em amostras de 5 cm × 3 cm (altura × diâmetro) para corpos de prova submetidos ao ensaio de compressão axial, e amostras de 1 cm × 3 cm (altura × diâmetro) para corpos de prova submetidos ao ensaio de compressão diametral.

Os moldes foram selecionados de modo a produzir corpos de prova conforme a NBR 5738 (2015), que orienta os procedimentos de moldagem e cura dos mesmos, com modificações.

4.1.2.2. Compósitos de pasta de cimento Portland com adição de fibras de vidro e cinza leve

Como o objetivo do trabalho foi avaliar o efeito a adição de fibras de vidro sobre a resistência mecânica da pasta de cimento Portland, e da adição de cinza leve para reduzir a alcalinidade da mesma, foi utilizado um planejamento experimental estatístico do tipo fatorial 2^k . Os fatores do planejamento foram a adição de cinza leve (%), a adição de fibras de vidro (%) e o comprimento destas fibras (cm). Os fatores foram variados em: 0 a 10 % de cinza leve; 0,2 a 0,8 % de fibras de vidro; e fibras com 0,3 a 1 cm de comprimento, sendo estes os níveis do planejamento. Foi utilizado um ponto central, onde os níveis para os fatores são: 5 % de cinza leve, 0,5 % de fibra de vidro, com 0,65 mm de comprimento.

A Tabela 14 apresenta o planejamento experimental fatorial 2^k do sistema compósito, mostrando os fatores estudados e seus níveis.

Tabela 14- Planejamento experimental fatorial 2^k para o sistema compósito de pasta cimentícia reforçada com fibras, com adição de cinza leve (% em massa)

Compósito	Cinza leve (%)	Fibra de vidro (%)	Comprimento da fibra (mm)
1	0	0,2	0,3
2	0	0,2	1,0

3	0	0,8	0,3
4	0	0,8	1,0
5	10	0,2	0,3
6	10	0,2	1,0
7	10	0,8	0,3
8	10	0,8	1,0
9	5	0,5	0,65
Padrão	0	0	0

Fonte: Autor, 2019.

Para este estudo foram moldados 100 corpos de prova, sendo 50 cilíndricos (5 cm × 3 cm) para análise de resistência à compressão axial e 50 cilíndricos (1 cm × 3 cm) (Figura 15), para análise de resistência à tração por compressão diametral, conforme os procedimentos de moldagem previstos na ABNT NBR 5738:2003. Para cada composição do planejamento experimental fatorial foram confeccionados 10 corpos de prova. Além das nove composições do planejamento fatorial, a décima composição corresponde ao padrão, pasta de cimento Portland sem adições cinza volante e fibra.

Os corpos de prova foram desmoldados após 1 ou 2 dias e permaneceram em cura submersa em água (ABNT NBR 5738:2003) durante 30 e 60 dias para o ensaio de compressão axial e durante 60 e 120 dias para o ensaio de compressão diametral.

4.2 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO

Na Tabela 15 são apresentados os ensaios realizados para a caracterização das pastas de cimento conforme especificam as normas brasileiras.

Tabela 15- Ensaios realizados para caracterização das pastas cimentícias

Tipo de peça	Ensaio	Norma
Corpos-de-prova Cilíndricos	Densidade aparente	
Corpos-de-prova Cilíndricos	Resistência à compressão axial	ABNT NBR 5739 (2007) – Concreto – Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos

Corpos-de-prova Cilíndricos	Resistência à tração por compressão diametral	ABNT NBR 7222 (2011)- Concreto e argamassa- Determinação da Resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos
Fragmentos de amostra	Microscópio óptica (MO)	

Fonte: Autor, 2019.

4.2.1. Densidade aparente

O ensaio de determinação da densidade aparente seguiu o princípio de Arquimedes por imersão em água, que consistiu na pesagem dos corpos-de-provas no estado seco e da massa deslocada pela imersão dos mesmos em água. A densidade aparente foi determinada para os distintos corpos-de-provas com os diferentes teores de adição de fibras e cinza volante, após 60 dias de cura.

A densidade aparente foi calculada de acordo com a equação 13:

$$\rho = \frac{M_{seca} (g)}{M_{imersa} (g)} \quad \text{Equação (13)}$$

Onde ρ é a densidade aparente medida [g/cm^3]; M_{seca} é a massa dos corpos-de-prova secos [g]; e M_{imersa} é a massa de água deslocada após imersão dos corpos-de-prova [g].

4.2.2. Determinação da resistência à compressão axial

O ensaio de compressão axial (f_c) é considerado o principal ensaio de caracterização dos concretos, e é amplamente difundido no setor da construção civil, pois a partir deste se obtém o valor potencialmente característico da composição sendo ensaiada, neste caso os compósitos cimentícios, cujo resultado servirá de referência para verificação de sua eficiência. Para aquisição da resistência à compressão axial foram seguidas as orientações da ABNT NBR 5739:2007: Concreto. Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.

O ensaio de compressão axial consiste em determinar a carga máxima de ruptura suportada pelo corpo-de-prova. O corpo-de-prova é posicionado no centro da máquina para dar início à aplicação da carga. A

carga é aplicada de forma contínua até que haja uma queda na força de carregamento indicada no equipamento, a qual mostra a ruptura do corpo-de-prova, conforme a Figura 16.

Deve ser previsto um meio de indicação da máxima carga atingida, que pode ser lida após a realização de cada ensaio. As características de exatidão desta indicação devem ser idênticas às da indicação da carga instantânea (ABNT NBR 5739, 2007).

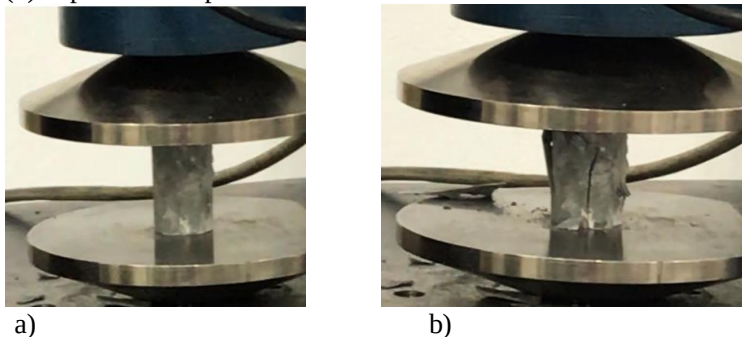
A resistência à compressão é calculada a partir da equação 14:

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

Onde: f_c é a resistência à compressão [MPa]; F é a força máxima alcançada [N]; e D é o diâmetro do corpo-de-prova [mm].

As amostras foram submetidas ao ensaio de resistência à compressão axial após a retirada do corpo-de-prova do processo de cura. Cada corpo de prova foi posicionado no centro da máquina universal de ensaios da marca EMIC modelo DL10000, sendo aplicada uma carga uniforme, contínua e sem choque com velocidade de 1 mm/s (Figura 15a), até que haja uma ruptura da amostra (Figura 15b). O andamento do ensaio foi monitorado pelo aplicativo TESC: Test Script, que fornece os recursos para leitura.

Figura 15- Ensaio de compressão axial: (a) amostra antes da compressão axial; e (b) depois da compressão axial.



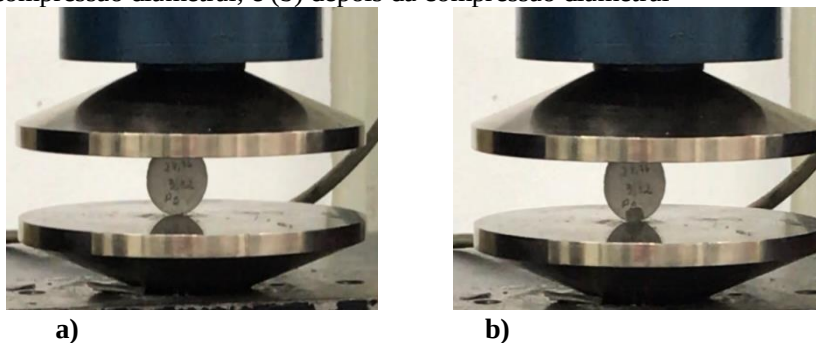
Fonte: Autor, 2019.

Foram ensaiados cinco corpos de prova para cada composição, com dimensões de 5 cm × 3 cm e idades de 30 e 60 dias.

4.2.3. Determinação da resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado de acordo com as recomendações da NBR 7222 (2011). Os corpos de prova foram posicionado diametralmente na máquina universal de ensaios da marca EMIC modelo DL10000 do Laboratório de Ensaios Mecânicos da UNESC, sendo apoiadas entre duas placas metálicas cilíndricas unidas à máquina, conforme Figura 17.

Figura 16- Ensaio de compressão diametral: (a) amostra antes da compressão diametral; e (b) depois da compressão diametral



Fonte: Autor, 2019.

Neste ensaio é aplicada uma carga continua, com crescimento constante da tensão de tração, a uma velocidade de 1 mm/s até a ruptura do corpo-de-prova. Porém, em alguns casos, dependendo do traço, há pequenas ou grandes fissuras ou o CP nem mesma chega a se romper mediante a carga máxima aplicada ao corpo-de-prova.

A resistência à compressão diametral de um corpo de prova cilíndrico foi calculada de acordo com NBR 7222 (2011), conforme a equação 15.

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

Onde $f_{ct,sp}$ é a resistência à tração por compressão diametral [MPa]; F é a força máxima obtida no ensaio [N]; d é o diâmetro do corpo-de-prova [mm] e l é a altura do corpo de prova [mm].

Para este experimento foram utilizados três corpos-de-prova para cada composição, com dimensões de 10 cm × 30 cm e idades de 60 e 120 dias.

4.2.4. Análise microestrutural

A microscopia óptica é uma das mais versáteis técnicas disponíveis para a observação e análise de características microestruturas de objetos sólidos. A principal razão de sua utilidade é a boa resolução que pode ser obtida quando as amostras são observadas, o que permite entender o comportamento do concreto, além de servir como ferramenta de análise de patologias e análise de durabilidade (DEDAVID et al., 2007).

Após os ensaios de compressão axial e diametral, amostras de fragmentos foram analisadas em um microscópio óptico marca Cooling Tech, com ampliação de até 1000 ×. As amostras foram analisadas em sua superfície de fratura.

4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados para densidade aparente e resistência à compressão axial e diametral foram analisados utilizando as ferramentas estatísticas de análise de variância (ANOVA), diagrama de Pareto e superfície de resposta, utilizando aplicativo Statistica 10 da empresa Statsoft.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para atender o objetivo proposto por este trabalho são comparados os resultados dos ensaios mecânicos e físico, realizados com corpos-de-prova de pasta de cimento de referência e pasta de cimento reforçado com fibras de vidro E, com adição de cinza leve. São analisados o comportamento das amostras (corpos-de-prova) com três teores de adição de fibras de vidro, 0,2, 0,5 e 0,8 %, com adição de 0, 5 e 10 % de cinza leve, variando o comprimento da fibra em 0,3, 0,65 e 1 cm.

O cimento Portland, a fibra de vidro e a cinza leve não foram caracterizados neste trabalho, sendo utilizadas as descrições de propriedades ou dos fabricantes (cimento Portland e fibra de vidro), ou de outros trabalhos (cinza leve). A caracterização destes materiais é descrita na seção 4.1., Seleção das matérias-primas.

A seguir, são descritos os resultados para a densidade aparente, resistência à compressão axial e resistência à compressão diametral, com o devido tratamento estatístico dos dados. A análise dos resultados é finalizada com a análise microestrutural das amostras.

5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

O ensaio da resistência à compressão axial (f_c) foi realizado conforme as orientações da norma ABNT NBR 5739:2007: Concreto. Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Apesar de não ser norma específica para pastas de cimento, esta norma foi seguida por ser padrão para a engenharia civil.

Para este ensaio foi estudado o comportamento da pasta de cimento variando-se a concentração de fibra de vidro tipo E (FV), o comprimento da fibra (CF) e a adição de cinza leve (CL), comparando-se os resultados com a pasta de cimento de padrão (sem adição de fibra e cinza leve). Os resultados da resistência à compressão axial foram obtidos nas idades de 30 e 60 dias em cura saturada em água, sendo ensaiados 5 corpos-de-prova cilíndricos para cada composição (1 a 9), e foi ensaiada a pasta de cimento sem adição de fibra nem cinza leve (referência), conforme apresenta a Tabela 16.

Tabela 16: Resistência à compressão axial (f_c , MPa) aos 30 dias de cura, onde CL: cinza leve, FV: fibra de vidro, CF: comprimento da fibra, desvio padrão d.p

Comp.	% CL	% FV	CF (cm)	f_c (MPa) 30 dias	d.p. (MPa)
1	0,0	0,2	0,3	30,3	4,4
2	0,0	0,2	1,0	23,0	3,5
3	0,0	0,8	0,3	43,3	6,1
4	0,0	0,8	1,0	23,1	4,1
5	10	0,2	0,3	29,2	6,9
6	10	0,2	1,0	26,3	4,1
7	10	0,8	0,3	22,4	3,7
8	10	0,8	1,0	24,8	6,0
9	5,0	0,5	0,65	26,4	6,3
Ref.	0,0	0,0	0,0	23,8	5,2

Fonte: Autor, 2019.

A Tabela 16 mostra a variação dos valores de resistência à compressão de cada compósito estudado aos 30 dias de cura. Observou-se que a média de resistência à compressão axial das composições 2, 4 e 7 é inferior à da pasta padrão, e as composições 1, 3, 5, 6, 8 e 9 resultam em melhores resultados, aos 30 dias de cura.

Analizando-se os resultados da Tabela 16 percebe-se que aos 30 dias de cura a resistência à compressão axial da matriz, quando reforçada com 0,8 % de fibra de vidro tipo E com comprimento de 0,3 cm (composição 3), teve um aumento de aproximadamente 82 % (43,3 MPa) em relação à resistência da referência sem adição de fibra ou cinza leve (23,8 MPa). Em contrapartida, a adição de 10 % de cinza leve nestas mesmas condições, adição de 0,8 % de fibra de vidro com 0,3 cm de comprimento, composição 7, reduziu a resistência à compressão axial aos 30 dias de cura em 5,9 % (22,4 MPa). O coeficiente de variação dos resultados para cada composição variou de 11,5 a 32,1 %.

Foi possível constatar que o compósito com adição de cinza leve em suas primeiras idades (30 dias) teve menores resultados à compressão, portanto, a quantidade de fibras adicionada na pasta e o comprimento da fibra tem influência na sua resistência inicial, pois, na maioria dos casos, notou-se um aumento na resistência à compressão.

Para analisar o efeito da adição de cinza leve e fibra de vidro à pasta de referência, além do comprimento das fibras, foi realizada uma análise estatística dos resultados obtidos na Tabela 17. A Tabela 17 apresenta a análise de variância para os resultados de resistência à compressão axial aos 30 dias de cura.

Tabela 17-. ANOVA para a resistência à compressão axial aos 30 dias de cura ($R^2 = 0,832$).

fc 30 dias	SS	df	MS	F	p
(1) % cinza leve	53,56	1	53,56	1,764	0,315
(2) % fibra vidro	17,11	1	17,11	0,5635	0,531
(3) comp. fibra	152,3	1	152,3	5,014	0,155
% cinza × % fibra	26,28	1	26,28	0,8655	0,45
% cinza × comp fibra	50,5	1	50,5	1,663	0,326
% fibra × comp fibra	1,901	1	1,901	0,06261	0,825
Erro	60,73	2	30,37		
Total SS	362,3	8			

Fonte: Autor, 2019.

A análise dos resultados da ANOVA para a resistência à compressão axial aos 30 dias de cura, Tabela 17, mostra que a confiabilidade dos resultados, dada pelo valor de p, não é alta, mas percebe-se a maior influência do comprimento de fibra nos resultados (maior valor de F). Desta forma, uma nova análise de variância foi realizada, excluindo-se os maiores valores de p (que correspondem aos menores valores de F, ver Tabela 17), ou seja, o % de fibra de vidro adicionada e a interação entre o % de fibra e o comprimento de fibra. A Tabela 18 mostra a ANOVA para esta nova condição.

Tabela 18- ANOVA para a resistência à compressão axial aos 30 dias de cura, com exclusão de alguns fatores ($R^2 = 0,841$)

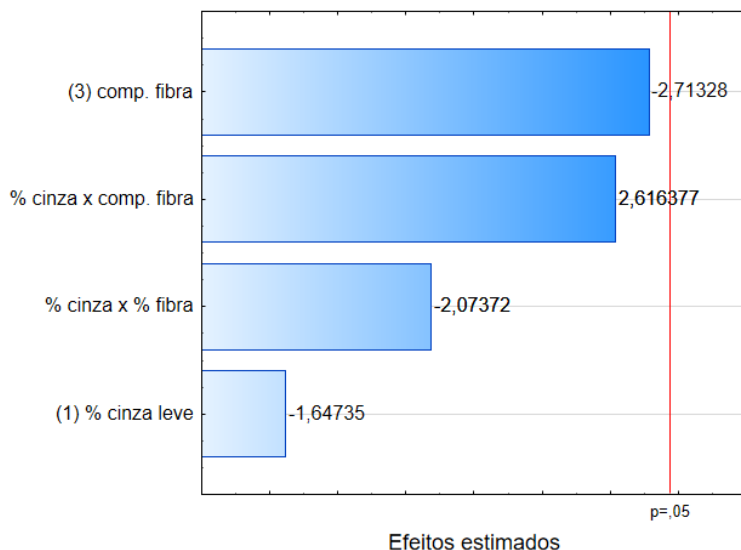
fc 30 dias	SS	df	MS	F	p
(1) % cinza leve	36,13	1	36,13	2,714	0,175
(3) comp. fibra	98	1	98	7,362	0,0534
% cinza × % fibra	57,25	1	57,25	4,3	0,107
% cinza × comp fibra	91,13	1	91,13	6,845	0,059
Erro	53,25	4	13,31		
Total SS	335,7	8			

Fonte: Autor, 2019.

Sem a influência do % de fibra de vidro adicionada e sem a interação entre o % de fibra de vidro e seu comprimento, os fatores comprimento de fibra de vidro e a interação entre o % de cinza leve adicionada e o comprimento da fibra resultam em confiabilidade de ~95 % sobre a resistência à compressão axial aos 30 dias de cura. A Figura 17 mostra o gráfico de Pareto para o experimento. Percebe-se que os fatores comprimento de fibra e a interação entre o % de cinza leve e o

comprimento de fibra são os de maior significância para a resistência à compressão axial aos 30 dias.

Figura 17- Gráfico de Pareto para a resistência à compressão axial aos 30 dias de cura

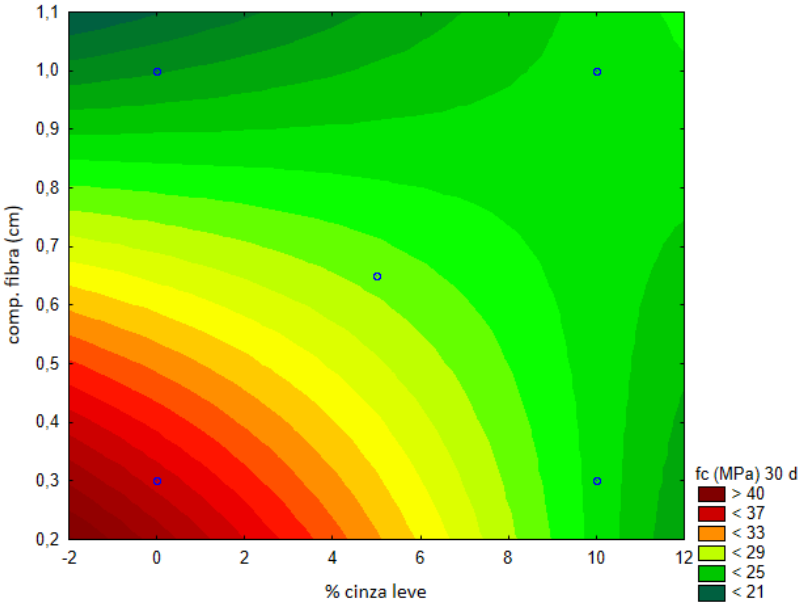


Fonte: Autor, 2019.

A Figura 18 mostra a superfície de resposta para a resistência à compressão axial aos 30 dias de cura, em função do comprimento da fibra de vidro e do % de cinza leve adicionada.

Como se pode perceber, os maiores valores de resistência à compressão axial (f_c) aos 30 dias de cura são obtidos para as composições sem adição de cinza leve e para o menor comprimento de fibra.

Figura 18- Superfície de resposta para a resistência à compressão axial aos 30 dias de cura, em função do comprimento da fibra de vidro e do % de cinza leve adicionada



Fonte: Autor, 2019.

A Tabela 19 mostra a resistência à compressão axial, f_c , aos 60 dias de cura, em função das adições de cinza leve e fibra de vidro e do comprimento da fibra de vidro.

Tabela 19- Resistência à compressão axial (f_c , MPa) aos 60 dias de cura, onde CL: cinza leve, FV: fibra de vidro, CF: comprimento da fibra

Comp.	% CL	% FV	CF (cm)	f_c (MPa) 60 dias	d.p. (MPa)
1	0,0	0,2	0,30	31,7	6,1
2	0,0	0,2	1,00	25,3	5,4
3	0,0	0,8	0,30	20,5	6,6
4	0,0	0,8	1,00	25,3	6,3
5	10,0	0,2	0,30	37,4	9,2
6	10,0	0,2	1,00	33,4	6,0
7	10,0	0,8	0,30	35,9	4,1
8	10,0	0,8	1,00	30,5	9,8
9	5,0	0,5	0,65	38,4	7,1
Ref.	0,0	0,0	0,00	28,4	6,3

Fonte: Autor, 2019.

A Tabela 19 mostra a variação dos valores de resistência à compressão de cada compósito estudado aos 60 dias de cura. Neste caso, a média de resistência à compressão axial das composições 2, 3 e 4 é inferior à da pasta padrão, e as composições 1, 5, 6, 7, 8 e 9 resultam em melhores resultados, aos 60 dias de cura.

Analisando-se os resultados da Tabela 19 percebe-se que a resistência à compressão da matriz reforçada com 0,2 % de fibra de vidro tipo E, com comprimento de 0,3 cm e com adição de cinza leve (composição 5), resultou em um aumento de aproximadamente 32 % (37,4 MPa) em relação à resistência da referência sem adição de fibra ou cinza leve (28,4 MPa), aos 60 dias de cura. E justamente a composição que apresentou a maior resistência mecânica em relação à referência aos 30 dias, a composição 3, sem adição de cinza leve e com adição de 0,8 % de fibra de vidro com 0,3 cm de comprimento, reduziu a resistência à compressão axial aos 60 dias de cura em 28 % (20,5 MPa). Este valor representa apenas 47 % do f_c da mesma composição aos 30 dias, forte indício de que houve ataque das fibras de vidro pela natureza alcalina da pasta de cimento Portland.

Para analisar o efeito da adição de cinza leve e fibra de vidro à pasta de referência, além do comprimento das fibras, foi realizada uma análise estatística dos resultados obtidos na Tabela 20. A Tabela 20 apresenta a análise de variância para os resultados de resistência à compressão axial aos 60 dias de cura.

Tabela 20- ANOVA para a resistência à compressão axial aos 60 dias de cura ($R^2 = 0,726$)

fc 60 dias	SS	df	MS	F	p
(1) % cinza leve	147,9	1	147,9	3,5833	0,199
(2) % fibra vidro	30,42	1	30,42	0,7369	0,481
(3) comp. fibra	15,13	1	15,13	0,3664	0,607
% cinza × % fibra	5,780	1	5,780	0,1400	0,744
% cinza × comp fibra	7,610	1	7,610	0,1842	0,710
% fibra × comp fibra	12,01	1	12,01	0,2990	0,644
Erro	82,57	2	41,28		
Total SS	301,4	8			

Fonte: Autor, 2019.

A análise dos resultados da ANOVA para a resistência à compressão axial aos 60 dias de cura, Tabela 20, mostra que a confiabilidade dos resultados, dada pelo valor de p , não é alta, mas

percebe-se a maior influência do % de cinza leve adicionada nos resultados (valor de F). Desta forma, uma nova análise de variância foi realizada, excluindo-se os maiores valores de p (menores valores de F), ou seja, as interações. A Tabela 21 mostra a ANOVA para esta nova condição.

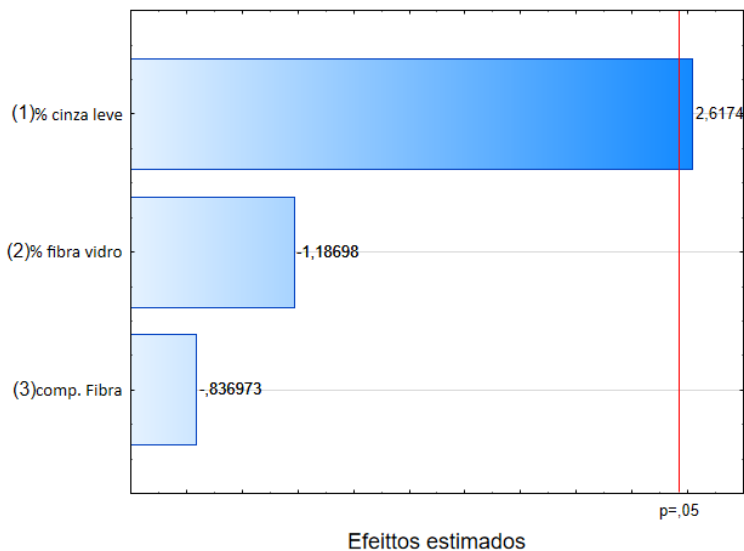
Tabela 21- ANOVA para a resistência à compressão axial aos 60 dias de cura, sem as interações ($R^2 = 0,642$)

fc 60 dias	SS	df	MS	F	p
(1) % cinza leve	147,9	1	147,9	6,851	0,0472
(2) % fibra vidro	30,42	1	30,42	1,409	0,289
(3) comp. fibra	15,13	1	15,13	0,7	0,441
Erro	108	5	21,59		
Total SS	301,4	8			

Fonte: Autor, 2019.

Sem a influência das interações, o % de cinza leve adicionada resultou em confiabilidade maior que 95 % para a resistência à compressão axial aos 60 dias de cura. A Figura 19 mostra o gráfico de Pareto para o experimento. Percebe-se claramente que o % de cinza leve tem a maior significância para a resistência à compressão axial aos 60 dias de cura.

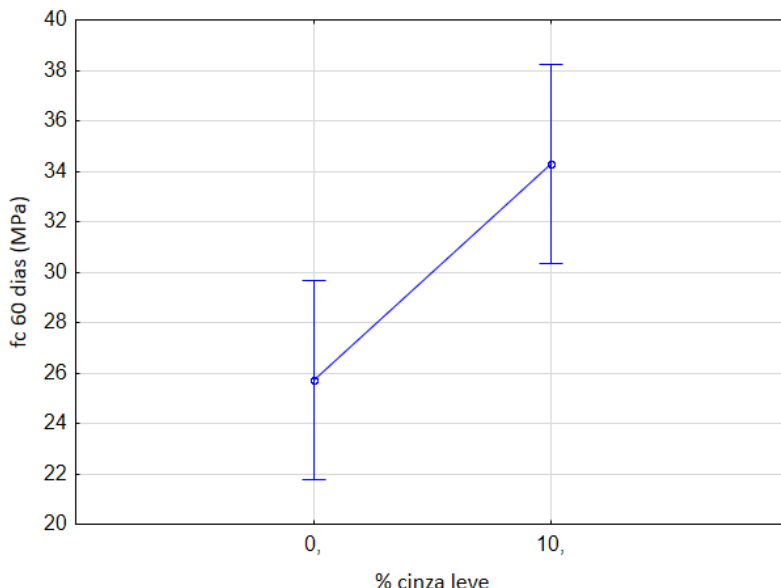
Figura 19- Gráfico de Pareto para a resistência à compressão axial aos 60 dias de cura



Fonte: Autor, 2019.

A Figura 20 mostra o gráfico de médias para a resistência à compressão axial aos 60 dias de cura, em função do % de cinza leve adicionada. Neste caso o gráfico de médias é utilizado para a análise estatística em função de haver apenas um fator significativo para a resistência à compressão axial aos 60 dias de cura.

Figura 20-. Gráfico de médias para a resistência à compressão axial aos 60 dias de cura, em função do % de cinza leve adicionada



Fonte: Autor, 2019.

Como se pode perceber, os maiores valores de resistência à compressão axial aos 60 dias de cura são obtidos para as composições com adição de cinza leve.

Aos 60 dias de idade notou-se que os compósitos com cinza leve tiveram um aumento significativo na sua resistência à compressão axial em comparação com a composição de referência, sem adições. Tome-se como exemplo a composição 3 – sem adição de cinza leve, 0,8 % de adição de fibra de vidro, fibras com 0,3 cm de comprimento. Aos 30 dias esta composição apresentou f_c de 43,3 MPa, e aos 60 dias seu f_c foi de 20,5 MPa, uma redução de resistência à compressão axial de 53 %. Em contrapartida, a composição 7 – 10 % de adição de cinza leve, 0,8 % de adição de fibra de vidro, fibras com 0,3 cm de comprimento – apresentou f_c aos 30 dias de 22,4 MPa e de 35,9 MPa aos 60 dias de cura, um indício claro do efeito da cinza leve sobre a resistência à compressão axial dos compósitos, provavelmente efeito da redução da alcalinidade das pastas, e assim redução do ataque alcalino sobre as fibras de vidro. Os compósitos (composições) sem adição de cinza leve (1, 2, 3 e 4) não apresentaram um aumento significativo na resistência.

Portanto, observando a Tabela 19, percebe-se que o teor de fibra de vidro é praticamente independente para o ensaio de resistência à compressão axial. Segundo estudos a adição de fibras ao concreto não altera a resistência à compressão, pois, segundo Armelin (1992), o ensaio de resistência à compressão é avaliado de modo indireto.

A pasta reforçada com fibra de vidro tipo E com melhor resultado à compressão axial, em relação à pasta de referência, foi o ponto central (composição 9), com f_c de 38,4 MPa aos 60 dias. Segundo Mehta e Monteiro (2008), quando adições minerais são utilizadas como substituição parcial do cimento, há uma tendência de retardar a resistência nas primeiras idades. Porém, a adição do mineral cinza leve possibilita a correção da alcalinidade da pasta cimentícia, pois a fibra de vidro do tipo E apresenta uma inadequada resistência química ao meio alcalino da matriz de cimento Portland, causando uma deterioração das propriedades mecânicas e fazendo com que a fibra de vidro tipo E perca sua flexibilidade e sua resistência à tração, o que enfraquece todo o compósito.

É possível observar na Tabela 21, que a utilização do mineral cinza leve pode ter melhorado as propriedades da zona de transição na idade de 60 dias, consequentemente diminuído a porosidade uma vez que houve uma tendência de aumento da resistência à tração das misturas com 10 % de adição da cinza leve (38,4 MPa, composição 9), superando o resultado obtido para a pasta de referência (28,4 MPa).

5.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado conforme as orientações da norma ABNT NBR 7222:2011: Concreto e argamassa. Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Apesar de ser uma norma para ensaio de concreto e argamassa, foi utilizado para as pastas e compósitos deste trabalho, por ser um padrão na engenharia civil para determinação da resistência à tração de corpos-de-prova.

Este ensaio seguiu o mesmo procedimento de estudo dos experimentos para resistência à compressão axial, variando-se a concentração de fibra de vidro tipo E (FV), o comprimento da fibra (CF) e a adição de cinza leve (CL), comparando os resultados com a pasta de cimento de referência (sem adição de fibra e cinza leve). Para obtenção dos resultados da resistência à compressão diametral foram estudadas duas condições de cura, 60 e 120 dias de idade, sendo ensaiados 5 corpos-de-prova cilíndricos para cada composição (1 a 9) e para a pasta de

cimento sem adição de fibra e cinza leve (referência), conforme mostra a Tabela 22

Tabela 22: Resistência à compressão diametral (fd, MPa) aos 60 dias de cura, onde CL: cinza leve, FV: fibra de vidro, CF: comprimento da fibra

Comp.	% CL	% FV	CF (cm)	fd (MPa) 60 dias	d.p.
1	0,0	0,2	0,3	4,17	0,47
2	0,0	0,2	1,0	5,47	0,38
3	0,0	0,8	0,3	5,24	0,90
4	0,0	0,8	1,0	5,75	1,13
5	10,0	0,2	0,3	4,61	0,64
6	10,0	0,2	1,0	3,70	0,81
7	10,0	0,8	0,3	6,31	2,13
8	10,0	0,8	1,0	4,56	0,39
9	5,0	0,5	0,65	4,44	0,68
Ref.	0,0	0,0	0,0	3,69	0,94

Fonte: Autor, 2019.

Analisando-se a Tabela 22, todas as composições apresentam valores de resistência à compressão diametral maiores, aos 60 dias de cura, que a composição de referência, sem adições. A resistência à compressão diametral da matriz reforçada com 0,8 % de fibra de vidro tipo E, com comprimento de 0,3 cm e com adição de cinza leve (composição 7), resultou em um aumento de aproximadamente 71 % (6,31 MPa) em relação à resistência à tração da referência sem adição de fibra ou cinza leve (3,69 MPa), aos 60 dias de cura. Em contrapartida, a composição 6, com adição de cinza leve e com adição de 0,2 % de fibra de vidro com 1,0 cm de comprimento, apresentou o menor aumento da resistência à tração por compressão diametral aos 60 dias de cura, apenas 0,3 % (3,7 MPa).

Para analisar o efeito da adição de cinza leve e fibra de vidro à pasta de referência, além do comprimento das fibras, foi realizada uma análise estatística dos resultados obtidos. A Tabela 23 apresenta a análise de variância para os resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 60 dias de cura.

Tabela 23-. ANOVA para a resistência à tração por compressão diametral aos 60 dias de cura ($R^2 = 0,999$)

fdk 60 dias	SS	df	MS	F	p
Curvatura	0,2556	1	0,2556	818	0,0223
(1) % cinza leve	0,2628	1	0,2628	841	0,0219
(2) % fibra vidro	1,911	1	1,911	6115	0,00814

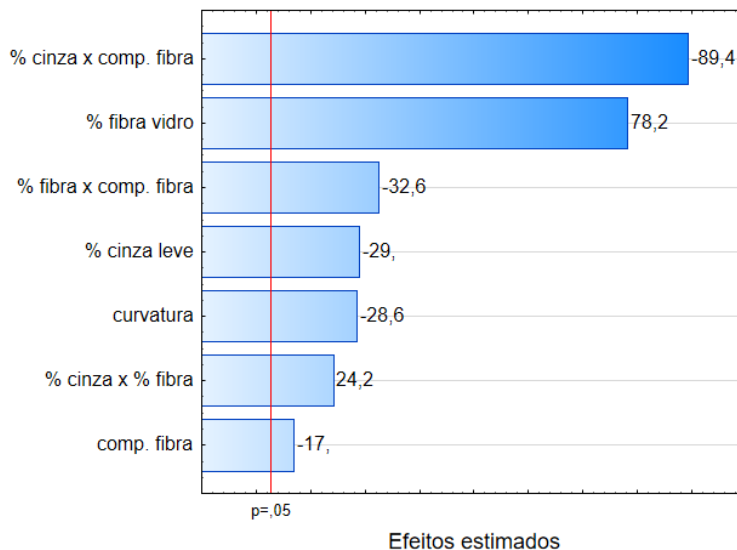
(3) comp. fibra	0,09031	1	0,09031	289	0,0374
% cinza × % fibra	0,183	1	0,183	585,6	0,0263
% cinza × comp fibra	2,498	1	2,498	7992	0,00712
% fibra × comp fibra	0,3321	1	0,3321	1063	0,0195
Erro	0,000313	1	0,000313		
Total SS	5,533	8			

Fonte: Autor, 2019.

Todos os fatores analisados, mais a curvatura, resultaram em confiabilidade maior que 95 % para a resistência à tração por compressão diametral aos 60 dias de cura. A Figura 21 mostra o gráfico de Pareto para o experimento. Percebe-se claramente que a interação entre o % de cinza leve adicionada e o comprimento da fibra de vidro, além do % de fibra de vidro tiveram a maior significância para a resistência à tração por compressão diametral aos 60 dias de cura.

Aqui devem ser ressaltados dois pontos: a adição de fibra de vidro aumenta a resistência à tração dos compósitos, o que pode ser observado pelo valor positivo do coeficiente para este fator (78,2); e há efeito da curvatura no experimento, ou seja, há forte interação quadrática entre os fatores do experimentos, dada pelo valor da curvatura, reduzindo a resistência à tração do sistema compósito (valor negativo do coeficiente para este fator, -28,6).

Figura 21- Gráfico de Pareto para a resistência à tração por compressão diametral aos 60 dias de cura

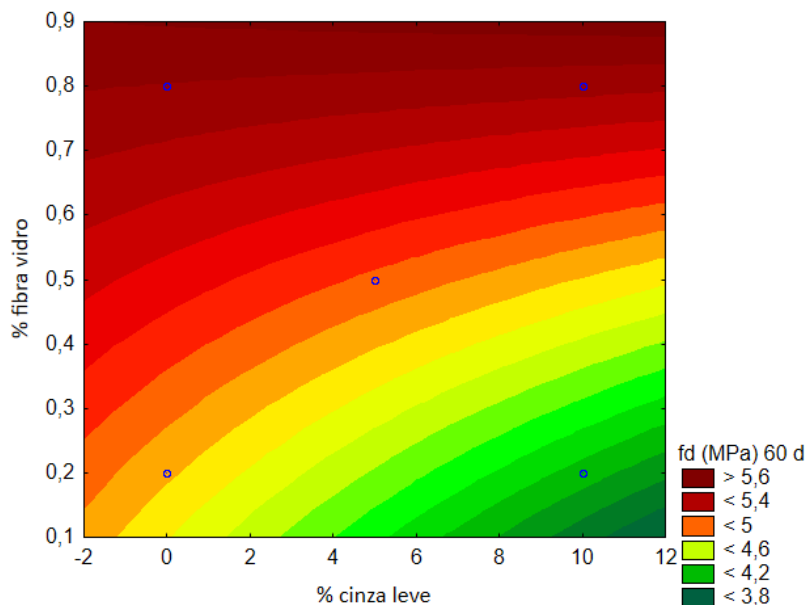


Fonte: Autor, 2019.

A Figura 22 mostra o gráfico de superfície de resposta para a resistência à tração por compressão diametral aos 60 dias de cura, em função do % de cinza leve e do % de fibra de vidro adicionadas.

Neste caso, os menores valores de resistência à tração são para as composições (compósitos) com nenhuma adição de cinza leve e menor adição de fibra de vidro. Este resultado concorda com os valores experimentais obtidos, onde a pasta de referência, sem adições, apresenta o menor valor de resistência à tração. Os maiores valores de resistência à tração tendem a maior adição de fibra de vidro, de maneira quase independente da adição de cinza leve, Figura 22.

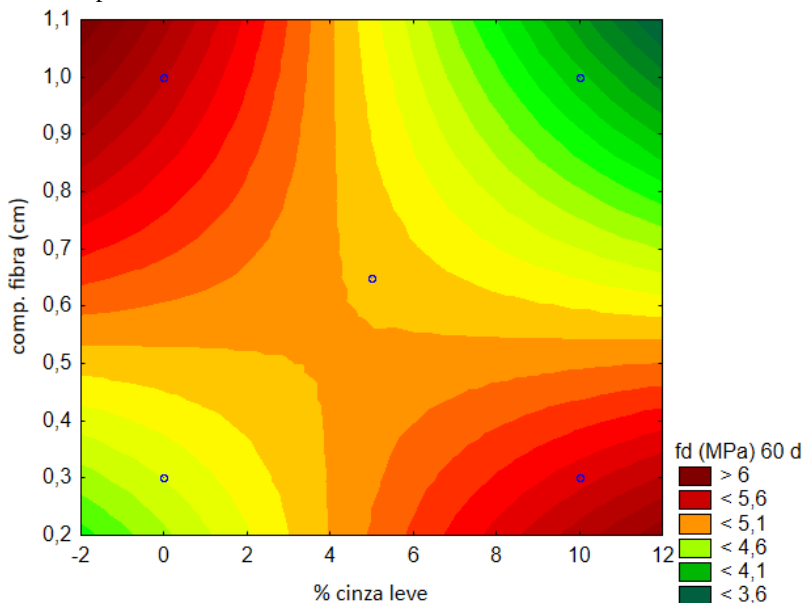
Figura 22- Superfície de resposta para a resistência à tração por compressão diametral aos 60 dias de cura, em função do % de cinza leve e do % de fibra de vidro adicionadas



Fonte: Autor, 2019.

No caso da resistência à tração em função da adição da cinza leve e do comprimento da fibra de vidro, Figura 23, o valor da resistência assume um comportamento em sela. Os maiores valores de resistência à tração ocorrem para a combinação de menor teor de cinza leve adicionada e maior comprimento de fibra de vidro, ou maior % de cinza leve e menor comprimento de fibra. Deve ser enfatizado que esta interação foi a de maior significância estatística neste experimento (99,3 %).

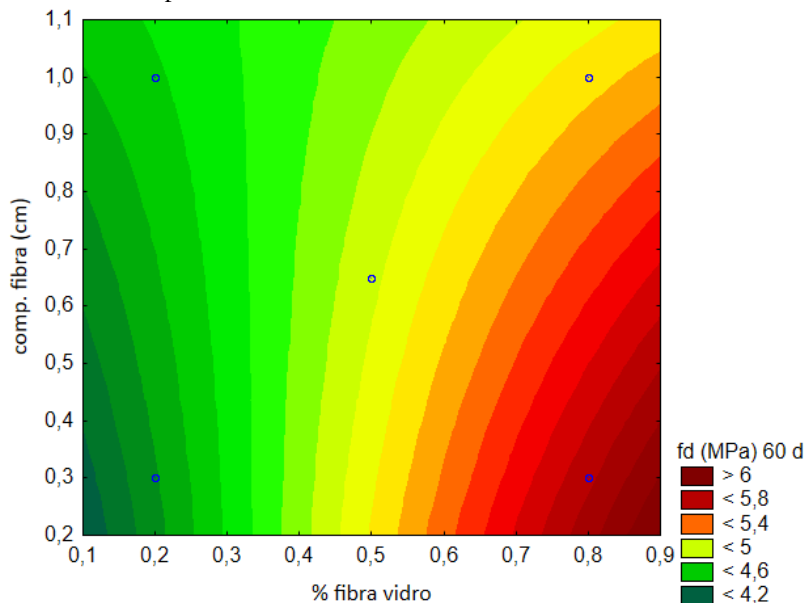
Figura 23- Superfície de resposta para a resistência à tração por compressão diametral aos 60 dias de cura, em função do % de cinza leve e do comprimento da fibra de vidro adicionada



Fonte: Autor, 2019.

Finalmente, a Figura 24 mostra a resistência à tração por compressão diametral aos 60 dias de cura em função do % de fibra de vidro adicionada e de seu comprimento. Neste caso, os maiores valores de resistência à tração são obtidos para o maior teor de fibra de vidro adicionada, 0,8 % em massa, e para o menor comprimento da fibra, 0,3 cm.

Figura 24- Superfície de resposta para a resistência à tração por compressão diametral aos 60 dias de cura, em função do % de fibra de vidro e do comprimento da fibra de vidro



Fonte: Autor, 2019.

As composições com adição de fibras e sem adição mineral de cinza leve apresentam aumento da resistência à tração em função do comprimento da fibra. Por exemplo, a composição 1, sem adição de cinza leve e com adição de 0,2 % de fibra de vidro com comprimento de 0,3 cm tem fdk de 4,2 MPa; em contrapartida, a composição 3, sem adição de cinza leve e com adição de 0,8 % de fibra de vidro com 0,3 cm comprimento tem fdk de 5,2 MPa, um incremento de 20 % na resistência à tração.

A adição da cinza leve causa o mesmo efeito: a composição 5, com adição de cinza leve e com adição de 0,2 % de fibra de vidro com comprimento de 0,3 cm tem fdk de 4,6 MPa; a composição 7, com adição de cinza leve e com adição de 0,8 % de fibra de vidro com 0,3 cm comprimento tem resistência à tração por compressão diametral de 6,3 MPa, um incremento de 37 % na resistência à tração. Comparando-se as tendências, há efeito da adição da cinza leve sobre a resistência à tração das fibras.

Porém, apesar de apresentar um intervalo de resistência à tração, a média amostral dos valores de cada composição mostrou uma tendência de ganho de resistência. O aumento da resistência à tração das composições é um resultado importante, pois mostra um ganho significativo de resistência à fratura das peças quando as mesmas forem submetidas a esforços de compressão (LOPES, 2011).

Os coeficientes de variação apresentaram valores baixos, menor que 50 % mostrando que os valores das resistências à tração encontrados são homogêneos e que a média das resistências para cada composição é representativa (LOPES, 2011).

Segundo, Claesson et al. (2002), o ensaio de compressão diametral, possibilita obter a resistência à tração por meio de uma compressão no plano diametral, ou seja, o plano de ruptura vertical de simetria da peça cilíndrica.

Carnio (2009) descreve que a resistência à tração do material é menor do que a sua resistência à compressão, assim, podendo-se dizer que é da ordem de 10 a 15 vezes menor do que a resistência à compressão, logo, a pasta cimentícia tende a fraturar por tração, pois resiste bem a tensões de compressão.

Assim, como se pode observar na Tabela 22, houve um aumento na resistência à compressão diametral aos 60 dias de cura, consequentemente houve também um aumento na sua resistência à tração.

A Tabela 25 mostra a resistência à tração por compressão diametral, aos 120 dias de cura, em função das adições de cinza leve e fibra de vidro e do comprimento da fibra de vidro.

Tabela 25- Resistência à compressão diametral (fd, MPa) aos 120 dias de cura, onde CL: cinza leve, FV: fibra de vidro, CF: comprimento da fibra

Comp.	% CL	% FV	CF (cm)	fd (MPa) 60 dias	d.p.
1	0,00	0,20	0,30	4,97	1,22
2	0,00	0,20	1,00	4,56	1,84
3	0,00	0,80	0,30	4,13	1,79
4	0,00	0,80	1,00	2,88	1,10
5	10,00	0,20	0,30	3,88	2,26
6	10,00	0,20	1,00	3,91	0,92
7	10,00	0,80	0,30	2,05	1,14
8	10,00	0,80	1,00	3,29	0,66
9	5,00	0,50	0,65	4,33	1,28
Ref.	0,00	0,00	0,00	4,60	0,90

Fonte: Autor, 2019.

De acordo com a Tabela 25, todas as composições apresentam valores de resistência à compressão diametral maiores, aos 120 dias de cura, que a composição de referência, sem adições. A resistência à compressão diametral da matriz reforçada com 0,8 % de fibra de vidro tipo E, com comprimento de 0,3 cm e com adição de cinza leve (composição 7), resultou em um aumento de aproximadamente 71 % (6,31 MPa) em relação à resistência à tração da referência sem adição de fibra ou cinza leve (3,69 MPa), aos 60 dias de cura. Em contrapartida, a composição 6, com adição de cinza leve e com adição de 0,2 % de fibra de vidro com 1,0 cm de comprimento, apresentou o menor aumento da resistência à tração por compressão diametral aos 60 dias de cura, apenas 0,3 % (3,7 MPa).

Para analisar o efeito da adição de cinza leve e fibra de vidro à pasta de referência, além do comprimento das fibras sobre a resistência à compressão diametral das amostras aos 120 dias de cura, foi realizada uma análise estatística dos resultados obtidos. A Tabela 26 apresenta a análise de variância para os resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 120 dias de cura.

Tabela 26- ANOVA para a resistência à tração por compressão diametral aos 120 dias de cura ($R^2 = 0,867$)

fdk 60 dias	SS	df	MS	F	p
Curvatura	0,343	1	0,343	0,653	0,567
(1) % cinza leve	1,454	1	1,454	2,767	0,345
(2) % fibra vidro	3,088	1	3,088	5,878	0,249
(3) comp. fibra	0,019	1	0,019	0,0362	0,88
% cinza × % fibra	0,00061	1	0,00061	0,00117	0,978
% cinza × comp fibra	1,073	1	1,073	2,0428	0,389
% fibra × comp fibra	0,0171	1	0,0171	0,0326	0,886
Erro	0,525	1	0,525		
Total SS	6,519	8			

Fonte: Autor, 2019.

A análise dos resultados da ANOVA para a resistência à compressão diametral aos 120 dias de cura, Tabela 26, mostra que a confiabilidade dos resultados, dada pelo valor de p, não é alta, mas percebe-se a maior influência do % de fibra de vidro e do % de cinza leve adicionada nos resultados (valores de F), além da interação entre o % de cinza leve e o comprimento da fibra. Desta forma, uma nova análise de variância foi realizada, excluindo-se os maiores valores de p (menores valores de F), ou seja, o comprimento da fibra, isoladamente, e as

interações % cinza $\times$ % fibra e % fibra $\times$ comprimento da fibra. A Tabela 27 mostra a ANOVA para esta nova condição.

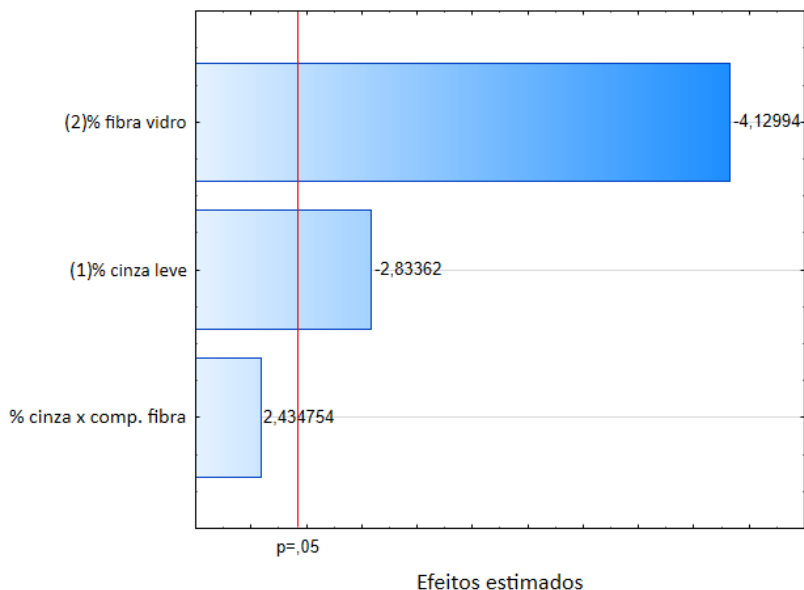
Tabela 27- ANOVA para a resistência à compressão diametral aos 120 dias de cura, sem alguns fatores ($R^2 = 0,861$)

fc 60 dias	SS	df	MS	F	p
(1) % cinza leve	1,454	1	1,454	8,029	0,0365
(2) % fibra vidro	3,088	1	3,088	17,056	0,0091
% cinza $\times$ comp fibra	1,073	1	1,073	5,928	0,059
Erro	0,905	5	0,181		
Total SS	6,519	8			

Fonte: Autor, 2019.

Sem a influência do efeito do comprimento da fibra, isoladamente, e das interações % cinza $\times$ % fibra e % fibra $\times$ comprimento da fibra, o % de cinza leve e o % de fibra de vidro adicionadas resultaram em confiabilidade maior que 95 % para a resistência à compressão diametral aos 120 dias de cura. A Figura 25 mostra o gráfico de Pareto para o experimento. Percebe-se claramente que o % de cinza leve e o % de fibra de vidro têm a maior significância para a resistência à compressão diametral aos 120 dias de cura.

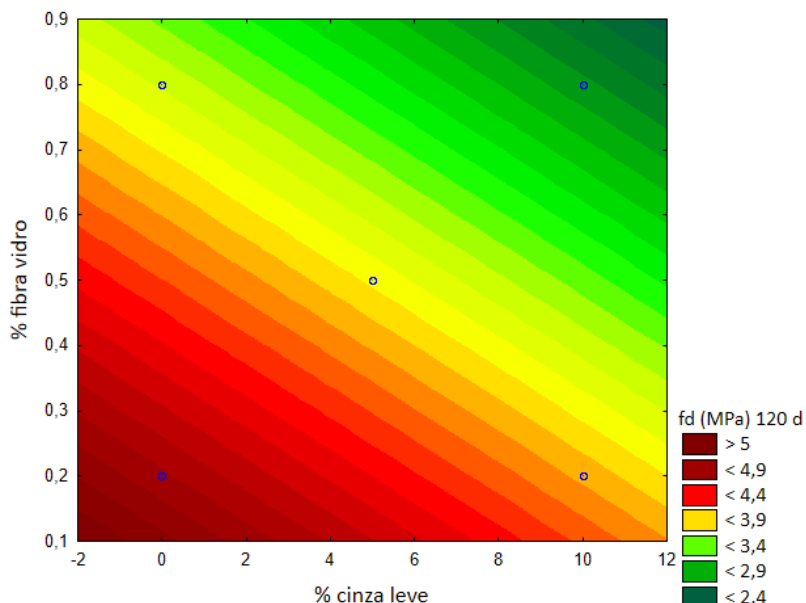
Figura 25- Gráfico de Pareto para a resistência à compressão diametral aos 120 dias de cura



Fonte: Autor, 2019.

A Figura 26 mostra o gráfico de superfície de resposta para a resistência à compressão diametral aos 120 dias de cura, em função do % de cinza leve e do % de fibra de vidro adicionadas. Neste caso, os menores valores de resistência à tração são para as composições (compósitos) com maior adição de cinza leve e maior adição de fibra de vidro. Este resultado contraria os valores experimentais obtidos para a resistência à tração por compressão diametral aos 60 dias de cura, onde os menores valores de resistência à tração foram obtidos para maior adição de cinzas pesadas, porém menor adição de fibra de vidro. Aos 120 dias de cura os maiores valores de resistência à tração tendem a menor adição de fibra de vidro e menor adição de cinza leve, Figura 26. Deve ser ressaltado que, em média, os valores de resistência à tração por compressão diametral aos 120 dias de cura são menores que a 60 dias de cura, e são menores ou equivalentes aos valores da pasta de referência, sem adições. Também, percebe-se que o desvio padrão para as resistências à tração aos 120 dias é maior que a 60 dias de cura, Tabela 25.

Figura 26- Superfície de resposta para a resistência à tração por compressão diametral aos 120 dias de cura, em função do % de cinza leve e do % de fibra de vidro



Fonte: Autor, 2019.

O Ortenzi, 2007 desceve que os ensaios mecânicos da fibra de vidro associada a uma matriz devem considerar sempre a direção da disposição das fibras, o tipo de fibra, o percentual de fibra em relação à matriz e a técnica de elaboração dos corpos de prova. Logo, esses aspectos influenciam conjuntamente para que a fibra associada à matriz tenha maior ou menos resistência e rigidez.

A alcalidade presente na pasta pode atacar alguns tipos de agregados, especialmente aqueles constituídos por compostos de Silício ou que possuam outros mineria associados, a qual pode prejudicar a resistência mecânica da pasta cimentícia (FERRARIS, 1995). Esse proplema, crítico em relação às fibras de vidro, pode ser reduzido pela adição de pozolânico ou cinza com alto teor de sílica ativa (METHA, 2001).

Segundo a MAIA, 2012 a adição de fibras no composíto tende a reduzir a rigidez da mistura tornado o material mais dúctil.

5.3. DENSIDADE APARENTE

A busca pela redução da massa específica dos elementos construtivos surgiu com a necessidade de novas formas de construção e novos materiais que otimizem o processo construtivo, sem comprometer as propriedades do material e a segurança estrutural, tendo como exemplo os concretos leves. Segundo alguns autores (ACCETTIET et al., 2000; SILVA, 2002), a adição de fibras sintéticas às misturas de concreto, dentre outras características, altera a massa específica das mesmas. Sendo que, em alguns casos, isso pode representar uma redução considerável do peso próprio, principalmente quando se trata de peças de grandes dimensões, onde uma redução, por menor que seja, torna-se extremamente vantajosa (BERNARDI, 2003).

O ensaio de densidade aparente foi realizado segundo o princípio de Arquimedes, com determinação do empuxo necessário para imergir as amostras em água, após 60 dias de cura. Como nos ensaios anteriores, foi seguido o mesmo procedimento experimental, variando-se a concentração de fibra de vidro tipo E (FV), o comprimento da fibra (CF) e a adição de cinza leve (CL), comparando-se os resultados com a pasta de cimento de referência (sem adição de fibra e cinza leve).

Para obtenção dos resultados de densidade aparente foram ensaiados 5 corpos-de-prova cilíndricos para cada composição (1 a 9) e para a pasta de cimento sem adição de fibra e cinza leve (referência), conforme mostra a Tabela 24.

Tabela 24- Densidade aparente (dAP, g/cm³) aos 60 dias de cura, onde CL: cinza leve, FV: fibra de vidro, CF: comprimento da fibra

Comp.	% CL	% FV	CF (cm)	d _{AP} (g/cm ³) 60 dias	d.p.
1	0	0,2	0,3	1,49	0,032
2	0	0,2	1	1,66	0,013
3	0	0,8	0,3	1,64	0,029
4	0	0,8	1	1,88	0,024
5	10	0,2	0,3	1,93	0,018
6	10	0,2	1	1,56	0,038
7	10	0,8	0,3	1,63	0,041
8	10	0,8	1	1,54	0,062
9	5	0,5	0,65	1,50	0,022
Ref.	0	0	0	1,86	0,020

Fonte: Autor, 2019.

Analisando-se a Tabela 24, todas as composições apresentam grande variação da densidade aparente, aos 60 dias de cura, em relação à

composição de referência, sem adições ($1,86 \text{ g/cm}^3$). As composições 1, 2, 3, 6, 7, 8 e 9 tiveram redução da densidade aparente em relação à referência; as composições 4 e 5 apresentam maior densidade aparente que a referência. Não é possível fazer uma análise isolada da variação da densidade aparente das composições cimentícias. Desta forma, para analisar o efeito da adição de cinza leve e fibra de vidro à pasta de referência, além do comprimento das fibras, foi realizada uma análise estatística dos resultados obtidos. A Tabela 25 apresenta a análise de variância para a densidade aparente aos 60 dias de cura.

Tabela 25- ANOVA para a densidade aparente aos 60 dias de cura ($R^2 = 0,85$)

	SS	df	MS	F	p
(1) % cinza leve	0,0000125	1	0,0000125	0,000831	0,98
(2) % fibra vidro	0,000313	1	0,000313	0,0208	0,9
(3) comp. fibra	0,000313	1	0,000313	0,0208	0,9
% cinza $\times$ % fibra	0,0595	1	0,0595	3,957	0,185
% cinza $\times$ comp fibra	0,0946	1	0,0946	6,29	0,129
% fibra $\times$ comp fibra	0,0153	1	0,0153	1,018	0,419
Erro	0,0301	2	0,015		
Total SS	0,2	8			

Fonte: Autor, 2019.

A análise dos resultados da ANOVA para a densidade aparente aos 60 dias de cura, Tabela 25, mostra que a confiabilidade dos resultados, dada pelo valor de p, é baixa para os fatores individuais – % de cinza leve, % de fibra de vidro, comprimento de fibra de vidro – mas percebe-se a maior influência das interações entre estes fatores (valor de F). Desta forma, uma nova análise de variância foi realizada, excluindo-se os maiores valores de p (menores valores de F), ou seja, os fatores individuais. A Tabela 26 mostra a ANOVA para esta nova condição.

Tabela 26- ANOVA para a densidade aparente aos 60 dias de cura, sem os fatores principais ($R^2 = 0,642$)

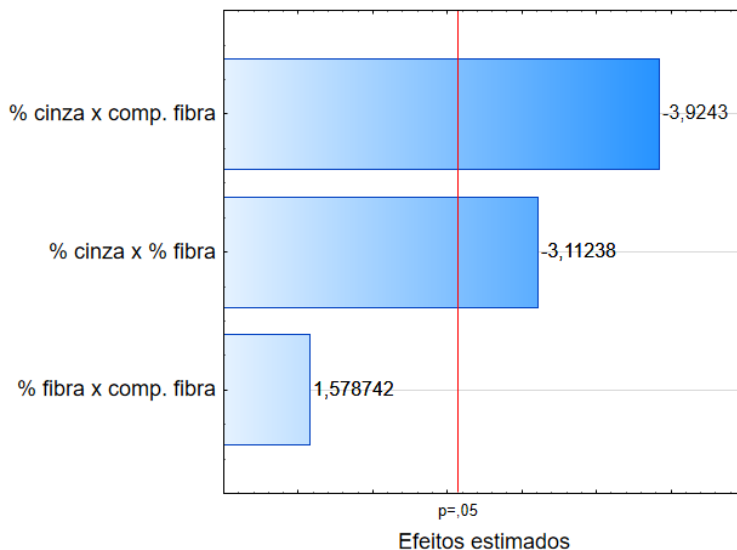
d_{AP} 60 dias	SS	df	MS	F	p
% cinza $\times$ % fibra	0,0595	1	0,0595	9,687	0,0265
% cinza $\times$ comp fibra	0,0946	1	0,0946	15,4	0,0111
% fibra $\times$ comp fibra	0,0153	1	0,0153	2,492	0,175
Erro	0,0307	5	0,00614		
Total SS	0,2	8			

Fonte: Autor, 2019.

Sem a influência dos fatores principais, as interações entre o % de cinza leve e o % de fibra de vidro adicionadas, e o % de cinza leve e o comprimento de fibra de vidro resultaram em confiabilidade maior que 95 % para a densidade aparente aos 60 dias de cura.

A Figura 27 mostra o gráfico de Pareto para o experimento. Percebe-se que as interações entre o % de cinza leve com o % de fibra de vidro e o % de fibra de vidro com o comprimento da fibra de vidro tiveram a maior significância para a densidade aparente aos 60 dias de cura.

Figura 27- Gráfico de Pareto para a densidade aparente aos 60 dias de cura

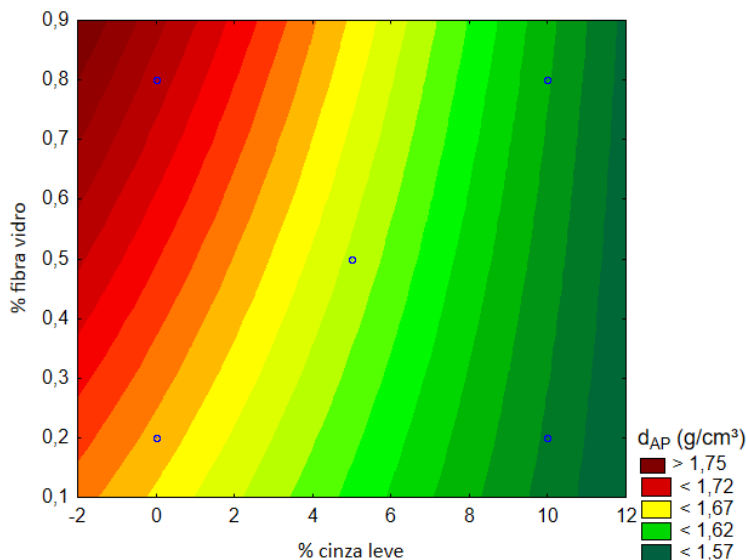


Fonte: Autor, 2019.

A Figura 28 mostra o gráfico de superfície de resposta para a densidade aparente aos 60 dias de cura, em função do % de cinza leve e do % de fibra de vidro adicionadas.

Os menores valores de densidade aparente são para as composições com maior adição de cinza leve e menor adição de fibra de vidro. Os maiores valores de densidade aparente tendem a maior adição de fibra de vidro, com menor adição de cinza leve, Figura 26. Deve-se observar que a referência, sem nenhuma adição, resultou em um dos maiores valores de densidade aparente, 1,86 g/cm³. A adição de fibra de vidro dificulta a homogeneização da pasta durante a mistura, resultando em maior incorporação de bolhas que se transformam em poros durante a cura, resultando em diminuição da densidade aparente para estas composições.

Figura 28- Superfície de resposta para a densidade aparente aos 60 dias de cura, em função do % de cinza leve e do % de fibra de vidro adicionadas

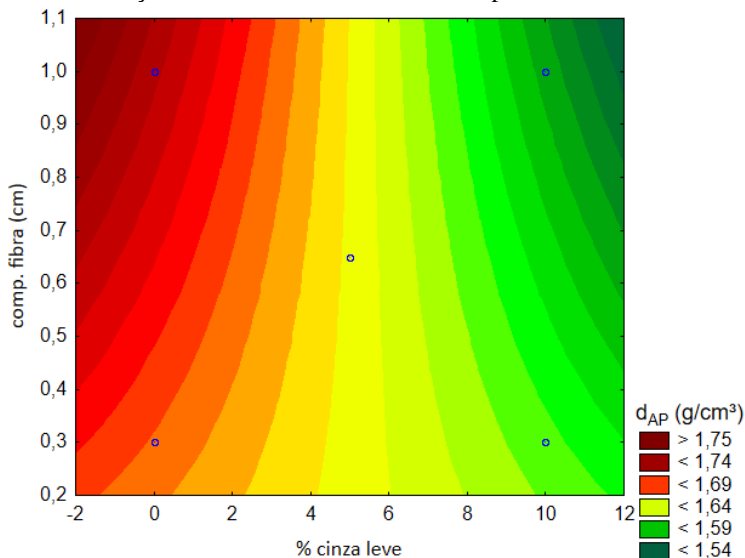


Fonte: Autor, 2019.

Finalmente, a Figura 29 mostra a variação da densidade aparente em função da interação entre a adição de cinza leve (%) e o comprimento da fibra de vidro (cm). Neste caso, as menores densidades aparentes são obtidas para a adição de cinza leve com o maior comprimento das fibras de vidro, e as menores densidades aparentes, sem adição de cinza leve e para o maior comprimento de fibra de vidro.

A cinza leve utilizada é um material muito fino, com D_{50} de 14 μm em comparação com o cimento Portland utilizado. Desta forma, a adição de cinza leve reduz a densidade aparente das composições cimentícias.

Figura 29- Superfície de resposta para a densidade aparente aos 60 dias de cura, em função do % de cinza leve e do comprimento da fibra de vidro



Fonte: Autor, 2019.

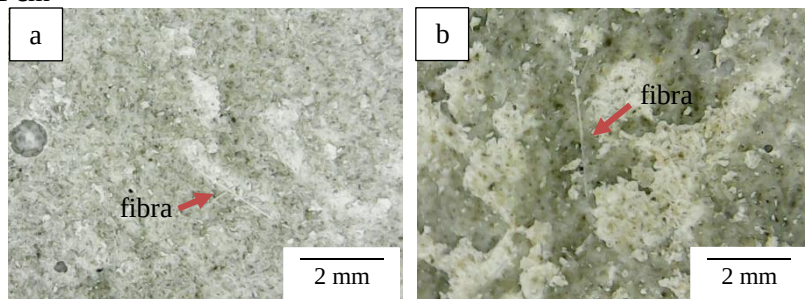
Constata-se que a adição de fibra de vidro e de cinza leve de fato altera a densidade aparente média, e que com o aumento da quantidade de adição de fibra ocorre uma diminuição na densidade aparente das composições. Porém, ao se observar os resultados da Tabela 24, a diminuição mais significativa ocorreu para a composição 1, sem adição de cinza, com 0,2 % de adição de fibra de vidro E com 0,3 mm de comprimento, provável efeito da incorporação de bolhas durante o processo de preparação da pasta.

5.4. ANÁLISE MICROESTRUTURAL

A Figura 30 apresenta a microscopia óptica para amostras das composições 1 e 2, sem adição de cinza volante, com adição de 0,2 % de fibra de vidro e para fibras com comprimento de (a) 0,3 cm e (b) 1 cm, respectivamente. Como pode ser observado, as fibras encontram-se bem dispersas em ambas as composições, sem aglomerados ou feixes de fibras. Para a composição 1 percebem-se poros de maior tamanho que para a

composição 2, o que poderia justificar a menor densidade aparente obtida para esta amostra.

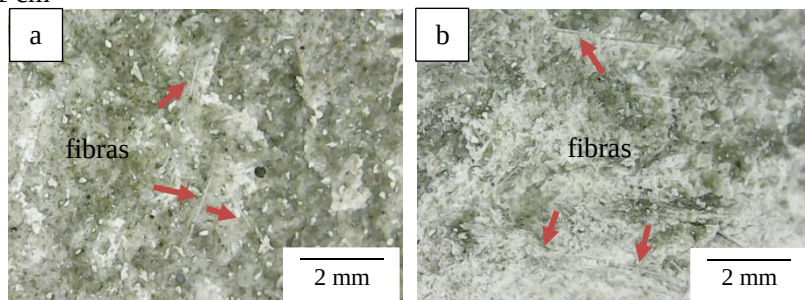
Figura 30- MO das composições sem adição de cinza leve e com adição de 0,2 % de fibra de vidro, com comprimento de fibra de (a) 0,3 cm; e (b) 1 cm



Fonte: Autor, 2019.

A Figura 31 mostra as micrografias ópticas das composições 3 e 4, ou seja, sem adição de cinza leve e com adição de 0,8 % de fibra de vidro, nos comprimentos de (a) 0,3 cm e (b) 1 cm, respectivamente. A composição 3 apresenta certa porosidade, o que corresponde a sua menor densidade aparente em relação à composição 4. Aparentemente o menor tamanho de fibra dificulta sua dispersão na matriz cimentícia, gerando maior número de bolhas, e assim maior porosidade (não medida).

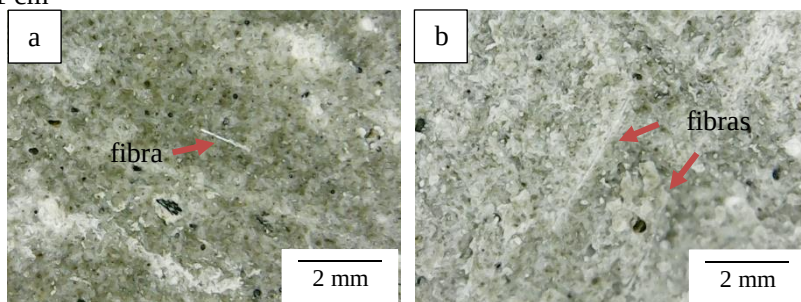
Figura 31- MO das composições sem adição de cinza leve e com adição de 0,8 % de fibra de vidro, com comprimento de fibra de (a) 0,3 cm; e (b) 1 cm



Fonte: Autor, 2019.

As micrografias ópticas das composições 5 e 6, com adição de cinza leve e com adição de 0,2 % de fibra de vidro, nos comprimentos de (a) 0,3 cm e (b) 1 cm, respectivamente, são mostradas na Figura 32. As fibras estão bem dispersas na matriz, sem aglomerações. Há pouca porosidade nas composições e pode-se perceber a presença da cinza leve, também bem dispersa na matriz cimentícia (pontos pretos nas micrografias). E ao contrário do que ocorreu para as composições sem adição de cinza leve, a densidade aparente para as amostras com adição é maior para o menor tamanho de fibra. A composição 5 apresenta a maior densidade aparente das composições cimentícias, $1,93 \text{ g/cm}^3$, em relação a $1,86 \text{ g/cm}^3$ para a pasta de referência, sem adições. Aparentemente há uma sinergia entre a cinza leve e as fibras de menor comprimento, no que se refere à densificação das pastas cimentícias.

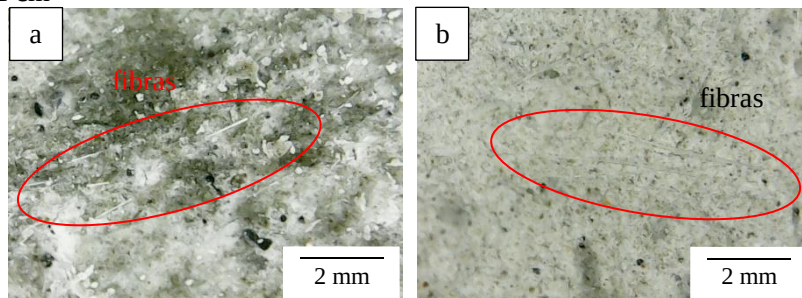
Figura 32- MO das composições com adição de cinza leve e com adição de 0,2 % de fibra de vidro, com comprimento de fibra de (a) 0,3 cm; e (b) 1 cm



Fonte: Autor, 2019.

As composições 7 e 8, com adição de cinza leve e com adição de 0,8 % de fibra de vidro, nos comprimentos de (a) 0,3 cm e (b) 1 cm, respectivamente, são mostradas nas micrografias ópticas da Figura 33. As fibras estão bem dispersas na matriz, sem aglomerações. Como ocorreu para as amostras com adição de cinza leve e com menor adição de fibra de vidro, há pouca porosidade nas composições e pode-se perceber a presença da cinza leve, bem dispersa na matriz cimentícia (pontos pretos nas micrografias). A densidade aparente é menor com a adição de 0,8 % de fibra de vidro, efeito já constatado para as amostras sem adição de cinza leve. Porém, neste caso o menor comprimento de fibra resulta em maior densidade aparente, ao contrário do que ocorre para as composições sem adição de cinza leve.

Figura 33- MO das composições com adição de cinza leve e com adição de 0,8 % de fibra de vidro, com comprimento de fibra de (a) 0,3 cm; e (b) 1 cm

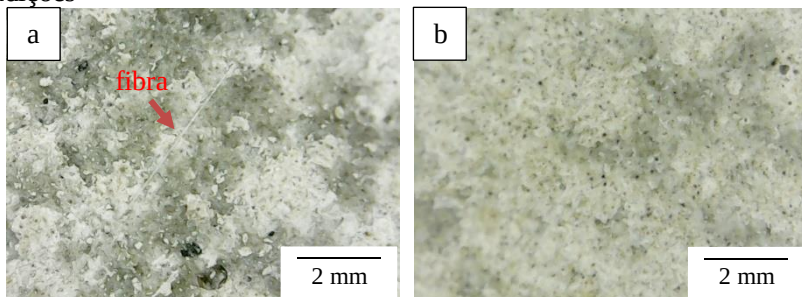


Fonte: Autor, 2019.

A Figura 34 mostra as micrografias ópticas para a composição 9, do ponto central do experimento, com adição de 5 % de cinza leve e 0,5 % de fibra de vidro, com comprimento de 0,65 cm (Figura 32 a). Mais uma vez as fibras estão bem dispersas na matriz, sem aglomerações. Há pouca porosidade na composição e presença da cinza leve, bem dispersa na matriz cimentícia (pontos pretos nas micrografias). A densidade aparente deste sistema é uma das menores, $1,5 \text{ g/cm}^3$, provável efeito entre os três fatores (adição da cinza leve e da fibra de vidro, com comprimento de fibra intermediário).

A Figura 34b apresenta as micrografia óptica da pasta de referência, sem qualquer adição. Percebe-se uma microestrutura homogênea, sem porosidade, o que resulta em uma matriz mais densa, $1,86 \text{ g/cm}^3$.

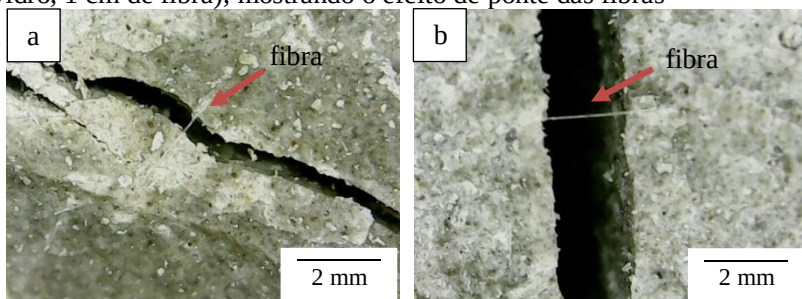
Figura 34- MO das composições (a) do ponto central do experimento, com adição de 5 % de cinza leve e de 0,5 % de fibra de vidro, com comprimento de fibra de 0,65 cm; e (b) da pasta de referência, sem adições



Fonte: Autor, 2019.

Finalmente, a Figura 35 apresenta as micrografias ópticas para as composições 3 (0 % de cinza leve, 0,8 % de fibra de vidro, 0,3 cm de fibra) (Figura 32 a) e 6 (10 % de cinza leve, 0,2 % de fibra de vidro, 1 cm de fibra) (Figura 32 b), mostrando o efeito de ponte das fibras após a fratura das amostras. Segundo Figueredo (2011), as fibras têm um papel importante sobre a resistência da matriz de cimento, pois as fibras atuam como ponte de transferência de tensão através das fissuras que surgem no momento da ruptura da matriz, resultando em aumento da energia associada à ruptura do material à tração. Assim, a fibra proporciona uma redução da concentração destas tensões em sua borda, reduzindo as propagações de fissuras.

Figura 35- MO das composições: (a) 3 (0 % de cinza leve, 0,8 % de fibra de vidro, 0,3 cm de fibra); e (b) 6 (10 % de cinza leve, 0,2 % de fibra de vidro, 1 cm de fibra), mostrando o efeito de ponte das fibras



Fonte: Autor, 2019.

Como pode ser observado, em sua macroestrutura, a pasta de cimento é um material denso. No entanto, em sua microestrutura é possível perceber áreas mais porosas do que outras. De acordo com Metha et al. (2008), isso se deve, principalmente, à velocidade de reação de hidratação do cimento, e está diretamente relacionada à relação água/cimento ou à idade de hidratação.

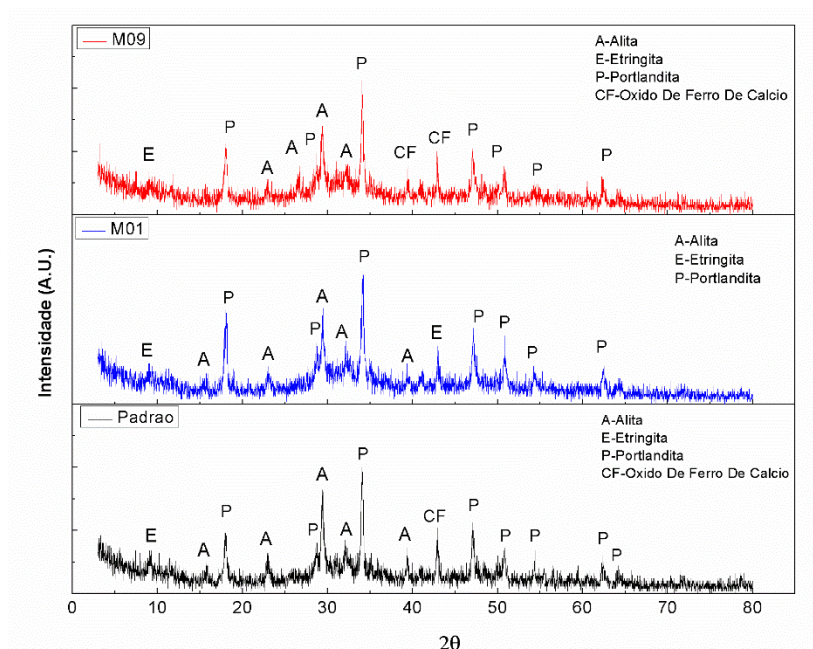
Segundo Meneses (2011), as fases presentes no interior da pasta não são uniformemente distribuídas, assim, a quantidade e a distribuição entre sólidos e vazios influenciam nas características do concreto endurecido. Observando-se as micrografias ópticas pode-se perceber as fases da pasta de cimento, que são divididas em: fases sólidas, vazios e fibras. Os vazios na pasta de cimento são formados pelo não preenchimento destes pelos produtos de hidratação do cimento, e pela água, contida na formulação, que é consumida durante as reações de hidratação. As fases sólidas e os vazios da pasta cimentícia são de suma importância para a caracterização microestrutural dos produtos cimentícios (MENESES, 2011).

Observando-se a Figura 31b percebe-se que há poucos poros presentes na microestrutura da pasta cimentícia de referência, pois houve uma porção de água/cimento muito controlada e um bom empacotamento.

É importante citar a densidade aparente da microestrutura, portanto, ela influencia diretamente na resistência final da pasta, pois o aumento da densidade aparente está relacionado com a diminuição dos vazios (MENESES, 2011). Contudo, neste trabalho, as composições com menor densidade aparente apresentaram maior resistência mecânica, efeito da adição das fibras à matriz cimentícia.

Para verificar se o uso de fibra de vidro nas pastas de cimento Portland alterou as fases cristalinas desenvolvidas, a Figura 36 mostra a análise por difração de raios X (DRX) da amostra 01, formada pela adição de 0,2 % de fibra de vidro de 0,3 mm de comprimento em cimento Portland tipo CP V, sem adição de cinza leve; da amostra 09, formada pela adição de 5 % de cinza leve e de 0,5 % de fibra de vidro de 0,65 mm de comprimento em cimento Portland tipo CP V; e da amostra padrão, formada apenas pela pasta de cimento Portland CP V.

Figura 36- Espectros de difração de raios X para as amostras 01, 09 e padrão, aos 120 dias de cura.



Fonte: Autor, 2019.

Todas as amostras – M01, com adição de fibra de vidro e sem adição de cinza leve; M09, com adição de fibra de vidro e de cinza leve; e padrão, sem adição nem de fibra de vidro nem de cinza leve – apresentam as mesmas fases cristalinas aos 120 dias de cura. Ou seja, alita, $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_3S em notação da química do cimento), cartão PDF 42-0551; etringita, $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$, cartão PDF 41-1451; portlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, cartão PDF 44-1481; e óxido de cálcio e ferro, esta última apenas na amostra padrão e na amostra M09, com presença de cinza leve.

Desta forma, a presença da fibra de vidro não alterou a dinâmica de formação de fases na hidratação do cimento.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho estudou a incorporação de fibra de vidro tipo E, em pasta de cimento Portland, avaliando a variação das propriedades físico-mecânicas em relação à pasta sem adição de fibras. A partir dos resultados experimentais as seguintes conclusões são formuladas:

- ✓ Houve um aumento significativo na resistência à compressão axial das amostras nas primeiras idades (30 dias de cura), quando reforçada com 0,8 % de fibra de vidro tipo E com comprimento de 0,3 cm, que teve um aumento de aproximadamente 82 % (43,3 MPa) em relação à resistência da referência sem adição de fibra ou cinza leve (23,8 MPa). Em contrapartida, a adição de 10 % de cinza leve nestas mesmas condições, adição de 0,8 % de fibra de vidro com 0,3 cm de comprimento, composição 7, reduziu a resistência à compressão axial aos 30 dias de cura em 5,9 % (22,4 MPa). De acordo com a análise estatística, os únicos fatores com significância foram o comprimento da fibra e interação entre o comprimento da fibra e a adição de cinza leve, a 95% de confiabilidade, na idade de 30 dias.
- ✓ Com 60 dias de cura o único fator com significância estatística para a resistência à compressão axial é a adição de cinza leve, com 95 % de confiabilidade para os resultados. A adição da cinza leve em maiores idades aumenta a resistência à compressão axial das composições cimentícias, em relação à pasta de referência, sem adições. As composições sem adição de cinza leve ou reduzem, ou mantêm a mesma resistência à compressão axial determinada aos 30 dias de cura.
- ✓ Neste estudo a adição de fibra de vidro na pasta cimentícia aumentou a resistência à compressão axial das composições após 60 dias de cura, contrariando estudos onde a adição de fibras ao concreto não altera a resistência à compressão deste, pois, a fibra trabalha em tração.
- ✓ Com relação à resistência à tração por compressão diametral, todas as composições apresentam valores de resistência à tração maiores, aos 60 dias de cura, que a composição de referência,

sem adições. A análise estatística mostrou que todos os fatores estudados, o % de adição de cinza leve e de fibra de vidro, e o comprimento da fibra de vidro, além de suas interações, são significativos a 95 % de confiabilidade. A adição de fibra de vidro, para qualquer adição de cinza leve, resulta em maior resistência à tração das composições. Além disto, fibras mais longas sem adição de cinza leve, ou fibras mais curtas com adição de cinza leve resultam em maior resistência à tração, em típico efeito de sela para o fd. Porém, aos 120 dias de cura a resistência à tração por compressão diametral diminuiu em relação aos 60 dias de cura, o que pode ter ocorrido por degradação da fibra de vidro, apesar da adição da cinza leve. Deve ser ressaltado que o desvio padrão para o fd aos 120 dias foi maior que a 60 dias de cura, o que pode ter influenciado nos resultados obtidos.

- ✓ Observou-se também que a densidade aparente média é alterada com a adição de fibras, pois comparando-se com a pasta de referência, sem adição de fibra de vidro ou cinza leve, houve uma diminuição da densidade aparente média das composições com a menor adição de fibra de vidro (0,2 %). A adição de cinza leve também reduz a densidade aparente das composições.
- ✓ A adição da cinza leve na pasta cimentícia do tipo CP V ARI a transformou em pasta cimentícia do tipo CP II-Z, portanto, de acordo com a norma NBR 11.578, ela apresenta uma concentração de 6-14 % em massa de material pozolânico, pois a cinza leve é definida como material pozolânico artificial segundo a norma NBR 12653/1992.
- ✓ Finalmente, a análise microestrutural revelou que tanto as fibras de vidro quanto a cinza leve estão bem dispersas na matriz cimentícia das composições. Encontrou-se maior porosidade nas amostras que apresentam menor densidade aparente.

7. REFERÊNCIAS

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia Básico de Utilização do Cimento Portland**. 9ªed. São Paulo: ABCP, 2012.

ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **O Solo-Cimento**. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteúdo/basico-sobre-cimento/aplicacoes-solo-cimento>>. Acesso em Dezembro 2017.

ALMEIDA, Janaína Alves. **Influência da adição de resíduo siderúrgico na performance do concreto**. 2009. 74 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Belo Horizonte, MG, 2009.

ALMEIDA, Sandra Penha de Souza. **Avaliação das Propriedades Mecânicas de Compósitos Pultrudados de Matriz Polimérica com Reforço de Fibras de Vidro**. 2004. 87 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

AMARAL, Josué Coelho do Júnior. **Avaliação da influência da adição de fibras poliméricas nas propriedades térmicas e mecânicas do concreto**. 2016. 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais.) -CEFET. Belo Horizonte, MG, 2016.

AMATO, Ivan. Green cement: Concrete solution. Nature. **Cement manufacturing is a major source of greenhouse gases. But cutting emissions means mastering one of the most complex materials known**. V. 494, p. 494-300, 2013.

American Society for Testing And Materials. **ASTM C618**: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. West Conshohocken, 2005.

ANDERSON, T. L. **Fracture mechanics. Fundamentals and applications**. United States of America: CRC Press LLC. Second edition, 1995. p.14-15.

ARAÚJO, Caroline Maia. **Reforço de vigas de concreto à flexão e ao cisalhamento com tecido de fibras de carbono**. 2002. 157 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MATERIAIS COMPÓSITOS. **ABMACO**. Compósitos 1: Materiais, Processos, Aplicações, Desempenho e Tendências., 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndrico– Classificação**. NBR 5739: Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais Pozolânicos** – Especificações, NBR 12653. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos** NBR 13281, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Cimento Portland composto**– Especificações, NBR 11578. Rio de Janeiro, 1991.

BARGHIGIANI, Thayane Martins. **Caracterização experimental de pastas cimentícias de alto desempenho reforçadas com fibras de polipropileno e PVA**, 2013. 143 f. COPPE- Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.S.; BRUNS, R.E. Planejamento e otimização de experimentos. Campinas: Ed. UNICAMP, 1995.

BARROS, Alexandre Rodrigues. **Avaliação do comportamento do concreto auto-adensável reforçado com fibras de aço**. 2009. 178 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2009.

BARROS, Sofia Manuela Félix. **caracterização de argamassas com fibras de pva para reforço de paredes de alvenaria**. 2017. 106 f.

Dissertação (Mestrado Engenharia Civil)– Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2017.

BARROS, J. A. O. **Comportamento de betão reforçado com fibras**. Tese (Doutorado Engenharia mecânica). 1995. Faculdade de Engenharia, Universidade Do Porto, 1995.

BENTO, Priscila Fiochi. **Uso de Cal e Fibra na Melhoria de Materiais para Utilização em Estruturas de Pavimentos**. 2006. 132 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil Engenharia Civil e Ambiental)– Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

BIERNACKI, J. J.; WILLIAMS, P. J.; STUTZMAN, P. E.. Kinetics of reaction of calcium hidroxide and fly ash. **ACI Materials Journals**. v. 98, n. 4, p. 340-349, 2001.

BENTUR, Arnon.; MINDESS, Sidney. Fibre Reinforced Cementitious Composites. London and New York: **Modern Concrete Technology Series**, vol. 2, p. 601, 2007.

BERNARDI, Stefania Tesi. **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibra de aramida kevlar**. 2003. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

BONIFÁCIO, Jéssica Spricigo da Rocha, GODINHO, Daiane dos Santos da Silva **Estudo do efeito das fibras de vidro e polipropileno nas propriedades mecânicas do concreto**. Criciúma, dez. 2014. Disponível em < <http://repositorio.unesc.net/handle/1/3028>>. Acesso em 14 fev. 2018.

BROUWERS, H. J. H.; VAN EIJK, R. J. Chemical reaction of fly ash. **In: 11th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC) p. 791-800. 2003.**

CALDEIRA, Inês Margarida Gonçalves. **Resistência e deformabilidade de uma areia estabilizada com cimento e fibras de polipropileno**. 2012. 125f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -Universidade do Porto. Porto, Portugal, 2012.

CAMPOS, Virginia Bezerra Oliveira. **Análise de critérios de falha em lâmina reforçada com tecido híbrido de fibra de vidro e carbono.** 2017. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

CANCIAN, Max Alberto. **Influência do teor de umidade, porosidade e do tempo de aplicação na mistura solocimento para pavimento rodoviário de um solo da bacia do paraná.** 2013. 202 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina., Londrina, 2013.

CARNIO, Marcio Antônio, A. D. Aspectos gerais sobre o uso do concreto reforçado com fibras no Brasil: produção, projeto, tecnologia, normalização. **Revista Concreto & Construções**, São Paulo, 87 ed. 116f, 2017.

CARNIO, Marco Antônio. **Programa de trincas por fadiga do concreto reforçado com baixos teores de fibras.** 2009. 145 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) -Universidade de Campinas, Campinas. 2009.

CARVALHO, A. Fiberglass x Corrosão: especificação, instalação e manutenção de equipamento de Fiberglass para Ambiente Agressivos, **ASPLAR**, 425 f., São Paulo, 1992.

CASAGRANDE, Michéle Dal Toé. **Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais.** 2001. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

CATARINO, JOANA FILIPA. **Avaliação da Influência do Cimento na interação Cimento- Superplastificante.** 2012. 179 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Química) - Instituto superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa, 2012.

CASTRO, W. A. M. **Incorporação de resíduos de caulim em argamassas para uso na construção civil.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

CENTURIONE, Sérgio Luiz. **Influência das características das matérias-primas no processo de sinterização do clínquer Portland.** 1993. 171f Dissertação (Mestrado em Mineralogia e Petrologia) - Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

CEZAR, Daiana de Souza. **Características de Durabilidade de Concretos com Cinzas Volantes e Cinza de Casca de Arroz com e sem Beneficiamento.** 2011. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Centro de Tecnologia. Santa Maria. 2011.

CHENG, M-Y.,PARRA-MONTESINOS, G. J. Evaluation of Steel Fiber Reinforcement for Punching Shear Resistance in Slab-Column Connections - Part I: Monotonically Increased Load. **ACI Structural Journal.** v.107, n.1, p. 101-109, 2010.

CHERIAF, M., PÉRA, J., ROCHA, J. C. Pozzolanic Properties of Pulverized Coal Combustion Bottom Ash. **Cement and Concrete Research.** Vol 29 (1999). p. 1387–1391.

CHENG, S.; SHUI,Z.; SUN, T.; YU, R.; ZHANG, G.; DING, S.Effects of flyash, blastfurnaceslagandmetakaolinonmechanicalproperties anddurability ofcoral sandconcrete.**Applied Clay Science.** v. 141, p. 111-117, 2017.

CIMENTO.ORG. **Cimento no mundo.** 2014. Disponível em:< <http://cimento.org/cimento-no-mundo/>>. Acesso em 12 Jan. de 2018.

CLELAND, J. World population growth; past, present and future. Environ Resour science, we still have some of the most basic questions about cement Econ. Unanswered. **The low carbon and sustainable development.** 543f, 2013.

COSTA, Eugênio Bastos. **Aproveitamento do resíduo de anodização do alumínio na produção do cimento sulfoaluminato de cálcio belítico.** 2013. 160 f. Dissertação (Mestrado Engenharia na Modalidade Scadêmica) - Universidade do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

CLAESSON, Bohloli, J. CLAESSON, B. Bohloli – Brazilian test: stress field and tensile strength of anisotropic rocks using an analytical

solution. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**. 2002.

CZARNECKI, B.; DAY, R. L. Durability of high performance concrete in cold climate and exposure to deicing salts. **International conference on concrete under severe conditions: Environment and loading**, 2010, 688 f, Mexico. 2010.

DANIEL, Isaac. M.; Ishai Ori. Engineering Mechanics of Composite Materials. **Oxford University Press**,. 2 ed. 269f. 1994.

DAWOOD, Eethar Thanon.; RAMILI, Mahyuddin. Mechanical properties of high strength flowing concrete with hybrid fibers, **Construction and Building Materials**. 2011.

DEDAVID, Berenice Anina; GOMES, Carmem Isse; MACHADO, Giovanna. Microscopia Eletrônica de Varredura: Aplicações e preparação de amostras. **EdiPUCRS**. 2007. 60 f. Porto Alegre: 2007.

DHIR R. K., MCCARTHY, TITTLE P. A. J. Use of Conditioned PFA as a Fine Aggregate Component in Concrete. **Materials and Structures/Matériaux et Constructions**, Vol.33, Jan - Feb 2000, pp 38-42.

EHRENBRING, Hinoel. Zamis. **Comportamento de concreto reforçados com microfibras de polipropileno (PP), álcool polivinílico (PVA) e recicladas de poliéster (POL) em relação à retração por secagem e retratamento e às propriedades mecânicas**. 2017. 167 f. Dissertação (Mestrado em Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Santos, São Leopoldo, RS, Brasil. 2017.

FERRAZ, Moraes Ricardo. **Estudo da rigidez de laminados poliméricos com fibras sintéticas e naturais por meio de simulação numérica**. 2016, 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal de São João Del-Rei. São João Del-Rei, 2016.

FIGUEIREDO, Antônio Domingues. A nova especificação brasileira das fibras de aço para concreto In. 50º Congresso Brasileiro do

Concreto, Salvador, 2008. **Anais. Instituto Brasileiro do Concreto-IBRACON**. São Paulo, 2008.

FIGUEIREDO, Antônio Domingues. Concreto com Fibras de Aço. Boletim Técnico. **Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, São Paulo, 2000.

FIGUEIREDO, Antônio Domingues. Concreto com fibras. In: Isaia, Geraldo Cechelle (Org.) Concreto. Ensino, **Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON**, v.2, p. 1195-1225. 2005.

FIGUEIREDO, Antônio Domingues. **Concreto Reforçado com Fibras**. 2011. 248 f. Tese (Dissertação em Engenharia de Construção) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

FIGUEIREDO, Antônio Domingues. Pesquisa, projetos, tecnologia, controle da qualidade e uso do CRF no Brasil e no mundo. **Revista Concreto & Construções**. 2017.

FITESA. **As influências das fibras de polipropileno na exsudação do concreto**. Boletim Técnico, n. 3, 2002. Disponível em: <<http://www.fitesa.com.br>>. Acesso em: 14 jan. 2018.

FORTES, Adriano Silva. **Vigas de concreto armado reforçadas com fibras de carbono**. 2000. 256 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.

GARCEZ, Mônica Regina. **Alternativas para melhoria do desempenho de estruturas de concreto armado reforçadas pela colagem de polímeros reforçados com fibras**. 2007. 267 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

GHUGAL, Yuwraj Marotrao; DESHMUKH, Santosh B. Performance of Alkali-Resistant Glass Fiber Reinforce Concrete. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**. v. 25, n. 6, p. 617-630, 2006.

GOLIATH, KÍSSILA BOTELHO . **Comportamento de colunas curtas reforçadas com compósitos de resina geopolimérica e fibras de carbono**. 2017. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-

Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes. 2017.

GUEDERT, Luis Otavio. **Estudo da viabilidade técnica e econômica do aproveitamento da cinza de casca de arroz com material pozolânico. Florianópolis.** 1989. 166f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 1989.

GÜNEYISI, Erhan. et al. Fresh and Rheological Behavior of Nano-Silica and Fly Ash Blended Self-Compacting Concrete. **Construction and Building Materials.** v. 95, n. 1, 2015, p. 29-44. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815301458>>. Acesso em 09 jan. 2019.

GUIMARÃES, Diego. **Avaliação das propriedades de concretos reforçados com fibras de aço para utilização em pisos industriais.** 2015. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2015.

HORNAIN, H.; MIERSMAN, F.L.; MARCHAND, J. **Influence of Residual Carbon in Fly Ash on Microstructure and Strength development of Mortars and Concretes.** ACI, v. 132, p. 21-36, 1992. Disponível em: <<https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&ID=1920>>. Acesso em 20 jan. 2019.

HOPPE FILHO, J. et al. Ataque de Matrizes Cimentícias por Sulfato de Sódio: Adições Minerais como Agentes Mitigadores. **Cerâmica.** v. 61, n. 358, p. 168-178, 2015. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ce/v61n358/0366-6913-ce-61-358-00168.pdf>>. Acesso em 08 jan. 2019.

HELENE, **Paulo.**; ANDREDE, **Tibério.** Concreto de Cimento Portland IN: **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** Geraldo Ce ed. São Paulo: IBRACON, 2010.

KIHARA, Y; CENTURIONE, S. L. O Cimento Portland. In: **Concreto: Ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON. cap. 10, p. 295-322, 2005.

KREUZ, Anderson Luiz. **Utilização de cinzas pesadas de termelétricas na substituição de cimento e areia na confecção de concretos**. 2002, 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Universidade Federal de Santa Catarina, 2002

LEMES, Silênia Priscila Da Silva. **Análise de desempenho em argamassa de assentamento e de revestimento com incorporação de cinza de casca de arroz em alvenaria de bloco estrutural e de vedação**. 2013, 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Engenharia Civil na Universidade Federal do Pampa, 2013.

LERTWATTANARUK, Pusit.; SUNTIJITTO. Anchisaa. Properties of natural fiber cement materials containing coconut coir and oil pal fibers for residential buliding applications. **Construction and Building Materials**. v. 94, pp 664-669, 2015.

LI, Xue, TABIL, Lope G; PANIGRANI, S. Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber- reinforced composites. **A review. Journal Polymer Environmetal**. p. 25-33. 2007.

LI, Zongjin. **Advanced Concrete Technology**, Canadá, 2011.

LIMA, Paulo Roberto Lopes. **Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal**. 2004. 263f. Tese (Doutorado em CIÊNCIAS em Engenharia Civil) –Universidade Federal do Rio deJaneiro. Rio de Janeiro, 2004.

LOPES, Lucas Dellaglio. **Análise dos efeitos de fibras de capim annoni na adesividade e perda de massa por desgaste em misturas asfálticas**. 2017. 70f.. (Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete, Alegrete, 2017.

LOPES, Genilson de Souza Junior. **Determinação das propriedades físicas e mecânicas de um compósito cerâmico reforçado com**

produtos da combustão do carvão mineral. 2011. 56 f. . Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica)- Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2011.

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

LYRA Jorge Santos. **Estudo da influência de plicarboxilato comercial na hidratação, reologia e físico-química de superfície do cimento.** 2010. 115f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Metalurgia e Materiais)-Universidade de São Paulo. São Paulo.2010.

MAIA, MARIANA PAES DA FONSECA. **Ecodor: proposta de mistura sustentável destinada à fabricação de dormentes de concreto.** 2012. 119f.. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído)- Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora.2012.

MARTINEAU, P.; AGOPYAN, V. Conferencia MagnaI- Compósitos: materiais inovador. **In Arquimacom.** São Paulo. 2002.

MASSAZZA, F. Pozzolana and pozzolanic cements. **In:** Lea's chemistry of cement and concrete. Edited by Peter C. Hewlett. Ath ed., 1998.

MASSUCATO, Carlos José. **Utilização de Escória de Alto-forno à Carvão Vegetal como Adição no Concreto.** 2005.105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo)- Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

MATSUMOTO, Takashi., LI, Victor C. Fatigue crack growth analysis of fiber reinforced concrete with effect of interfacial bond degradation. **Cement & Concrete Composites.** v. 20, p. 339-350, 1998.

MENESES, Izenete Andrade. **Avaliação de concreto com adição de fibras de pet submetido a altas temperaturas.** 2011. 90 f. Mestrado (

Dissertação em Engenharia Civil)- Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2011.

MEHTA, P.Kumar. MONTEIRO, Paulo José Melaragno. Concreto: Estrutura, **Propriedades e Materiais**. Editora PINI. São Paulo. 1994.

MEHTA, P.Kumar. MONTEIRO, Paulo José Melaragno. Concreto: microestrutura. **Propriedades e materiais**. São Paulo, PINI, 2014.

MEHTA, P.Kumar. MONTEIRO, Paulo José Melaragno. Concreto: Microestrutura. **Propriedades e Materiais**. 3º ed 2008.

MIZUMOTO, C.; SALLES, F. M. Efeitos da aplicação de escória granulada de alto forno em diferentes finuras em composições de argamassa. **Anais do 54º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2012**, n. 1, p. 1–14, 2012.

MOHAMMED, S. Imbabi, COLLETTE Carrigan, SEAN McKenna. **Tendências e desenvolvimentos no cimento verde e tecnologia do concreto**. Universidade de Aberdeen, AB24 3UE Escócia, Reino Unido, 2013.

Montgomery, D. C. Design and analysis of experiments. 8th ed. John Wiley & Sons, 2017.

MALEK, R. I. et al. The contribution of class-F fly ash to strenght of cementitious mixtures. **Cement and Concrete Research**. v. 35, n. 6, p. 1152-1154, 2005.

MEYERS, M. A.; CHAWLA, K. K. **Mechanical behavior of materials**. New York. United States of America: Cambridge University Press, 2009. p.404-521.

MORAES, Ricardo Ferraz. **Estudo da rigidez de laminados poliméricos com fibras sintéticas e naturais por meio de simulação numérica**: 2016. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal de São João Del-Rei/Tese, São João Del-Rei. 2016.

NOGUEIRA, Josiane Ramos. **Reciclando Cinzas**: Estudo de Viabilidade para produção de Blocos para a Construção Civil a partir da Cinza Volante Residual de um Reator de Leito Fluidizado. 2011. 169 f.

Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos. São Carlos. 2011.

NÓBREGA, Andreza Kelly Costa, **Formulação de pastas cimentícias com adição de suspensões de quitosana para cimentação de poços de petróleo**. 2009. 135f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais)-Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2009.

NONAT, A. A hidratação dos cimentos. In OLLIVIER, J. P; VICHOT, A. (Ed). Durabilidade do concreto: bases científicas parformulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. São Paulo: **IBRACON**, 2014.

NUNES, Nelson Lúcio. **Contribuição para a aplicação do concreto reforçado com fibrasde aço em elementos de superfície restringidos**. 2006. 272 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

ODLER, I., **Special Inorganic Cements**. 3 ed.. 395 f. 2000.

OLIVEIRA, C. T. A. & AGOPYAN, V. Estudo da água do poro de pastas de cimento de escória pelo método da água de equilíbrio. **Boletim técnica da escola Politécnica da USP**. São Paulo, 2000.

OLIVEIRA, Felipe Sales. **Análise comparativa do desempenho de fibras metálicas e poliméricas para o reforço de concreto submetido à tração**. 2017. 57 f. (Engenharia Civil)- Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça. 2017.

OLIVEIRA, L. S. **Influência da cal na trabalhabilidade e na resistência mecânica de argamassas**. Dissertação – Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, 2009.

OLIVEIRA, Maria Luiza Lopes. **INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO EM ARGAMASSAS**. 2001. 171 f. Dissertação. (Engenharia Civil)- Universidade Federal de Santa Catarina, Palhoça. 2001.

ORNAGHI, Heitor Luiz Junior. **Caracterização mecânica e dinâmico-mecânica de compósitos híbridos vidro/sisal moldados por RTM**.

2009.80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais) -Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2009.

ORTENZI, Altibano Junior. **A fibra de vidro em matrizes poliméricas e cimentícias e seu uso estrutural em construção civil- o estado da-arte.** 2007. 228 f. Dissertação (Mestrado em Construção civil)- Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2007.

OSTERTAG, C. P.; BLUENT, J. Effect of crack control in hybrid fiber reinforced concrete composites on corrosion rate of steel reinforcing bars. **Fracture Mechanics of concrete structures.** v. 5, n. 1, pp. 894-900, 2010.

PEREIRA, Mariana da Mato. **Avaliação da eficiência do ensaio barcelona simplificado para a determinação da tenacidade do concreto reforçado com fibras:** 2017. 159f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil)- Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil. 2017.

PERUZZI, Antônio de Paulo. **Comportamento das fibras de vidro convencionais em matriz de cimento Portland modificado com látex e adição de sílica ativa.** 2002. 111 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura)- Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

PINTO Jr., N. O.; BINA, P. Pisos industriais construídos com concreto dosado com fibras. In: REIBRAC - IBRACON, 38º, 1996, Ribeirão Preto. Anais... Ribeirão Preto, 1996. v. 1, p. 63-78.

POLISSENI, Gabriela de Casto. **Efeito de finos reciclados de concreto (frc) de diferentes origens nas propriedades físico-químicas e mecânicas de matrizes cimentícias.**2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil. 2018.

POZZOBON, Cristina E. **Aplicações Tecnológicas para a cinza do carvão mineral produzida no complexo termelétrico Jorge Lacerda.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) UFSC, 1999.141 p.

PURNELL, Phil. SHORT, N.R.; PAGE, C.L.; MAJUNDAR, AJ. 2000, Microestutural observations in new matrix glass fiber reinforced cement. **Cement and concrete research**. Ed. 30, 2000.

QUININO, Uziel Cavalcanti de Medeiros. **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras**. 2015. 243 f. Tese (Doutorado em Graduação em Engenharia Civil)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2015.

RECENA, Fernando Antônio Piazza. **Método de Dosagem de Concreto pelo Volume de Pasta Com Emprego de Cinza Volante**. 2011. 263 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia. Porto Alegre. 2011. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/36331>>. Acesso em 10 fev.. 2018.

RED, C. Wind turbine blades: Big and getting bigger. **Composites technology**. 2008.

REIS, Rui Jorge Alves da Cunha. **Betões Eco-Eficientes com Cinzas E Metacaulino**. 2009. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia. Braga. 2009.

RODRIGUES, Fabrício de Amorim. **Estudo da influência de diferentes tratamentos (fibra/matriz) nas propriedades mecânicas de compósitos cimentícios reforçados com fibra de malva**. 2015.99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal do Amazonas, 2015.

RODRIGUES, Manuela Ferreira de Carvalho. **Uma análise preliminar da energia embutida no cimento considerando Brasil e Reino Unido**. 2017. 26 f. (Especialização em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos)- Universidade Federal de Santa Maria, Foz Iguaçu, 2017.

RIPPER, E. M anual prático de materiais de construção: recebimento, transporte interno, estocagem, manuseio e aplicação. São Paulo: PINI, 1995.

ROHDE, G. M.; ZWONOK, O.; CHIES, F.; SILVA, N. I. W. Cinzas de carvão fóssil no Brasil– **Aspectos técnicos e ambientais**, Porto Alegre: CIENTEC, 2006.

SAINT-GOBAIN. Vetrotex. Vetrotex Glas Fibre. Chambéry: **Vetrotex**, 2000.

SALVADOR, Renan Pícolo. **Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras**. 2013. 201 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2013.

SANTIAGO, Gislene Aparecida. **Estudo do Comportamento Mecânico de Compósitos Solo-Fibras Vegetais Impermeabilizadas com Solução de Poliestireno Expandido (EPS) e Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)**. 2011. 148 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais)- REDE Temática em Engenharia de Materiais. 2011.

SANTIAGO, M. O. Aplicações do GRC-cimento reforçado com fibras de vidro em novos estádios de Sevilha, Espanha. In: **Arquimacom**. São Paulo, 2002.

SANTOS, Joeme Rodrigues. **Ação e reação em oligopólio homogêneo, um estudo de caso: a indústria de cimento capixaba**. 2005. 95f. Dissertação (Mestrado em Ciências Contábeis). Fundação Capixaba de Pesquisa em Contabilidade, Economia e Finanças. Vitória, 2005.

SANTOS, Sílvia. **Produção e Avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho**. 2006. 267 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2006.

SARZALEJO, A. G.; ROSSI, B.; PERRI, G.; WINTERBERG, R.; ARISTEGUIETA, R. E. P. Fibras como elemento estrutural para reforço de concreto. **Maccaferri do Brasil Ltda.**, 2014.

SATHISHKUMAR, T. P.; NAVEEN, J.; SATHEESHKUMAR, S. Hybrid fiber reinforced polymer composites- a review. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**. 33 pp. 454-471, 2014.

SAVASTANO, Jr, Holmer. **Materiais à base de cimento reforçados com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para construção de baixo custo**. 2000. 152 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil)-Universidade de São Paulo. 2000.

SAVASTANO, Jr., **Zona de Transição entre fibras e pasta de cimento Portland: Caracterização e inter-relação com as propriedades mecânicas do compósito**. 1992. 249p. Tese (Doutorado) –Universidade de São Paulo. São Paulo. 1992.

SCHNEIDER, M, ROMER, M, Tschudin M, Bolio H. Sustainable cement production— tion [88,106-108]. Worse, for researchers looking for ways to reduce present and future emissions, cement is not just a common place, high-volume commodity. **Cem Concr Res** 2011;41(7):642-50.

SENFF, L.; FOLGUERAS, M. V.;HOTZA, D. HidrataçãodocumentoCPVARI-RS:Influência daáguanas reações dehidratação. In: **Congresso Brasileiro Cerâmica**, 49. São Paulo, 2005.

SILVA, A. P.F., Concreto projetado com fibras: estágio atual. In Simpósio sobre túneis urbanos, 4 ed, São Paulo. **Associação Brasileira de Geologia de Engenharia**, 2002. p. 203-206.

SILVA, Isabela Leão Amaral da. **Propriedades e estrutura de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas de juta**. 2014. 110 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências de Materiais)-Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes. 2014.

SILVA, Kenyson Diony Souza et al. Utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar na produção de concreto sustentável. **Revista Diálogos: Economia e Sociedade**, v. 2, n. 1, p. 176 - 190, mar. 2018. ISSN 2594-4320. Disponível em: <<http://dialogos.saolucas.edu.br/index.php/REDIAL/article/view/28>>. Acesso em: 20 fev. 2018.

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Relatório anual 2017**. Rio de janeiro, RJ Disponível em: <<http://www.org.com.br>>. Acesso em: 18 Fev. 2018.

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Resultados Preliminares de Janeiro de 2018**. Rio de Janeiro, RJ Disponível em: <<http://www.org.com.br>>. Acesso em: 18 Fev. 2018.

SUN, Zengzhi, XU, Qinwu. Microscopic, physical and mechanical analysis of polypropylene fiber reinforced. **Materials Science and Engineering: A**, v. 527. n. 15, p. 198-204, dez. 2009.

TANESI, Jussara.; FIGUEIREDO, Antônio Domingues. Fissuração por retração em concretos reforçados com fibras de polipropileno (CRFP). **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, v. 239, n. 1, 1999.

TANESI, Jussara; AGOPYAN, Vahan. Compósitos reforçados com fibras plásticas para construção civil. in: encontro de tecnologia de sistemas plásticos na construção civil, 2., 1997, São Paulo. **Anais**. São Paulo: USP, 1997. p.219-252.

TINÔ, S. R. L.; Fontes, R. S.; AQUINO, E. M. F. Theories of failure average stress criterion and point stress criterion in notched fiber-reinforced plastic. **Journal of Composite Materials**. 48, pp. 2669-2676, 2014.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. Dosagem dos CONCRETOS DE Cimento Portland Concreto: **Cimento e Tecnologia**, v. 1, n. 1927, pp 439-471, 2011.

UCHIKAWA, H. Effect of blending componentes on hydration and structure formation. **In**: 8th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC). v. 1, p. 249-280, 1986.

VASCONCELOS, Sarah Denise. **Avaliação das cinzas de carvão mineral produzidas em usina termelétrica para construção de camadas de pavimentos**. 2018. 135 f. Dissertação (Mestrado Engenharia de Transportes)- Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2018.

Vasconcelos, Raimundo Expedito. **Fratura do concreto reforçado com fibras de aço e de polipropileno em meios normal e agressivo**. 2012, 181f. Tese (Doutorado Engenharia Mecânica)- Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2012.

VAZ, Viviane Visnardi. **Pavimento intertravado de concreto reforçado com fibras de vidro**. 2015. 131f. Dissertação (Mestrado Tecnologia na Área de Ciência dos Materiais)- Universidade Estadual de Campinas, Limeira. 2015.

WITZKE, Franky Bruno. et al. Cost and property optimisation of concretes containing fly ash using mathematical and statistical strategies. International Symposium on Materials na International Conference, 8. 2017. Aveiro. **Anais...** Aveiro: SPM. 2017.