



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO EM CONCRETOS
COM DIFERENTES TEORES DE SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO
MIÚDO POR VIDRO MOÍDO EM SITUAÇÕES DE INCÊNDIO**

Natália Volken Lutz

Lajeado, novembro de 2021

Natália Volken Lutz

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO EM CONCRETOS
COM DIFERENTES TEORES DE SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO
MIÚDO POR VIDRO MOÍDO EM SITUAÇÕES DE INCÊNDIO**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão II, do curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari Univates, como parte da exigência para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa Ma. Débora Pedroso Righi

Lajeado, novembro de 2021

Natália Volken Lutz

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO EM CONCRETOS
COM DIFERENTES TEORES DE SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO
MIÚDO POR VIDRO MOÍDO EM SITUAÇÕES DE INCÊNDIO**

A banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada no componente curricular Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte da exigência para obtenção do grau de Bacharela em Engenharia Civil:

Profa. Ma. Débora Pedroso Righi Köhler - orientadora
Universidade do Vale do Taquari - Univates

Prof. Ma. Rebeca Jéssica Schmitz
Universidade do Vale do Taquari - Univates

Prof. Ma. Daniele Airão
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Lajeado/RS, 13 de dezembro de 2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me fortalecer e me iluminar durante todo o desenvolvimento deste trabalho até concluir da melhor forma. Agradeço aos meus pais Fábio Lutz e Suely Volken Lutz e a minha irmã Larissa Volken Lutz, por estarem sempre ao meu lado, me incentivando a sempre estudar e ir em busca dos meus sonhos. Agradeço ao meu namorado Henrique Machado Zortea por toda paciência e por sempre estar ao meu lado me apoiando e jamais deixando eu desistir. Obrigada pai e Henrique por todas as vezes que tiveram que me levar até o LATEC para eu poder realizar os ensaios do meu trabalho. Obrigada Henrique por passar um dia inteiro me ajudando a concretar os meus corpos de prova. Obrigada mãe por sempre se preocupar comigo, rezar e me dar forças para seguir em frente por mais cansada que eu estivesse, porque no final tudo iria dar certo. Sou grata aos meus sogros, Laureano Zortea e Tatiana Machado Zortea, por me ajudarem a lavar e quebrar as garrafas *long neck*. Sou grata também ao meu chefe Fernando Henrichsen Brustolin por permitir a minha ausência quando precisei estar na UNIVATES e mesmo assim sempre me apoiar e incentivar.

Agradeço também a minha querida orientadora, professora Ma. Débora Righi que sempre esteve ao meu lado, me auxiliando e passando seu conhecimento ao longo do meu trabalho. Obrigada por toda dedicação, amizade e paciência, me ajudando a não enlouquecer e te enlouquecer. Sou muito grata por ter tido uma orientadora que tanto admiro. Você é luz.

Agradeço também à equipe do LATEC, Amanda, Tiago e Henrique, que me auxiliaram sempre que precisei, ao pessoal do Laboratório de Processos de Fabricação, Darlei e Cristian por me ajudarem a utilizar o forno mufla e a professora Camille Granada que me ajudou na análise estatística dos meus resultados.

RESUMO

A construção civil possui um grande destaque no uso exagerado de materiais não renováveis, o que gera inúmeros impactos ambientais. Um dos materiais mais utilizados na construção civil é o concreto, sendo constituído pela mistura de cimento Portland, brita, areia e água. Estes materiais não são renováveis o que vem causando uma preocupação mais acentuada sobre a possibilidade de novos materiais nas misturas de concreto. Um bom exemplo de novos materiais é o vidro moído. Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência nas propriedades mecânicas do concreto de cimento Portland com a substituição de 5%, 7% e 10% de vidro moído quando submetido a elevadas temperaturas. A metodologia foi dividida em quatro partes: caracterização dos materiais, dosagem dos concretos, ensaios no estado fresco (*Slump Test* e moldagem dos corpos de prova) e ensaios no estado endurecido (resistência à compressão, tração por compressão diametral, tração na flexão e simulação de elevadas temperaturas). Os ensaios ocorreram aos 28 dias e os corpos de prova foram submetidos ao forno mufla nas temperaturas de 200°C, 400°C e 600°C durante o período de 1 hora, a fim de simular a quantidade de calor que o concreto recebe em uma situação de incêndio. Os resultados demonstraram que aumentou as resistências principalmente nos traços de 5% e 7% de vidro após aquecimento. Dessa forma, a substituição parcial da areia pelo vidro moído é uma alternativa viável na construção civil.

Palavras-chave: Concreto; Incêndio; Vidro moído

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Curva padrão de incêndio.....	16
Figura 2 -	Nível médio de dano apresentado pelo efeito <i>spalling</i>	18
Figura 3 -	Nível alto de dano apresentado pelo efeito <i>spalling</i>	18
Figura 4 -	Programa experimental.....	30
Figura 5 -	Recipiente cilíndrico com a amostra de areia nivelada.....	32
Figura 6 -	Areia no tronco-cônico.....	33
Figura 7 -	Amostra de areia seca.....	34
Figura 8 -	Peneiras utilizadas no ensaio.....	36
Figura 9 -	Amostra de brita coletada.....	38
Figura 10 -	Pesagem do recipiente cilíndrico vazio.....	39
Figura 11 -	Brita colocada no recipiente cilíndrico.....	39
Figura 12 -	Amostra da brita.....	40
Figura 13 -	Amostra da brita em repouso na água.....	41
Figura 14 -	Secagem da amostra da brita.....	41
Figura 15 -	Massa do agregado saturado superfície seca.....	42
Figura 16 -	Garrafas do tipo <i>long neck</i>	45
Figura 17 -	Moinho mecânico de bolas.....	46
Figura 18 -	Vidro moído.....	46
Figura 19 -	Relação água cimento na curva de Abrams.....	50

Figura 20 - Execução das camadas do <i>Slump Test</i>	53
Figura 21 - Molde cônico e concreto moldado.....	53
Figura 22 - Moldagem dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos.....	54
Figura 23 - Ensaio de compressão.....	55
Figura 24 - Ensaio de tração por compressão diametral.....	56
Figura 25 - Ensaio de tração na flexão.....	57
Figura 26 - Corpos de prova no forno mufla.....	58

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Comparação da atividade pozolânica no vidro e nas cinzas volantes.....	25
Gráfico 2 - Relação entre porosidade e resistência do concreto.....	25
Gráfico 3 - Resultados do teste de compressão.....	27
Gráfico 4 - Curva granulométrica da areia, vidro moído e brita.....	28
Gráfico 5 - Curva Granulométrica da areia.....	37
Gráfico 6 - Curva granulométrica do agregado graúdo conforme zona utilizável da brita 1.....	44
Gráfico 7 - Curva Granulométrica do vidro.....	48
Gráfico 8 - Resistência à compressão.....	60
Gráfico 9 - Resistência à tração por compressão diametral.....	62
Gráfico 10 - Resistência à tração na flexão.....	64
Gráfico 11 - Resistência à compressão em situações de incêndio.....	65
Gráfico 12 - Resistência à tração por compressão diametral em situações de incêndio.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Comparação das propriedades do RVL e da NBR 12653.....	24
Tabela 2 -	Distribuição granulométrica da areia.....	36
Tabela 3 -	Zona utilizável da areia.....	37
Tabela 4 -	Distribuição granulométrica da brita.....	43
Tabela 5 -	Zona utilizável da brita.....	44
Tabela 6 -	Distribuição granulométrica do vidro.....	47
Tabela 7 -	Zona utilizável do vidro.....	48
Tabela 8 -	Valor do desvio padrão de dosagem (Sd).....	49
Tabela 9 -	Consumo de água por m ³ de concreto.....	50
Tabela 10 -	Traços.....	52
Tabela 11 -	Comparação da resistência à compressão dos traços de vidro moído de 0%, 5%,7% e 10% no concreto.....	61
Tabela 12 -	Comparação da resistência à tração por compressão diametral dos traços de vidro moído de 0%, 5%,7% e 10% no concreto.....	63
Tabela 13 -	Comparação da resistência à tração na flexão dos traços de vidro moído de 0%, 5%,7% e 10% no concreto.....	64
Tabela 14 -	Comparação da resistência à compressão dos traços de vidro moído de 0%, 5%,7% e 10% no concreto em situações de incêndio.....	66
Tabela 15 -	Comparação da resistência à compressão dos traços de vidro moído de 0%, 5%,7% e 10% no concreto em situações de incêndio em situações de incêndio.....	68

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Problema de pesquisa	10
1.2 Objetivos	10
1.2.1 Objetivo geral	10
1.2.2 Objetivos específicos	10
1.3 Justificativa da pesquisa	11
1.4 Estrutura do trabalho	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 Concretos em situações de Incêndio	13
2.1.2 Dinâmica do fogo	14
2.1.3 Comportamento dos concretos sob elevadas temperaturas	15
2.2 Uso de materiais reciclados em concretos	18
2.2.1 Tipos de materiais reciclados utilizados na construção	19
2.2.2 Vidro moído como alternativa de substituição no concreto	20
2.2.3 Comportamento mecânico de concretos com vidro moído	22
2.2.4 Análise do vidro moído em concreto quando submetidos a elevadas temperaturas	25
3 MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1 Estratégia de Pesquisa	28
3.2 Materiais	29
3.2.1 Cimento	29
3.2.2 Areia	30
3.2.2.1 Determinação da massa unitária e massa específica da areia	30
3.2.2.2 Determinação da granulometria da areia	34
3.2.3 Brita	37
3.2.3.1 Determinação da massa unitária e da massa específica da brita	37
3.2.3.2 Determinação da granulometria da brita	42
3.2.4 Vidro moído	45

3.2.4.1 Moagem do vidro	45
3.2.4.1.1 Determinação da massa unitária e massa específica do vidro	46
3.2.4.1.1 Determinação da granulometria do vidro	47
3.2.5 Água	49
3.3 Dosagem	49
3.4 Ensaio no estado fresco	52
3.4.1 Slump Test	52
3.4.2 Moldagem dos corpos de prova	53
3.5 Ensaio no estado endurecido	55
3.5.1 Resistência à compressão	55
3.5.2 Tração por compressão diametral	56
3.5.3 Resistência à tração na flexão	56
3.5.4 Simulação de Elevadas Temperaturas	57
3.6 Análise estatística	58
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	59
4.1 Análise da Resistência à Compressão	59
4.2 Análise da Resistência à Tração por compressão diametral	61
4.3 Análise da Resistência à Tração na flexão	62
4.4 Análise da Resistência à compressão em situações de incêndio	64
4.5 Análise da Resistência à tração por compressão diametral em situações de incêndio	65
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
REFERÊNCIAS	70
APÊNDICES	77
APÊNDICE A – RESISTÊNCIA DOS CORPOS DE PROVA À COMPRESSÃO SIMPLES, TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL E TRAÇÃO NA FLEXÃO	78
APÊNDICE B – RESISTÊNCIA DOS CORPOS DE PROVA À COMPRESSÃO SIMPLES E TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL SUBMETIDOS AO FORNO MUFLA	80

1 INTRODUÇÃO

A construção civil possui um grande destaque no uso exagerado de materiais não renováveis, o que gera inúmeros impactos ambientais. Conforme Schenini *et al.* (2004), a falta de consciência ecológica acarreta em danos ambientais irreparáveis. No Brasil, por exemplo, além de utilizar-se amplamente matéria-prima não renovável, para a produção ocorre o consumo de grande quantidade de energia, o que o torna um grande gerador de resíduos.

De acordo com Lacórté (2013), no Brasil as políticas públicas relacionadas ao gerenciamento de Resíduos na Construção Civil (RCC), tem como finalidade estimular as empresas que geram grande número de resíduos a mudarem sua conduta em relação aos entulhos gerados em obras. Essa postura demonstra uma maior conscientização em relação aos problemas ambientais, buscando assim desenvolver processos construtivos e materiais que não ocasionam danos ao meio ambiente e ao homem.

Um dos materiais mais utilizados na construção civil é o concreto, sendo constituído pela mistura de cimento Portland, brita, areia e água. Estes materiais não são renováveis o que vem causando uma preocupação mais acentuada sobre o uso de novos materiais nas misturas de concreto. Um bom exemplo de novos materiais é o vidro moído.

O vidro é um material totalmente reciclável e possui propriedades mecânicas que estão diretamente relacionadas ao concreto, possuindo cerca de 72% de sílica e sendo composto basicamente por areia. Em sua forma pura, o vidro é um óxido metálico super esfriado

transparente, com elevada dureza e inativo biologicamente. Possui propriedades químicas como baixa porosidade, dilatação, absorvidade e condutibilidade térmica, o que o faz suportar altas pressões (FERRARI, 2010).

O material a ser estudado neste trabalho é o vidro em forma de pó, resultado do processo de moagem de garrafas de cerveja do tipo *long neck*, substituindo a areia como agregado miúdo em diferentes teores no concreto. O reaproveitamento do vidro tem como objetivo diminuir os danos causados ao meio ambiente, reduzindo desta forma a extração de matéria-prima e o volume descartado, buscando melhorar as propriedades do concreto e satisfazer os requisitos estabelecidos pela norma. A pesquisa contemplará a avaliação do comportamento dos concretos submetidos a elevadas temperaturas, simulando dessa maneira situações de incêndio.

1.1 Problema de pesquisa

Qual a influência nas propriedades mecânicas do concreto de cimento Portland com a adição de diferentes teores de vidro moído quando submetido a elevadas temperaturas?

1.2 Objetivos

Nos itens a seguir são apresentados os objetivos geral e específicos.

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar o comportamento mecânico de diferentes concretos com substituição do agregado miúdo por vidro moído em situações de incêndio.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) avaliar a influência dos diferentes teores (5%, 7% e 10%) na substituição do agregado miúdo por vidro moído proveniente da moagem de garrafas do tipo *long neck* em concretos convencionais;
- b) avaliar a trabalhabilidade dos concretos com vidro moído no estado fresco;

- c) analisar a resistência mecânica dos concretos com vidro moído quando submetido à esforços de compressão;
- d) avaliar o comportamento mecânico de concretos com vidro moído após submetidos a situações de incêndio.

1.3 Justificativa da pesquisa

O descarte de forma incorreta do vidro no meio ambiente, assim como o aumento significativo dos resíduos destinados a aterros inspiram a busca por soluções sustentáveis. No setor da construção civil, os materiais recicláveis vem ganhando cada vez mais espaço. Existem várias pesquisas relacionadas a substituição do cimento ou agregado miúdo pelo vidro moído no concreto, sendo este um dos produtos mais fabricados no ramo civil.

Considerando que as garrafas de vidro do tipo *long neck* são muito comercializadas, torna-se bastante atrativa a possibilidade de utilizá-las em forma de vidro moído na substituição do agregado miúdo. Righi *et al.* (2012) utilizaram o vidro moído de garrafas *long neck* no seu estudo sobre a resistência do concreto com vidro moído submetido a elevadas temperaturas.

Com o intuito de estudar as melhorias das propriedades mecânicas do concreto, este trabalho busca também analisar o comportamento mecânico do concreto com adição de vidro moído após a exposição a elevadas temperaturas, simulando dessa forma a degradação do concreto quando a estrutura é exposta a incêndios.

Conforme Neville (2013), o concreto além de ser um material não combustível e com baixa condutividade térmica, possui um bom desempenho quando submetido ao calor devido não ocorrer o desprendimento de gases tóxicos quando submetido ao processo de aquecimento, além de manter boas características ao longo de um tempo relativamente longo.

De acordo com Morales *et al.* (2011), dentre as inúmeras propriedades do concreto são realizadas pesquisas principalmente em relação a resistência à compressão, a resistência à tração e o módulo de elasticidade. Em relação ao comportamento do concreto em situações de incêndio, ocorre a diminuição da água presente em sua interface e após ser submetido a um

resfriamento, o concreto passa a apresentar baixa resistência mecânica. Assim, a adição de um material, como agregado, pode contribuir com o aumento da resistência em situações de incêndio. Estudos apresentam o vidro moído como um dos agregados que podem auxiliar o concreto nesse contexto.

1.4 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos, sendo o primeiro capítulo destinado para a introdução, problema de pesquisa, objetivo geral, objetivos específicos e justificativa da pesquisa.

O segundo capítulo é composto pela revisão bibliográfica, onde é abordado assuntos sobre o vidro, caracterização de seus componentes, concretos em situações de incêndio, dinâmica do fogo, comportamento dos concretos sob elevadas temperaturas, uso de materiais reciclados no concreto, tipos de materiais reciclados utilizados na construção civil, comportamento mecânico de concretos com vidro moído em concreto quando submetidos a elevadas temperaturas.

O terceiro capítulo está restrito aos materiais e métodos que serão utilizados no decorrer da pesquisa, programa experimental e o planejamento dos ensaios.

O quarto capítulo apresenta os resultados e discussões da pesquisa e o quinto capítulo é composto pelas considerações finais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Concretos em situações de Incêndio

De acordo com Silva (2004), o incêndio é formado por três fases, sendo estas, a fase de ignição, aquecimento (aumento da temperatura) e resfriamento (diminuição da temperatura). Há uma fase média entre a fase de ignição e a fase de *flashover*, conhecida como *pré-flashover*, que é considerado o período de maior crescimento de temperatura em um incêndio real, sendo este o momento em que todo material combustível entra em combustão espontânea. *Flashover* também é conhecido como inflamação generalizada e representa a transição de um incêndio localizado para um incêndio generalizado, onde toda a superfície entra em chamas.

Conforme Costa (2008), o concreto armado possui um bom desempenho na compressão. Quando o concreto é submetido a elevadas temperaturas, superiores a 100 °C, perde a característica de ser um material que apresenta adesão entre seus elementos à medida que a temperatura aumenta devido a transformações químicas, físicas e mineralógicas.

Para que se possa executar uma análise precisa das estruturas submetidas a elevadas temperaturas, deve-se conhecer as propriedades térmicas do material, como massa específica, calor específico, condutividade térmica e expansão térmica. Também se faz necessário conhecer as propriedades mecânicas do material, como por exemplo, resistência à compressão e à tração, módulo de elasticidade e as relações tensão-deformação (COSTA, 2008).

2.1.2 Dinâmica do fogo

De acordo com a NBR 13860 (ABNT, 1997), o fogo é definido como um processo de combustão com característica de emitir luz e calor. O fogo também é conhecido como combustão e é caracterizado por um fenômeno químico, cujo material combustível junta-se ao comburente e passam a ser impulsionados por uma fonte de calor, iniciando assim a transformação, sucedendo no desenvolvimento de uma reação em cadeia e a produção de luz e calor (CAMILLO JUNIOR, 2013).

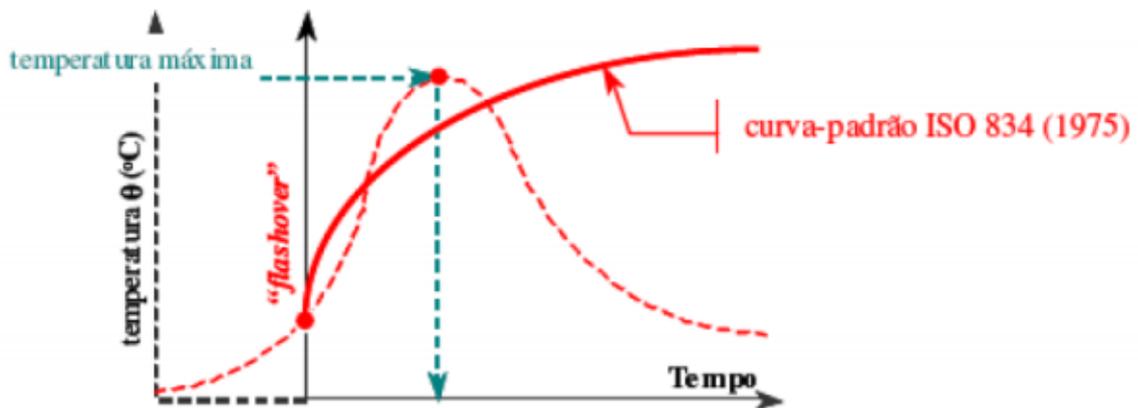
A norma ainda cita que o combustível pode ser encontrado no estado sólido, líquido e gasoso e é considerado como todo tipo de material capaz de queimar, responsável pelo alastramento do fogo e pela sustentação. Quando estiver em estado sólido ou líquido, o combustível pode ser combinado com o estado comburente e acabar inflamando. O comburente é definido como o elemento que ativa e mantém o fogo, o mais comum é o oxigênio. Quando o fogo estiver em um ambiente com grande quantidade de oxigênio, as chamas aumentam, gerando dessa forma mais luz e calor. Ao contrário, em ambientes com pouca quantidade de oxigênio, a queima ocorre de forma mais lenta e forma brasas, não ocorrendo mais a formação de chamas (CAMILLO JUNIOR, 2013).

Para Camillo Junior (2013), o fogo se alastra ao entrar em contato com outros materiais combustíveis, devido ao fato de ocorrer o deslocamento de partículas incandescentes que se despreendem dos materiais que já estão na fase de combustão e também pela ação direta do calor.

De acordo com Castro (2005), o desenho de um incêndio é representado por curva de temperatura X tempo que associa o aumento da temperatura em função da duração do incêndio. Para esta curva tem-se um padrão recomendado pela NBR 5628 (ABNT, 2001) e pela ISO 834 (1999), e é um modelo utilizado para análises de experimentos. Apesar de não representar a realidade de um incêndio, auxilia nos ensaios dos materiais e elementos de construção. São recomendadas internacionalmente em normas e procedimentos de ensaios pela sua praticidade (COSTA E SILVA, 2006).

A Figura 1 representa a curva padrão de incêndio demonstrada pela linha contínua desenvolvida pela ISO 834 (1999) e a variação de temperatura de um incêndio. Pode-se observar o ponto de flashover que é caracterizado pela inflamação generalizada do ambiente.

Figura 1 - Curva padrão de incêndio



Fonte: Negriscolo (2011, p.209).

Com base na curva de temperatura X tempo dos gases de um incêndio, observa-se e determina o campo de temperatura nos elementos estruturais e a suas dimensões. A maioria dos códigos internacionais utiliza o conceito de Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) para realizar o dimensionamento das estruturas. O TRRF é considerado como o tempo que está relacionado com a temperatura do incêndio que é utilizada no cálculo com base na curva padrão. No Brasil, o TRRF é determinado pela NBR 14432 (ABNT, 2001) e por Instruções Técnicas dos Corpos de Bombeiros (Melão, 2016).

2.1.3 Comportamento dos concretos sob elevadas temperaturas

Uma vantagem dos elementos constituintes do concreto é a elevada resistência ao fogo, sendo maior até em comparação aos elementos de aço. O concreto apresenta uma resistência ao calor por um determinado tempo sem entrar em colapso, porém a capacidade estrutural do concreto submetido a elevadas temperaturas apresenta uma considerável redução (LIMA *et al.*, 2004).

Conforme Rocha e Silva (2017), o concreto em situação de incêndio é eficiente na proteção do aço a excessivas temperaturas, refletindo em resistência estrutural que permite

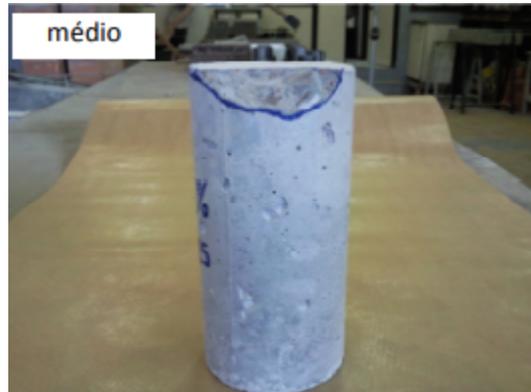
que a estrutura não sofra danos por um maior tempo, permitindo a fuga das pessoas. Porém, os constituintes do concreto podem reagir quimicamente devido à exposição ao fogo e a taxa de aquecimento do material.

Apesar do concreto ser considerado um material de resistência ao fogo, a exposição a elevadas temperaturas causa alterações na microestrutura e também nas propriedades. Nas altas temperaturas, ocorre a transformação dos cristais que constituem o concreto, provocando assim perda de resistência, rigidez e gerando a deterioração da pasta de cimento endurecida (KIRCHHOF, 2010).

A deterioração do concreto quando submetido ao fogo se manifesta através de rachaduras, estalos e lascamentos podendo ser explosivos ou não. O lascamento, também conhecido como *spalling*, é um fenômeno natural nas estruturas de concreto quando estão expostas a elevadas temperaturas. No interior do concreto ocorre o desenvolvimento de tensões de origem térmica, que influenciam na desintegração das regiões superficiais dos elementos estruturais (PURKISS, 1996).

De acordo com Tenchev e Purkiss (2001), o lascamento explosivo está relacionado com o comportamento da pasta de cimento devido à ação combinada da pressão nos poros e das tensões térmicas internas que são introduzidas por gradiente de temperatura. O “spalling” quando submetido a elevadas temperaturas é considerado um fenômeno comum de desagregação do concreto, podendo se manifestar através de desprendimento do cobrimento, também conhecido como *sloughing* e estilhaçamento violento *explosive spalling*, conforme pode-se observar nas Figuras 2 e 3. Nos concretos de alta resistência ocorrem lascamentos prematuros.

Figura 2 – Nível médio de dano apresentado pelo *spalling*



Fonte: Kirchof (2010, p. 133).

Figura 3 – Nível alto de dano apresentado pelo *spalling*



Fonte: Kirchof (2010, p. 133).

A delaminação natural, também conhecida como *sloughing*, é o desprendimento de uma fração considerável de concreto e de perda geral do material. Possui efeito progressivo por deixar novas camadas de concreto endurecido expostas às chamas, conduzindo assim a novos descascamentos e a perda de aderência entre o cobrimento da armadura e a própria armadura. O lascamento explosivo “explosive spalling”, representa perda parcial de material, instantânea e violenta com liberação de energia que forma cavidades nos primeiros 30 minutos de incêndio. O teor de umidade, velocidade de aquecimento, porosidade, tipos de agregados do concreto e detalhamento da armadura são fatores que influenciam no aparecimento dos lascamentos (BICKLEY e MITCHELL, 2001).

2.2 Uso de materiais reciclados em concretos

Conforme a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a reciclagem é um processo que modifica os resíduos através da alteração das propriedades físicas, químicas ou biológicas, com o objetivo de transformar em novos produtos (BRASIL, 2010).

De acordo com John (2000), a reciclagem é uma atividade que acontece desde antigamente, devido a razões econômicas e utilização dos resíduos como material de construção é primordial para que se atinja o desenvolvimento sustentável. O setor da construção civil possui um grande destaque por ser um consumidor de matérias-primas naturais, renováveis ou não renováveis. Na produção da argamassa e concreto, o Brasil consome aproximadamente 220 milhões de toneladas de agregados naturais.

A utilização de resíduos na produção de concreto é um fator muito importante para o meio ambiente, pois diminui a utilização e a extração de matérias-primas que antes seriam necessárias. A procura por novos produtos e pela reutilização de materiais que até então eram considerados resíduos industriais cresceu significativamente, como por exemplo, os materiais reciclados, que podem surgir dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD) ou também Resíduos da Construção Civil (RCC) Conama (BRASIL, 2002). De acordo com a NBR 15116 (ABNT, 2004), são considerados “Resíduos Classe A” os materiais que podem ser reciclados na forma de agregado, como o concreto, argamassa, tijolo e pedra. Estes materiais são triturados para serem utilizados no lugar da areia, pedrisco ou brita.

Segundo o Conama (BRASIL, 2002), o reaproveitamento dos resíduos pode ocorrer através da reutilização, recuperação e reciclagem. Na reutilização ocorre o reuso do resíduo, sem qualquer transformação. A recuperação é o processo de extração e remoção de substâncias indesejáveis presentes nos resíduos e podem acabar comprometendo a reciclagem, processo em que ocorre o reaproveitamento dos resíduos sendo necessário que os materiais passem por uma transformação para serem reutilizados.

De acordo com Di Giulio (2007), houve um grande avanço tecnológico em todas as áreas de construção, desde materiais, misturas, projetos, dimensionamentos e testes, no entanto, ainda há uma grande procura por novos tipos de materiais alternativos. São realizadas

pesquisas sobre qualquer tipo de material descoberto, com o objetivo de buscar materiais que possam aumentar o desempenho mecânico e a durabilidade. A tecnologia do concreto foi revolucionada com a utilização de aditivos químicos, concretos leves, ar incorporado, concreto de alta resistência, concreto de alto desempenho, concreto com a utilização de vidro moído e com adição de materiais como cinzas vulcânicas, métodos que buscam melhorar o compósito.

2.2.1 Tipos de materiais reciclados utilizados na construção

O esgotamento dos materiais naturais e o impacto ambiental causado pela exploração dos mesmos vem causando a busca por materiais alternativos e a reutilização dos materiais que eram considerados resíduos industriais (ALMEIDA, 2016).

Os resíduos adicionados ao concreto possuem a finalidade de melhorar as características mecânicas, assim como diminuir a quantidade dos mesmos em aterros. A utilização dos resíduos como agregado é influenciada pela trabalhabilidade e também pelas propriedades físicas e mecânicas. Dessa forma, é de extrema importância analisar a granulometria, absorção de água, resistência à tração e compressão, módulo de elasticidade e substâncias nocivas presente nos materiais, antes de utilizar os resíduos como agregado (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Os minerais são materiais silicosos moídos finamente e adicionados ao concreto em grandes quantidades, geralmente entre 20% e 70% da massa do material cimentício total. A utilização dos minerais na produção do concreto apresenta vantagens econômicas, tecnológicas e ambientais, devido ocorrer a destinação dos resíduos que até então seriam resíduos problemáticos, como a sílica ativa, escória de alto forno e cinzas vulcânicas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Conforme Almeida (2016), diversos materiais provindos dos RCD, como vidro moído, agregados artificiais, pó de pedra e borracha vulcanizada podem ser utilizados na substituição parcial do agregado natural.

Na indústria da construção civil a sílica ativa é muito utilizada por agregar características como durabilidade e resistência ao concreto e ser economicamente viável.

Conforme Mehta e Monteiro (2014), a sílica ativa é um subproduto proveniente da indústria de silício metálico e de ligas de ferro-silício, composta principalmente de sílica amorfa. Também considerada uma super pozolana, a sílica ativa se comparada ao cimento Portland comum, apresenta uma distribuição granulométrica de duas ordens de grandeza mais fina, o que torna este material altamente pozolânico e aumenta o consumo de água do concreto. A sílica é considerada uma super pozolana, pois ao ser adicionada ao concreto possui ação química como material pozolânico de alta reatividade. Também é altamente pozolânica por ser constituída de sílica não cristalina.

Conforme Máximo (2016), o vidro é um material que é produzido há séculos e é composto por areia, cal e substância alcalina. É considerado um material pozolânico, que possui propriedades cimentantes, devido ao fato de reagir com água, ser um material amorfo e possuir grande quantidade de silício e cálcio.

O vidro é um material que pode ser 100% reciclado, gerando dessa forma a mesma quantidade de vidro novo e da mesma qualidade. Por apresentar propriedades pozolânicas, o vidro quando moído em forma de pó é uma ótima opção para a substituição parcial de cimento, sendo que quanto mais fino o vidro estiver moído, maior será a atividade pozolânica. A substituição da areia natural por vidro moído também apresenta resultado positivo, além de reutilizar o material de forma sustentável (SIMÕES *et al.*, 2013).

2.2.2 Vidro moído como alternativa de substituição no concreto

Conforme Miranda Júnior e Paiva (2012), estuda-se vários materiais em sua composição a fim de buscar melhorias no comportamento do concreto. Muitos destes estudos, evidenciam a substituição da areia pelo vidro moído como agregado miúdo.

O pó de vidro oriundo da moagem ou quebra de peças de vidro e o pó originado no processo de jateamento com microesferas de vidro são considerados impurezas nos processos de separação dos materiais e reciclagem, devido aumentar o pH e a turbidez da água se forem lavado nas águas de rios (LUZ; RIBEIRO, 2008).

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), um dos principais assuntos estudados é a aplicação dos resíduos de vidro como materiais de construção em matrizes cimentícias. Estes

estudos mostram o potencial do uso desse resíduo como substituição de forma parcial dos agregados, aglomerantes ou pozolanas em argamassas e concretos. Há inúmeros tipos de vidros com composição diferente, o que fomenta ainda mais o estudo deste material vítreo, para que assim possa ser observado ações nas propriedades específicas tanto das argamassas quanto dos concretos. A quantidade de sílica (SiO_2) na composição química dos vidros é o principal componente do material.

Conforme Crentsil *et al.* (2011), a substituição do agregado miúdo pelo vidro moído no concreto é uma prática que ocorre há muitos anos em diversos países, como na Austrália, por exemplo, onde realizam o processo em que o vidro recolhido dos aterros sanitários é reciclado, moído e assim adicionado na mistura para a produção de concreto. No Brasil, o que dificulta essa prática é o custo elevado para se obter os resíduos de vidro e também a maior facilidade de destinar os resíduos nos aterros sanitários. O processo de separação dos resíduos é complexo, pois deve-se separar por cores e tipos de materiais, já que possuem diferentes composições e propriedades (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

De acordo com Abividro (2021), o vidro é considerado uma substância inorgânica que não possui estrutura atômica definida e fisicamente homogênea. Pode ser encontrado no resfriamento de uma massa em fusão como também no aquecimento de óxidos em temperaturas que variam de $1500\text{ }^\circ\text{C}$ a $1600\text{ }^\circ\text{C}$. Através da elevação da temperatura o vidro torna-se fluido, o que permite moldar o material em diferentes formas e após resfriar sob condição de temperatura controlada.

Através da avaliação do Índice de Atividade Pozolânica (IAP), conforme a NBR 5751 (ABNT,1992), nota-se que o vidro moído possui uma boa atividade pozolânica, sendo assim uma alternativa de adição ao concreto (PINTO; -COELHO, 2009). Os estudos realizados por pesquisadores resultaram no grande potencial pozolânico do vidro, quando o mesmo é moído com uma granulometria abaixo de $75\text{ }\mu\text{m}$, devido à quantia de sílica amorfa presente na sua composição, tornando assim o vidro moído um material com efeito pozolânico (SIMÕES *et al.*, 2013).

Conforme Simões *et al.* (2013), a melhor maneira de utilizar os resíduos de vidro é na forma de pó e deve ser realizada a substituição parcial de cimento, pois quanto mais fino for, maior será a atividade pozolânica.

De acordo com Righi *et al.* (2012), o resíduo de vidro quando possui uma granulometria superior a 300 µm não é considerado eficiente para a substituição do agregado miúdo no concreto, devido à perda de resistência na reação álcalis do cimento quando reage com sílica de vidro, além de causar a expansão do material.

2.2.3 Comportamento mecânico de concretos com vidro moído

Conforme Marques *et al.* (2012), um dos materiais mais utilizados na construção civil é o concreto, cujos componentes mais utilizados na sua composição são cimento Portland e agregados. Desta forma, há inúmeros estudos em relação a alternativas de materiais que possam ser utilizados na composição do concreto, a fim de diminuir a remoção de matéria prima natural não reciclável do meio ambiente.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), o concreto é proveniente das reações químicas ocasionadas por misturas homogêneas de cimento, agregado miúdo, grão e água que liberam calor. As características como trabalhabilidade, plasticidade, resistência à água, menor consumo de energia, custo baixo, facilidade de acesso, resistência térmica e resistência à compressão tornam o concreto um material muito utilizado na área da construção civil. As propriedades do concreto podem variar de acordo com o cimento utilizado na fabricação, influenciando na qualidade e homogeneidade da mistura.

A substituição do agregado miúdo em sua totalidade pelo vidro moído com Módulo de Finura (MF=3) apresenta no teste de compressão resistência 10% maior que o traço de referência. O vidro moído adicionado na proporção de 10% e com granulometria passante na peneira de nº 200, na substituição do cimento, resulta no aumento de 20% da resistência à compressão em comparação ao traço de referência (FÁVERO, 2009).

Conforme Simões *et al.* (2013), a caracterização dos resíduos de vidro foi realizada em diversos testes, sendo estes técnica de fluorescência de raios-X, análise física, perda ao fogo,

análise mineralógica e análise da pozolanicidade, cujos resultados podem ser observados na Tabela 1.

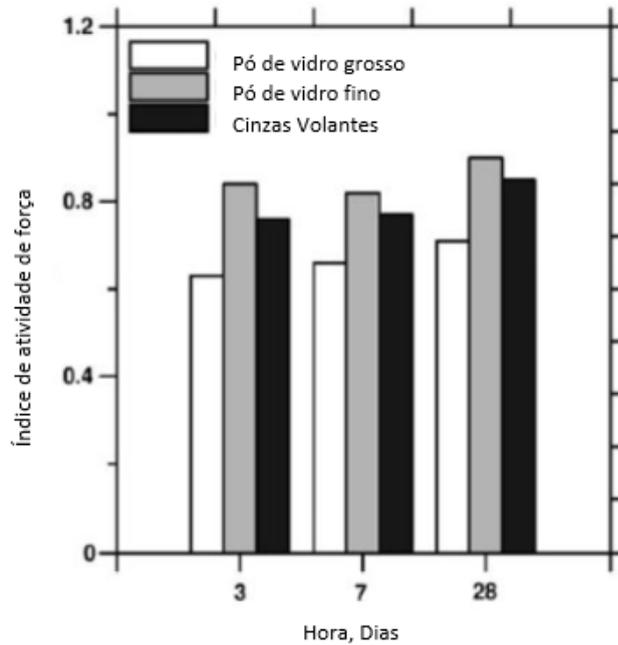
Tabela 1- Comparação das propriedades do RVL e da NBR 12653

Propriedades	Limites- NBR 12653 para diferentes classes de material pozolânico			
	N	C	E	RVL
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ % min	70	70	50	63,13
SO ₃ % máximo	4	5	5	0,16
Teor de umidade % máxima	3	3	3	3,67
Perda ao fogo % máxima	10	6	6	11,81
álcalis disponíveis em Na ₂ O % máx.	1,5	1,5	1,5	15,41
% máxima retida na peneira 45 µm	34	34	34	4,5
índice de atividade pozolânica:				
- Com a cal aos 7 dias, em MPa	6	6	6	4,77
- Com cimento aos 28 dias, em relação ao controle % min.	75	75	75	86,36
- Água requerida % máx.	115	110	110	100,04

Fonte: Simões *et al.* (2013).

De acordo com Schwarz e Neithalath *apud* Simões (2013), através dos ensaios realizados de comparação das propriedades das cinzas volantes, vidro moído grosso e vidro moído fino, no período de 3, 7 e 28 dias, obtiveram resultados cujo vidro com granulometria fina apresentou maior atividade pozolânica em relação às cinzas volantes em todos períodos, conforme o Gráfico 1.

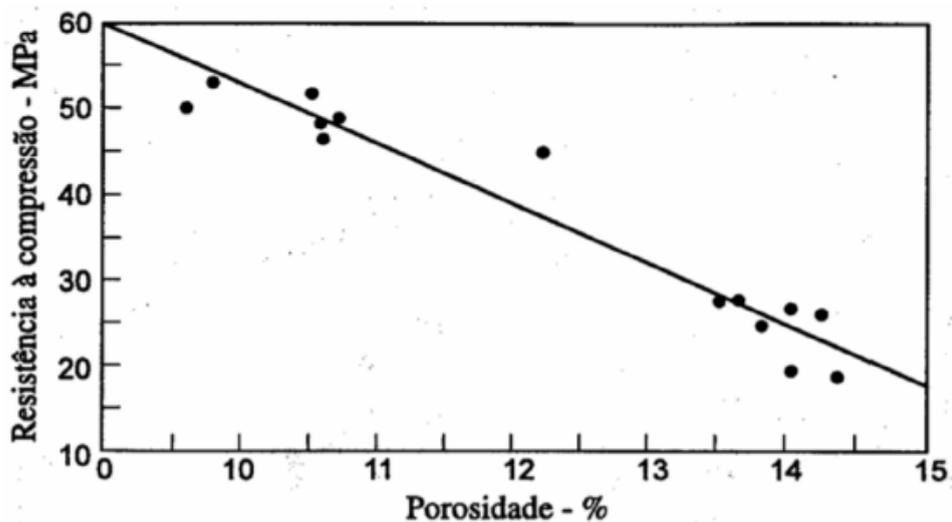
Gráfico 1 – Comparação da atividade pozolânica no vidro e nas cinzas volantes



Fonte: Adaptado Schwarz e Neithalath *apud* Simões (2013).

Conforme Neville e Brooks (2013), os estudos de resistência do concreto demonstram que conforme a porosidade aumenta, o fator água/cimento aumenta na mesma proporção, resultando assim na menor resistência do concreto, conforme pode-se observar no Gráfico 2, através da diminuição da resistência de acordo com com aumento de porosidade.

Gráfico 2- Relação entre porosidade e resistência do concreto



Fonte: Neville e Brook (2013).

Segundo NBR 5739 (ABNT, 2018), a resistência à compressão é obtida através de ensaios com corpos de provas com dimensões conforme padrão da norma e são curados em uma câmara úmida com temperatura controlada em torno de 20 °C. Após esta etapa, os corpos de prova possuem as suas faces refeitas e são submetidos ao teste de compressão através de uma prensa hidráulica onde são submetidos a um carregamento de forma contínua até romper.

De acordo com Neville (2013), no decorrer das pesquisas realizadas com a incorporação de vidro no concreto, acredita-se que ocorre a reação álcali-sílica entre os álcalis do cimento e da sílica do vidro. A reação álcali-sílica inicia através do ataque dos minerais siliciosos do agregado pelos hidróxidos alcalinos resultantes dos álcalis do cimento, surgindo um gel de álcali-silicato nos poros do agregado onde encontra-se a sílica.

Para Fávero (2009), para que ocorra a diminuição da reação álcali-agregado, deve-se adicionar pozolanas no concreto que possui o vidro moído como substituto do agregado, sendo este acrescentado em forma de pó, a fim de garantir as propriedades pozolânicas conforme as porcentagens que forem adicionadas, podendo assim ser reduzida ou até mesmo inibir esta reação. O controle da reação consiste em diversos fatores, como por exemplo, a escolha de um cimento com teor reduzido de álcalis, uso de agregados sem potencial reativo, presença de umidade e temperatura (RIBEIRO, 2015).

2.2.4 Análise do vidro moído em concreto quando submetidos a elevadas temperaturas

O concreto apresenta um bom desempenho quando submetido ao calor, visto que durante o processo de aquecimento não acontece o desprendimento de gases tóxicos e o intervalo de tempo que o concreto resiste ao calor é considerado relativamente longo. É considerado um material não combustível e que possui baixa condutividade térmica, porém em certas condições, os efeitos do aquecimento podem variar, ocasionando dúvidas sobre o desempenho de alguns concretos (NEVILLE, 2013).

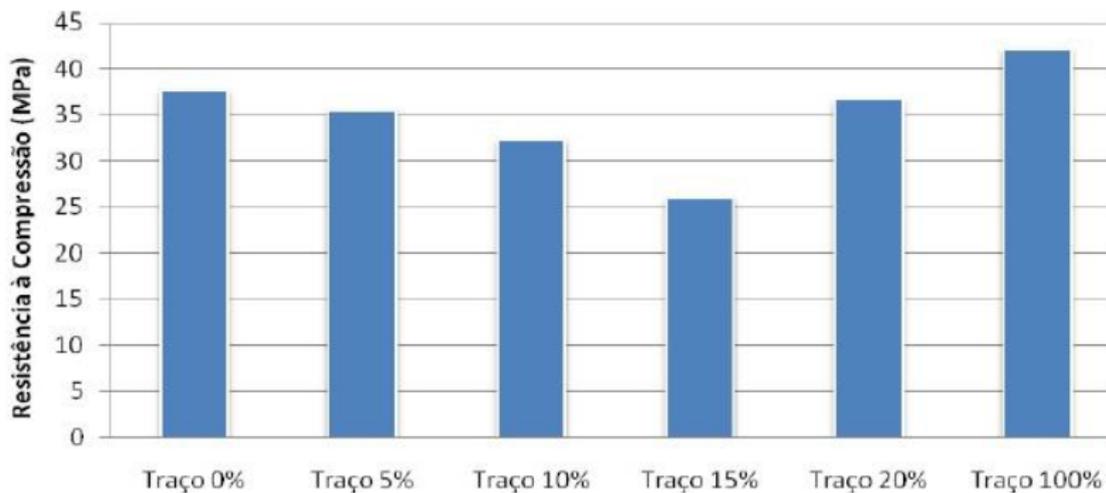
Conforme estudos e experimentos de Barroso *et al.* (2010), a adição de vidro moído em concreto na temperatura ambiente apresenta redução de 15% da resistência em relação ao concreto de referência, porém nos traços com 100% de substituição a resistência é maior do que o concreto de referência. Este comportamento é resultado do aumento do teor de finos da

mistura em comparação com a curva granulométrica da areia, visto que o vidro moído passa pela peneira de malha 4,8 mm.

De acordo com Lima (2005), a exposição do concreto na temperatura de 600 °C em vários intervalos de tempo ocasiona uma redução de forma gradual na resistência à compressão, sendo proporcional ao tempo de exposição. A exposição do concreto com teor de 100% de substituição não apresenta nenhum resultado nos intervalos de tempo na exposição da mesma temperatura, devido aos corpos de prova sofrerem spalling e apresentarem comportamento de concreto de alta resistência pela presença de finos, onde ocorre a liberação da pressão interna do vapor durante o aquecimento sendo dificultada pela matriz ser muito compacta.

Os estudos realizados por Righi *et al.* (2012) apresentam, conforme o Gráfico 3, os resultados que os demais autores já esperavam conforme o seu experimento do ensaio de compressão. A substituição nos traços com 15% de areia por vidro moído de garrafas, apresentaram resistência à compressão inferior ao do traço de referência, no entanto, os traços com substituição total de areia pelo vidro moído, resultaram na resistência à compressão maior do que o traço de referência.

Gráfico 3 – Resultados do teste de compressão

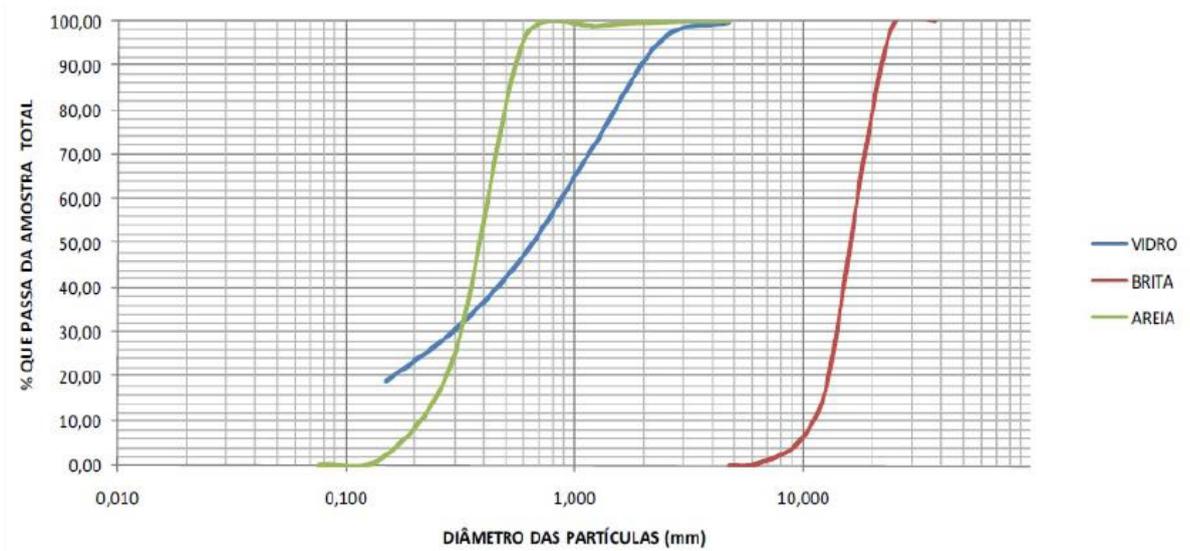


Fonte: Righi *et al.* (2012).

Conforme Righi *et al.* (2012), observa-se que o aumento da resistência à compressão nos traços com substituição total de areia pelo vidro moído das garrafas, é devido ao aumento

do teor de finos, levando em consideração a curva granulométrica do vidro e da areia, conforme o Gráfico 4.

Gráfico 4 – Curva granulométrica da areia, vidro moído e brita



Fonte: Righi *et al.* (2012).

A reação álcali-agregado é considerada uma propriedade que o composto de um agregado possui ao reagir com a pasta de cimento e é de extrema importância devido a substituição de agregados por vidro moído (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Para Mehta e Monteiro (2014), a reação álcali-agregado depende da granulometria das partículas, da temperatura e do tempo e pode causar deterioração no concreto, devido à formação de um gel sílico-alcálico que acaba absorvendo a água por osmose e gerando, assim, expansão. Conforme Ribeiro (2015), para que ocorra o controle da reação álcali-agregado, deve ser feita a escolha de um cimento com teor de álcalis reduzido, utilizar agregados sem potencial reativo e controlar a umidade e a temperatura.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

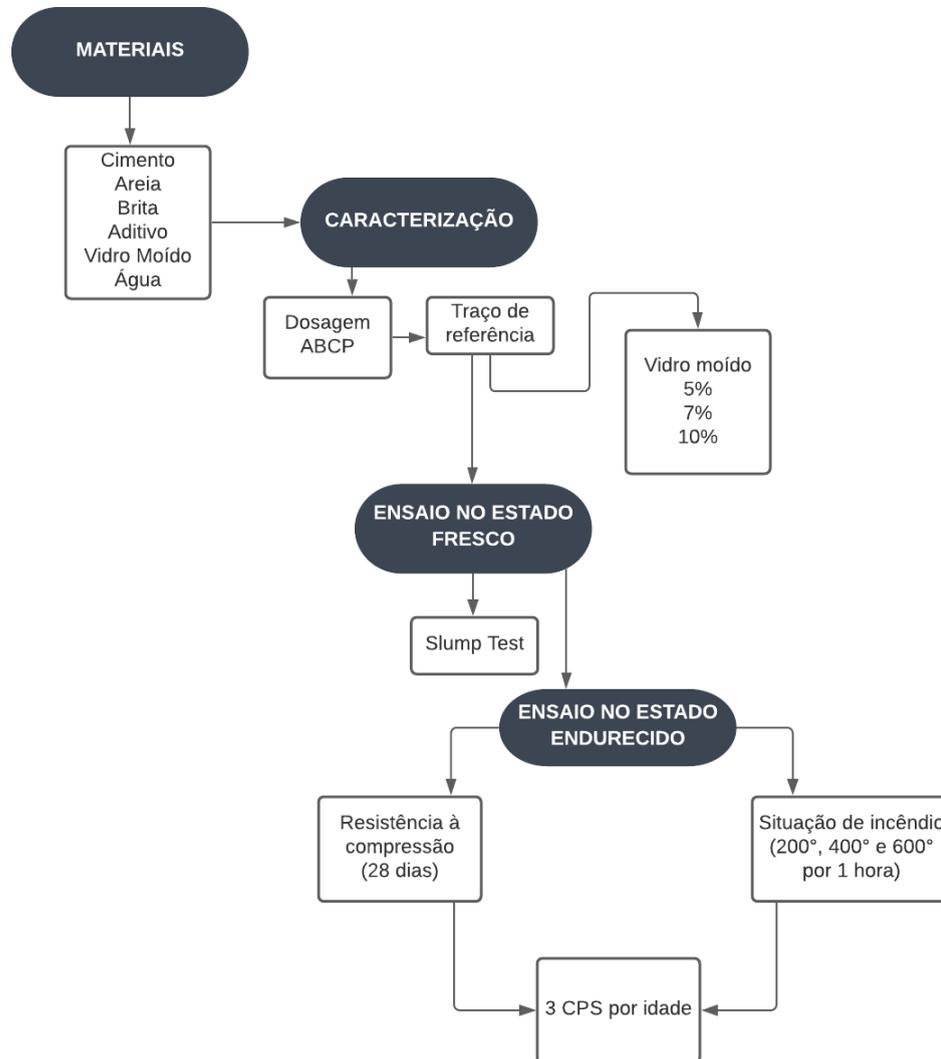
Para a realização deste trabalho, conforme os objetivos propostos, foi desenvolvido um programa experimental composto por materiais, dosagens, ensaios e equipamentos conforme as normas brasileiras.

3.1 Estratégia de Pesquisa

Neste trabalho foi realizada a produção de concretos com a substituição do agregado miúdo por vidro moído submetido a elevadas temperaturas. O vidro que foi utilizado nos ensaios foram de garrafas, do tipo *long neck*, devido à grande quantidade e à falta de destinação adequada na região do Vale do Taquari-RS. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Tecnologia da Construção da Universidade do Vale do Taquari (LATEC) - UNIVATES. O programa experimental está apresentado na Figura 4.

A primeira etapa deste trabalho destinou-se para a preparação e moagem do vidro moído, juntamente com a caracterização dos materiais que foram utilizados no concreto. Após esta etapa, foi realizado o estudo de dosagem dos concretos pelo método da ABCP. Com a definição do traço referência, o agregado miúdo foi substituído nas porcentagens de 5%, 7% e 10% por vidro moído. Por fim, foram moldados corpos de prova para a realização dos ensaios tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

Figura 4 - Programa experimental



Fonte: Da autora (2021).

3.2 Materiais

Os concretos foram produzidos através da mistura de cimento, água, brita, areia, aditivo e vidro moído. Estes materiais, exceto o vidro moído, foram fornecidos pelo LATEC.

3.2.1 Cimento

O cimento utilizado foi o Cimento Portland (CP), do tipo CP-V- ARI RS, marca Cimpor. Este cimento, segundo o fabricante, além de possuir alta resistência a sulfatos, atendendo assim a NBR 5737 (ABNT, 1992), alta resistência inicial atendendo os requisitos

da NBR 5733 (ABNT, 1991), proporciona maior rendimento ao concreto e é indicado para a utilização em estruturas que precisam de altas resistências iniciais e desformas rápidas. Realizou-se também, o ensaio de massa específica segundo as recomendações da NBR 16605 (ABNT, 2017) resultando em $2,83 \text{ g/cm}^3$.

3.2.2 Areia

A areia que foi utilizada é de origem natural quartzosa, do tipo média da região do Vale do Taquari/RS. Para determinar a caracterização deste material, foram realizados os ensaios de massa específica, conforme a NBR NM 52 (ABNT, 2009) e determinação granulométrica conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Após o ensaio de granulometria, foi realizada a curva granulométrica de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2019).

3.2.2.1 Determinação da massa unitária e massa específica da areia

A massa unitária da areia foi determinada através da NBR 16972 (ABNT, 2021) pelo método C. Para a realização deste ensaio foram utilizados uma amostra de areia, recipiente cilíndrico, haste de adensamento e balança. Foi registrado no primeiro momento, a massa do recipiente cilíndrico vazio e após foi despejada a amostra de areia na altura máxima de 50 mm da borda do recipiente. Após esta etapa, foi realizado o nivelamento da camada superficial conforme a Figura 5.

Figura 5 - Recipiente cilíndrico com a amostra de areia nivelada.



Fonte: Da autora (2021).

Após o nivelamento foi realizada a medição da massa do recipiente + agregado e em seguida, utilizou-se a Equação 1 para obter a massa unitária da areia.

$$\rho_{ap} = \frac{(m_{ar} - m_r)}{V} \quad (01)$$

Sendo que:

ρ_{ap} = massa unitária do agregado (Kg/m³)

m_{ar} = massa do recipiente + agregado (Kg)

m_r = massa do recipiente vazio (Kg)

V = volume do recipiente (m³)

A massa específica da areia foi determinada conforme a NBR 16916 (ABNT, 2021). Para a realização desse ensaio foi necessário uma amostra de 1kg de areia que foi colocada com água em repouso por 24 horas. Após esse período, a amostra foi retirada e posteriormente

colocada em um recipiente para secar com corrente de ar, a fim de se obter uma secagem uniforme do agregado.

Após a amostra estar completamente seca foi utilizado o molde tronco-cônico, conforme a Figura 6, e aplicado 25 golpes suavemente na superfície para depois retirar o molde. O procedimento deve ser repetido caso o molde quando for retirado ainda apresentar-se em formato de cone, o que demonstra que o agregado não chegou na condição saturada com a superfície totalmente seca.

Figura 6 - Areia no tronco-cônico



Fonte: Da autora (2021).

Com a areia seca, pegou-se uma amostra de 500g (ms) e colocou-se num cilindro, conforme a Figura 7. Foi realizada a medição da massa do conjunto frasco mais a amostra (m1) e após foi preenchido o cilindro com água até 500ml, movimentando de forma circular com o objetivo de eliminar as bolhas de ar.

Figura 7 - Amostra de areia seca



Fonte: Da autora (2021).

Após 1h em repouso, o frasco foi completado com água até a marca de 500ml e pesado toda a massa do conjunto (m_2). Em seguida, a amostra foi colocada numa estufa por 24 horas na temperatura de 105°C , até se obter uma massa constante para depois ser pesada a amostra seca (m). A massa específica foi obtida através das seguintes equações 2, 3 e 4:

$$\rho_s = \frac{m}{V - V_a} \quad (02)$$

Onde:

ρ_s = densidade do agregado na condição seca (g/m^3)

m = massa da amostra seca (g)

V = volume do frasco (cm^3)

V_a = volume de água adicionado ao frasco (cm^3)

$$V_a = \frac{m_d - m_c}{\rho_a} \quad (03)$$

Onde:

Va= volume de água adicionado ao frasco (cm³)

md= massa do conjunto frasco + amostra + água (g)

mc= massa do conjunto frasco + amostra (g)

pa= densidade da água na temperatura do banho (g/cm³)

$$p_{sss} = \frac{mb}{V - V_a} \quad (04)$$

Onde:

p_{sss}= densidade do agregado na condição saturada superfície seca (g/cm³)

mb= massa da amostra na condição saturada superfície seca (g)

V= volume do frasco (cm³)

Va= volume de água adicionado ao frasco (cm³)

Os resultados obtidos para a massa unitária e massa específica foram, respectivamente, 1,55g/cm³ e 2,28g/cm³.

3.2.2.2 Determinação da granulometria da areia

O ensaio da granulometria da areia ocorreu conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003), sendo necessária a utilização do conjunto de peneiras de acordo com a NM-ISO 3310-1 (ABNT, 2010). Para a realização deste ensaio utilizou-se balança, bandejas e peneiras com abertura de 2,36 mm, 1,18 mm, 600 µm, 300 µm e 150 µm.

Duas amostras de areia foram coletadas e posteriormente colocadas em bandejas em estufas. Após estarem em temperatura ambiente foram medidas as suas respectivas massas (m1 e m2). As peneiras foram limpas e encaixadas em ordem crescente conforme a Figura 8.

Figura 8 - Peneiras utilizadas no ensaio



Fonte: Da autora (2021).

Cada amostra foi colocada em um conjunto de peneiras e agitadas manualmente para depois medir a massa do material que ficou retida. A composição granulométrica da areia pode ser observada na Tabela 2, as zonas utilizáveis da areia podem ser observadas na Tabela 3 e a curva granulométrica no Gráfico 5.

Tabela 2 - Distribuição granulométrica da areia

Malha	Massa retida (g)		Massa retida (%)		Retida variações (%)	Retida média (%)	Retida acumulada (%)
	Ensaio a	Ensaio b	Ensaio a	Ensaio b			
2,36	0	0	0%	0%	0%	0%	0%
1,18	25,8	23,2	5,2%	4,6%	0,6%	4,9%	4,9%
0,6	88,2	89,0	17,7%	17,8%	0,1%	17,7%	22,7%
0,3	165,8	167,1	33,2%	33,4%	0,2%	33,3%	56,0%
0,15	193,3	192,5	38,8%	38,5%	0,2%	38,6%	94,6%
Fundo	25,7	27,9	5,2%	5,6%	0,4%	5,4%	100,0%
Total	498,8	499,7	Módulo de finura=		1,78	DM=	1,18

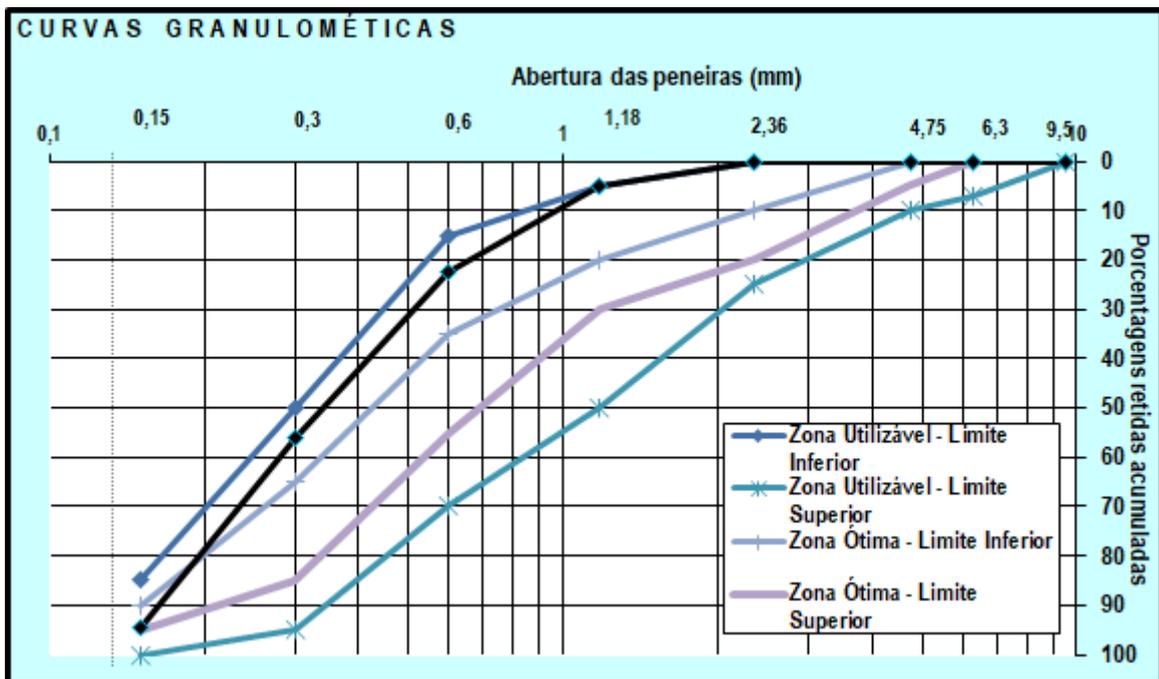
Fonte: Da autora (2021).

Tabela 3 - Zona utilizável da areia

Abertura da malha das peneiras (mm)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites Inferiores		Limites Superiores	
	Zona Utilizável	Zona Ótima	Zona Utilizável	Zona Ótima
2,36	0	10	20	25
1,18	5	20	30	50
0,6	15	35	55	70
0,3	50	65	85	95
0,15	85	90	95	100

Fonte: ABNT NBR 7211 (2009, p. 5)

Gráfico 5 - Curva Granulométrica da areia



Fonte: Da autora (2021).

3.2.3 Brita

Neste trabalho utilizou-se uma brita de origem basáltica do tipo 1, fornecida pelo LATEC, que possui granulometria entre 9,5 a 19 mm conforme a NBR 7211 (ABNT, 2019). Foram realizados os ensaios de massa específica conforme a NBR NM 53 (ABNT, 2009), massa unitária de acordo com a NBR 16972 (ABNT, 2021) e determinação da granulometria conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003). Após este último ensaio foi realizada a curva granulométrica de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2019).

3.2.3.1 Determinação da massa unitária e da massa específica da brita

O ensaio da massa unitária da brita foi realizado conforme a NBR 16972 (ABNT, 2021). Para a realização desse ensaio foi necessário o uso de um recipiente cilíndrico, haste para adensamento, uma balança e uma amostra de brita de 5.000g conforme a Figura 9.

Figura 9 - Amostra de brita coletada



Fonte: Da autora (2021).

A amostra de brita foi seca em estufa a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ até que se obtivesse uma massa estável. Em seguida, foi pesado o recipiente vazio conforme a Figura 10 e após despejado o agregado até uma altura máxima de 50 mm da borda do cilindro conforme a Figura 11.

Figura 10- Pesagem do recipiente cilíndrico vazio



Fonte: Da autora (2021).

Figura 11- Brita colocada no recipiente cilíndrico



Fonte: Da autora (2021).

Após o recipiente estar cheio, foi realizado o nivelamento da camada superficial da brita e realizada a medição da massa do recipiente mais a massa do agregado. Em seguida, utilizou-se a Equação 5 para obter a massa unitária da brita.

$$\rho_{ap} = \frac{(m_{ar} - m_r)}{V} \quad (05)$$

Sendo que:

ρ_{ap} = massa unitária do agregado (Kg/m³)

m_{ar} = massa do recipiente + agregado (Kg)

m_r = massa do recipiente vazio (Kg)

V = volume do recipiente (m³)

O ensaio da massa específica da brita foi realizado segundo a NBR NM 53 (ABNT, 2009). Para a realização desse ensaio foi separado uma amostra de 3 kg de brita (FIGURA 12) e foi colocado em um recipiente com água por 24 horas (FIGURA 13). Após esse período, a amostra foi retirada da água e enxugada com um pano (FIGURA 14).

Figura 12 - Amostra da brita



Fonte: Da autora (2021).

Figura 13- Amostra da brita em repouso na água



Fonte: Da autora (2021).

Figura 14- Secagem da amostra da brita



Fonte: Da autora (2021).

Após a amostra da brita ser enxugada, foi pesado a amostra e registrado o (m_s) (FIGURA 15). Em seguida, foi colocada no cesto da balança submersa a água para registrar o (m_a). Posteriormente, a amostra foi secada na estufa por 24 horas, a fim de se obter uma massa constante e depois foi retirada e esfriada para fazer a pesagem (m).

Figura 15- Massa do agregado saturado superfície seca



Fonte: Da autora (2021).

Após realizar todas as etapas do ensaio, a massa específica do agregado graúdo foi obtida através da Equação 6:

$$d = \frac{m}{m - m_a} \quad (06)$$

Sendo que:

d = Massa específica do agregado (g/cm^3)

m = Massa da amostra seca (g)

m_a = Massa do conjunto frasco + amostra (g)

Os valores encontrados para a massa unitária do agregado graúdo e para a massa específica foi de 1,43 g/cm³ e 2,89 g/cm³, respectivamente.

3.2.3.2 Determinação da granulometria da brita

O ensaio da granulometria da brita foi realizado conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Para a realização desse ensaio foi necessário duas amostras de 1000g de brita seca, peneiras com abertura de malha de 19 mm, 12,5 mm, 9,5 mm, 6,3 mm e 4,75 mm, balança, escova e bandejas.

As amostras de brita foram colocadas em bandejas e secadas em estufas. Após estarem em temperatura ambiente foram medidas as suas respectivas massas (m1 e m2). As peneiras foram limpas e encaixadas em ordem crescente.

Cada amostra foi colocada em um conjunto de peneiras e agitadas manualmente para depois medir a massa do material que ficou retida. A composição granulométrica da brita pode ser observada na Tabela 4, as zonas utilizáveis da areia podem ser observadas na Tabela 5 e a curva granulométrica no Gráfico 6.

Tabela 4- Distribuição granulométrica da brita

Malha	Massa retida (g)		Massa retida (%)		Retida variações (%)	Retida média (%)	Retida acumulada (%)
	Ensaio a	Ensaio b	Ensaio a	Ensaio b			
25	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
19	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
12,5	218,6	197,6	22,12%	19,84%	2,28%	20,98%	21,0%
9,5	504,5	512,7	51,06%	51,47%	0,41%	51,26%	72,2%
6,3	265,0	285,8	26,82%	28,69%	1,87%	27,76%	100,0%
4,75	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%
Fundo	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%
Total	988,1	996,1	Módulo de finura=		6,72	DM=	19

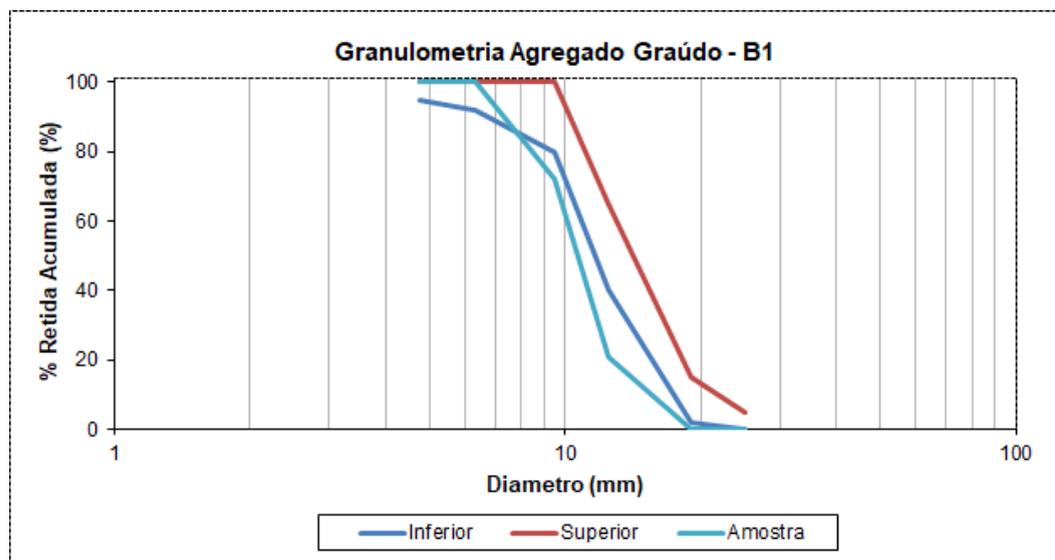
Fonte: Da autora (2021).

Tabela 5 - Zona utilizável da brita

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada				
	Zona granulométrica (mm)				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
	Brita 0	Brita 1	Brita 2	Brita 3	Brita 4
75 mm	-	-	-	-	0 - 5
63 mm	-	-	-	-	5 - 30
50 mm	-	-	-	0 - 5	75 - 100
37,5 mm	-	-	-	5 - 30	90 - 100
31,5 mm	-	-	0 - 5	75 - 100	95 - 100
25 mm	-	0 - 5	5 - 25	87 - 100	-
19 mm	-	2 - 15	65 - 95	95 - 100	-
12,5 mm	0 - 5	40 - 65	92 - 100	-	-
9,5 mm	2 - 15	80 - 100	-	-	-
6,3 mm	40 - 65	92 - 100	-	-	-
4,75 mm	80 - 100	95 - 100	-	-	-

Adaptado da ABNT NBR 7211 (2009, p. 8).

Gráfico 6- Curva granulométrica do agregado graúdo conforme zona utilizável da brita 1



Fonte: Da autora (2021).

Como pode-se observar este material não corresponde com a NBR 7211 (ABNT,2009), tendo um possível erro de granulometria do agregado graúdo disponibilizado pelo LATEC.

3.2.4 Vidro moído

O vidro utilizado para este trabalho é proveniente da coleta de garrafas de cerveja, do tipo *long neck* (FIGURA 16). A escolha deste material é devido a grande quantidade e à falta de destinação correta na região.

Após a realização da limpeza, as garrafas foram quebradas para facilitar a moagem, tendo como parâmetro a granulometria da areia que será utilizada. Para obter a moagem do vidro foi utilizado um moinho de bolas. A substituição do vidro moído no concreto foi na proporção de 5%, 7% e 10% e posteriormente foi realizado os ensaios de granulometria conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003) e massa específica conforme a NBR 16605 (ABNT, 2017).

Figura 16 - Garrafas do tipo *long neck*



Fonte: Da autora (2021).

3.2.4.1 Moagem do vidro

A moagem do vidro ocorreu através de um moinho mecânico de bolas, conforme a Figura 17. Para que se obtivesse a granulometria mais semelhante da areia, foi colocado uma amostra de 1kg de vidro quebrado no moinho por variados tempos até que se obtivesse a granulometria apresentada. O tempo utilizado foi de 10 minutos, o que resultou no vidro da

Figura 18. Para o vidro foram realizados os ensaios de massa unitária, massa específica e granulometria.

Figura 17- Moinho mecânico de bolas



Fonte: Da autora (2021).

Figura 18- Vidro moído



Fonte: Da autora (2021).

3.2.4.1.1 Determinação da massa unitária e massa específica do vidro

A massa unitária do vidro foi determinada através da NBR 16972 (ABNT, 2021) pelo método C, conforme foi realizado para a areia.

O ensaio da massa específica do vidro foi determinado conforme a NBR 16916 (ABNT, 2021), conforme foi realizado para a areia. Os resultados obtidos para a massa unitária e massa específica foram respectivamente $1,18\text{g/cm}^3$ e $2,44\text{g/cm}^3$.

3.2.4.1.1 Determinação da granulometria do vidro

O ensaio da granulometria do vidro ocorreu conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003), sendo necessária a utilização do conjunto de peneiras de acordo com a NM-ISO 3310-1 (ABNT, 2010). Para a realização deste ensaio utilizou-se bandejas, balança e peneiras com abertura de 2,36 mm, 1,18 mm, 600 μm , 300 μm e 150 μm .

Duas amostras de vidro foram coletadas e colocadas em bandejas e secadas em estufas. Após estarem em temperatura ambiente foram medidas as suas respectivas massas (m_1 e m_2). As peneiras foram limpas e encaixadas em ordem crescente.

Cada amostra foi colocada em um conjunto de peneiras e agitadas manualmente para depois medir a massa do material que ficou retida. A composição granulométrica do vidro pode ser observada na Tabela 6, as zonas utilizáveis da areia podem ser observadas na Tabela 7 e a curva granulométrica no Gráfico 7.

Tabela 6 - Distribuição granulométrica do vidro

Malha	Massa retida (g)		Massa retida (%)		Retida variações (%)	Retida média (%)	Retida acumulada (%)
	Ensaio a	Ensaio b	Ensaio a	Ensaio b			
2,36	0	0	0%	0%	0%	0%	0%
1,18	45,1	43,2	4,5%	4,3%	0,2%	4,4%	4,4%
0,6	155,9	158,5	15,6%	15,9%	0,3%	15,7%	20,1%
0,3	276,0	273,9	27,6%	27,4%	0,2%	27,5%	47,6%
0,15	398,3	397,6	39,8%	39,8%	0,1%	39,8%	87,4%
Fundo	124,7	126,8	12,5%	12,7%	0,2%	12,6%	100,0%
Total	1.000	1.000	Módulo de finura=		1,60	DM=	1,18

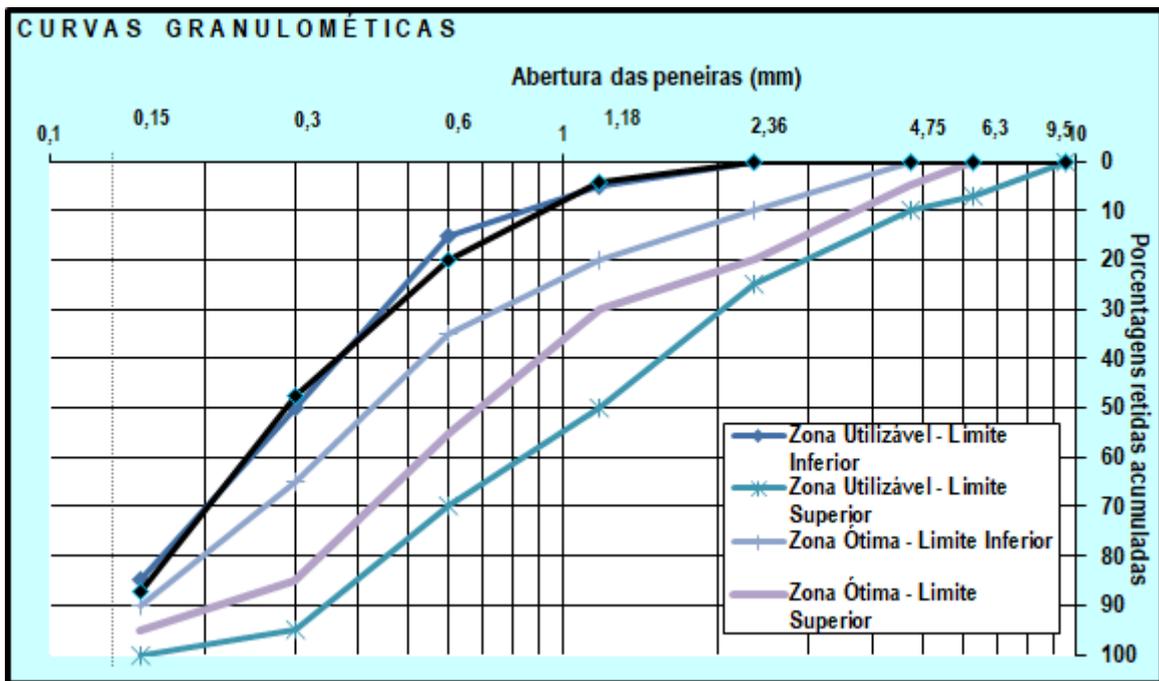
Fonte: Da autora (2021).

Tabela 7 - Zona utilizável do vidro

Abertura da malha das peneiras (mm)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites Inferiores		Limites Superiores	
	Zona Utilizável	Zona Ótima	Zona Utilizável	Zona Ótima
2,36	0	10	20	25
1,18	5	20	30	50
0,6	15	35	55	70
0,3	50	65	85	95
0,15	85	90	95	100

Fonte: ABNT NBR 7211 (2009, p. 5)

Gráfico 7- Curva Granulométrica do vidro



Fonte: Da autora (2021).

3.2.5 Água

A água que foi utilizada para o amassamento dos concretos foi a água disponibilizada pelo LATEC, sendo água potável e proveniente do abastecimento público da CORSAN, atendendo aos requisitos da NBR 15900-1 (ABNT, 2009).

3.3 Dosagem

A dosagem do concreto foi realizada pelo método ABCP (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002). Todos os materiais foram caracterizados através dos ensaios conforme as normas vigentes. A consistência desejada do concreto foi previamente estipulada em $10 \text{ cm} \pm 2 \text{ cm}$ e a resistência característica do concreto (f_{ck}) foi previamente estipulada em 25 MPa. Para que o f_{ck} fosse alcançado, calcula-se a determinação da resistência de dosagem através da Equação 07.

$$f_{cj \text{ 28 dias}} = f_{ck} + 1,65 \cdot sd \quad (07)$$

O valor do desvio padrão de dosagem S_d foi determinado pelo critério da condição de preparo do concreto, conforme Tabela 8, definido como 4.

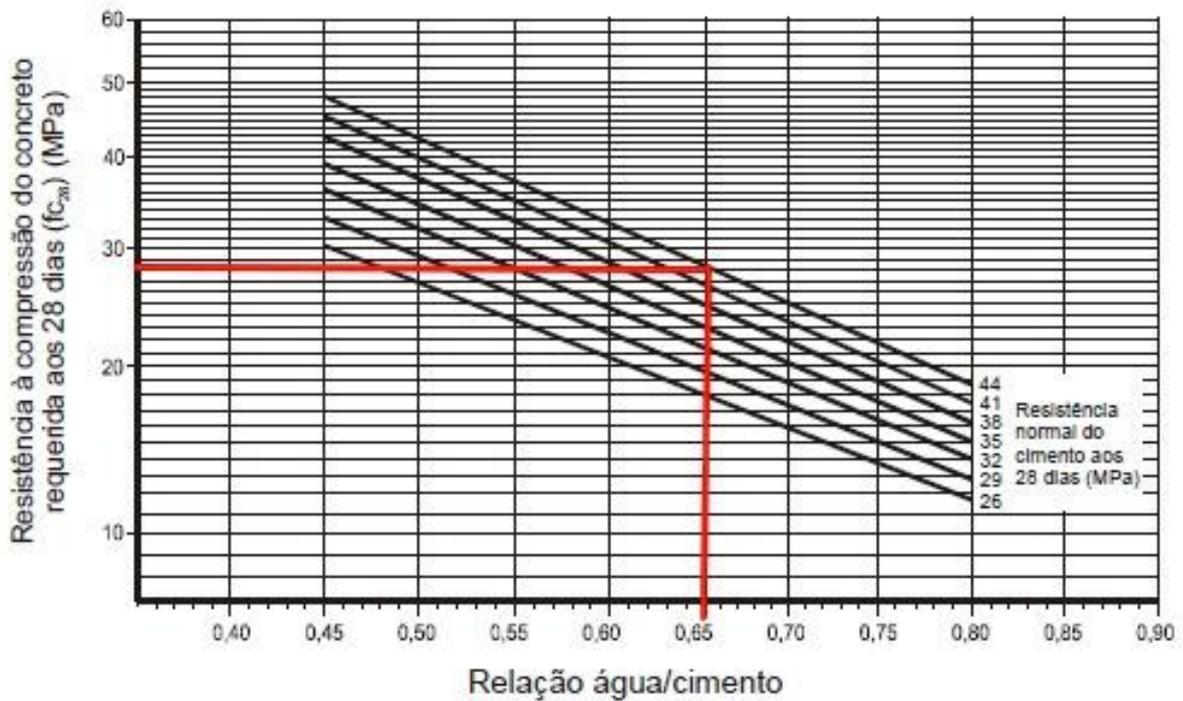
Tabela 8 - Valor do desvio padrão de dosagem (S_d)

Condição de preparo do concreto	Desvio-padrão MPa
A	4
B	5,5
C	7

Fonte: NBR 12655 (ABNT, 2015).

Logo após, fixou-se o fator água/cimento através do resultado obtido na Equação 07 e o tipo de cimento e relacionando esses valores na curva de Abrams, obtendo-se assim a relação água/cimento, conforme observa-se na Figura 19.

Figura 19- Relação água cimento na curva de Abrams



Fonte: Curti (2020), adaptado pela autora.

Para a determinação do consumo de água (C_a) foi necessário a tabela da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) que fornece os valores em função da dimensão máxima e consistência do concreto, referindo-se a concretos com agregado graúdo britado e areia natural. A seguir, a Tabela 9 estima o consumo de água por metro cúbico de concreto em função do diâmetro máximo característico do agregado e do abatimento da mistura, através do método ABCP.

Tabela 9 - Consumo de água por m^3 de concreto

Abatimento (mm)	Diâmetro máximo agregado graúdo (mm)				
	9,50	19,00	25,00	32,00	38,00
40 a 60	220 l/m^3	195 l/m^3	190 l/m^3	185 l/m^3	180 l/m^3
60 a 80	225 l/m^3	200 l/m^3	195 l/m^3	190 l/m^3	185 l/m^3
80 a 100	230 l/m^3	205 l/m^3	200 l/m^3	195 l/m^3	190 l/m^3

Fonte: Rodrigues (1998).

Dessa forma, o consumo de cimento (C_c) foi dado através da divisão do consumo de água pela relação água/cimento, conforme Equação 08.

$$C_c = \frac{C_a}{a/c} \quad (08)$$

Para determinar o consumo de agregado graúdo (C_b) foi necessário a tabela da ABCP para determinar a porcentagem de agregado graúdo, relacionando a dimensão máxima característica do agregado graúdo com o módulo de finura da areia. Assim, calculou-se o consumo através da porcentagem de agregado graúdo seco por m^3 de concreto (V_b) e massa unitária compactada do agregado miúdo (M_u), conforme Equação 09.

$$C_b = V_b \cdot M_u \quad (09)$$

Para a determinação do consumo de agregado miúdo determinou-se a porcentagem de agregado miúdo na mistura, através da Equação 10.

$$V_m = 1 - \left(\frac{C_c}{\gamma_c} + \frac{C_b}{\gamma_b} + \frac{C_a}{\gamma_a} \right) \quad (10)$$

Com isso, calculou-se o consumo de areia (C_m), através da multiplicação do consumo de agregado miúdo pela massa específica da areia, conforme a Equação 11, obtendo um valor de 688 kg/m^3 . A partir destes dados, pode-se apresentar os traços.

$$C_m = V_m \cdot p_m \quad (11)$$

Com todas as demandas de materiais determinadas, utilizou-se o traço de referência 1 : 2,18 : 3,49 e relação de água/cimento 0,65. Foi realizado o cálculo do quantitativo de materiais para que fossem moldados 24 corpos de prova em formatos cilíndricos e 3 prismáticos por traço, conforme a NBR 5738 (ABNT, 2016). Cada traço está apresentado na Tabela 10. Os moldes cilíndricos possuem altura de 20 cm e diâmetro de 10 cm e os moldes prismáticos possuem dimensões de 15 cm x 15 cm x 50 cm, sendo o vão de ensaio de 40 cm, seção transversal quadrada e superfície lisa. Com o traço de referência definido, as porcentagens de vidro foram adicionadas no volume de concreto, sendo as quantidades em quilogramas, definidas para cada traço por meio do cálculo com base nos ensaios de massa específica do vidro moído.

Tabela 10 - Traços

Traço	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita 1 (kg)	a/c	Vidro (kg)
Referência	24,82	54,09	86,60	16,13	0
Adição 5% vidro	24,84	54,15	86,69	16,14	2,70
Adição 7% vidro	24,85	54,17	86,72	16,15	3,79
Adição 10% vidro	24,86	54,20	86,78	16,16	5,42

Fonte: Da autora (2021).

Foi utilizada uma betoneira onde foi sendo adicionada a brita e metade da água, deixando misturar. O cimento foi adicionado para formar uma pasta homogênea, de forma a envolver o agregado, depois foi adicionada a areia e o restante da água. Por último o vidro foi adicionado aos poucos.

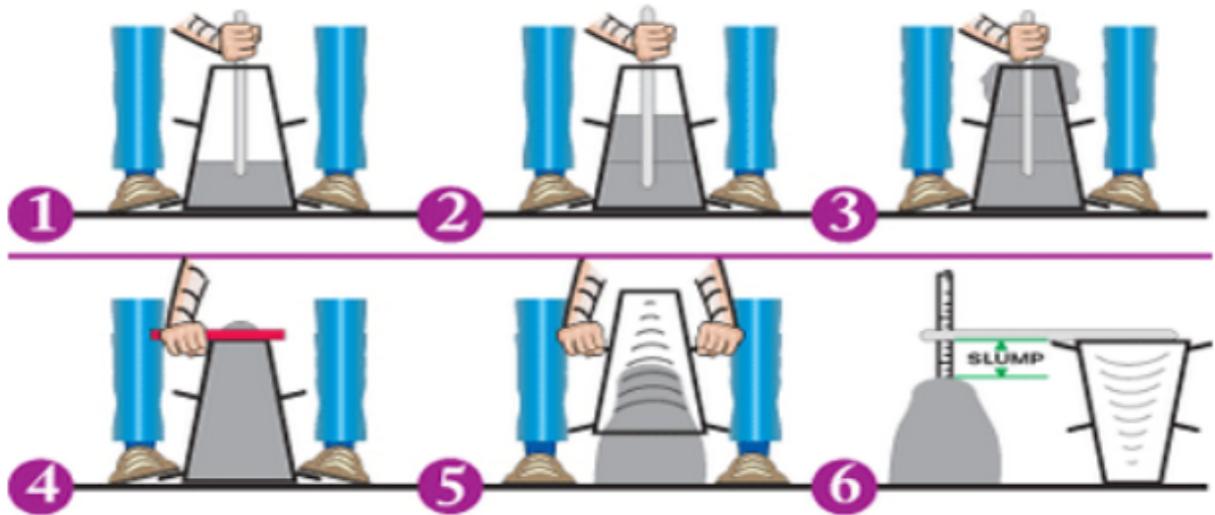
3.4 Ensaios no estado fresco

Para o concreto no estado fresco foi realizado o ensaio *Slump Test* e a moldagem dos corpos de prova.

3.4.1 *Slump Test*

Este ensaio, segundo a NBR NM 67 (ABNT, 1998), determina o abatimento do concreto que deve ser de 10 cm, com variação aceitável em torno de 2 cm. A realização deste ensaio ocorreu através da colocação do cilindro tronco cônico sobre a chapa metálica com dimensões de abertura de 10 e 20 cm de diâmetro e altura de 30 cm. Foram colocadas 3 camadas de concreto dentro do cilindro e aplicado 25 golpes por camada utilizando uma haste de aço, conforme Figura 20. Por fim, a última camada foi desempenada.

Figura 20 - Execução das camadas do *Slump Test*



Fonte: Clube do Concreto (2016).

O molde cônico foi retirado verticalmente e logo após foi colocado ao lado do concreto, conforme a Figura 21, a medida do abatimento consiste na diferença da altura do tronco cônico e a altura do concreto moldado pelo cone.

Figura 21- Molde cônico e concreto moldado



Fonte: Da autora (2021).

3.4.2 Moldagem dos corpos de prova

A moldagem dos Corpos de Prova (CP) foi realizada com uma amostra de concreto, de acordo com a NBR 33 (ABNT, 1998) e com seu abatimento pré-determinado. O adensamento foi realizado conforme a NBR 5738 (ABNT, 2016). O preenchimento dos

corpos de prova ocorreu de forma manual, sendo para os moldes cilíndricos com altura de 20 cm e diâmetro de 10 cm, em duas camadas de concreto e utilizando uma haste metálica para aplicar 12 golpes por camada. Para o molde prismático com dimensões de 15 cm x 15 cm x 50 cm, também foi preenchido de forma manual em duas camadas que foram submetidas a 75 golpes e após foi realizado o rasamento da superfície e a identificação, conforme na Figura 22.

Figura 22- Moldagem dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos



Fonte: Da autora (2021).

Após a realização da moldagem, os CP foram colocados em um local com uma superfície plana e rígida para a cura inicial. Segundo a NBR 5738 (ABNT, 2016), a cura inicial nos corpos de prova cilíndrico ocorre nas primeiras 24 horas e para os prismáticos ocorre durante as primeiras 48 horas. Depois desse período, até os ensaios aos 28 dias, os corpos de prova foram colocados em uma câmara úmida.

Foram utilizados 3 corpos de prova de cada traço rompido aos 28 dias para o ensaio de compressão simples e 3 corpos de prova de cada traço para o ensaio de tração a compressão diametral. Também foram rompidos, aos 28 dias, 3 corpos de prova por compressão simples e 3 corpos de prova por tração a compressão diametral submetidos ao forno mufla em temperatura de 200°C; 3 corpos de prova por compressão simples e 3 corpos de prova por tração a compressão diametral submetidos ao forno mufla em temperatura de 400°C e 3

corpos de provas por compressão simples e 3 corpos de prova por tração a compressão diametral submetidos ao forno mufla em temperatura de 600°C.

3.5 Ensaio no estado endurecido

Para o concreto no estado endurecido foram realizados os ensaios de resistência à compressão, tração por compressão diametral e simulação de elevadas temperaturas.

3.5.1 Resistência à compressão

Este ensaio foi realizado conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018), ocorrendo aos 28 dias a ruptura dos corpos de prova, sendo 3 corpos de prova de cada traço. O ensaio foi realizado no LATEC, através da utilização de uma prensa hidráulica, conforme a Figura 23, com capacidade de 2000 kN, que realizou o carregamento nos corpos de prova, de forma contínua com velocidade de 0,45 MPa, admitindo uma variação de 0,15 MPa. Antes da realização dos ensaios os corpos de prova foram retificados.

Figura 23- Ensaio de compressão



Fonte: Da autora (2021).

3.5.2 Tração por compressão diametral

O ensaio de tração por compressão diametral foi realizado conforme a NBR 7222 (ABNT, 2011). O ensaio foi realizado com corpos cilíndricos com ruptura aos 28 dias e submetidos ao ensaio de 3 corpos de prova para cada traço. O ensaio foi realizado no LATEC, através de uma prensa hidráulica, conforme Figura 24, onde foi colocado o corpo de prova de uma maneira que o seu plano axial coincidia com o eixo de aplicação do carregamento. A carga foi aplicada de forma contínua com velocidade de 0,05 MPa/s, admitindo uma variação de 0,02 MPa/s, até a ruptura do corpo de prova.

Figura 24- Ensaio de tração por compressão diametral



Fonte: Da autora (2021).

3.5.3 Resistência à tração na flexão

O ensaio de tração na flexão foi realizado conforme a NBR 12142 (ABNT, 2010), sendo utilizado corpos de prova prismáticos, definidos pela NBR 5738 (ABNT, 2016). Foram rompidos 3 corpos de provas de cada traço aos 28 dias. Neste ensaio foi aplicado uma carga de forma crescente na região central do corpo de prova em relação aos apoios, de forma contínua e com um aumento de tensão compreendido entre 0,9 e 1,2 MPa/min. Foi realizado na prensa hidráulica disponível no LATEC, conforme a Figura 25.

Figura 25 - Ensaio de tração na flexão



Fonte: Da autora (2021).

3.5.4 Simulação de Elevadas Temperaturas

O ensaio foi realizado no Laboratório de Processos de Fabricação, onde foi utilizado o forno mufla, conforme a Figura 26, para realizar os ensaios nas temperaturas de 200°, 400° e 600° durante o período de 1 hora. Foram colocados 6 corpos de prova de cada traço no forno aos 28 dias. Ao atingir a temperatura desejada, os corpos de prova foram retirados do forno e expostos ao ar livre para o resfriamento e após foi realizado o ensaio de compressão, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018) e tração por compressão diametral, conforme a NBR 7222 (ABNT, 2011). O objetivo deste ensaio foi expor os corpos de prova a elevadas temperaturas a fim de simular a quantidade de calor que o concreto recebe em uma situação de incêndio. Adotou-se a curva padrão de incêndio como parâmetro na taxa de aquecimento em função do tempo, fornecida pelo corpo de bombeiros.

Figura 26- Corpos de prova no forno mufla



Fonte: Da autora (2021).

3.6 Análise estatística

Foi realizada a análise estatística no *software* InfoStat. Primeiramente, os dados foram analisados pelo teste de normalidade de Shapiro-Wilks, com o objetivo de verificar se os dados seguiram a distribuição normal. Caso os dados sigam a distribuição normal, foi realizada a análise de variância, conhecida como ANOVA, com as médias comparadas pelo teste de Scott Knott, usando $p < 0,05$ ou $p < 0,01$ e Tukey, usando $p < 0,05$ ou $p < 0,01$. Para os dados que não seguiram a distribuição normal, foi realizada a análise de variância para dados não paramétricos usando o método de Kruskal Wallis ($p < 0,05$).

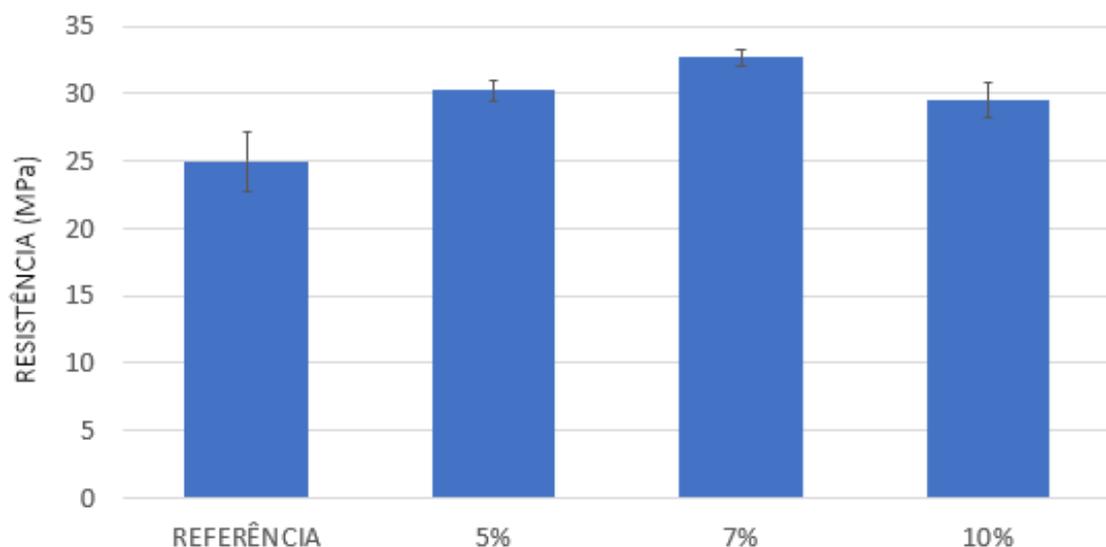
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados e discussões referentes aos ensaios realizados, com o objetivo de atingir os objetivos principal e específicos propostos para este trabalho, sendo realizada a análise estatística para os ensaios no estado endurecido.

4.1 Análise da Resistência à Compressão

O ensaio de resistência à compressão ocorreu conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018), com a ruptura dos corpos de prova aos 28 dias. Os resultados estão apresentados no Gráfico 8, correspondendo ao comparativo das médias dos resultados de resistência à compressão sem substituição parcial de areia por vidro moído e com substituição parcial de areia por vidro moído com 5%, 7% e 10%. Os resultados unitários estão apresentados no apêndice A.

Gráfico 8- Resistência à compressão



Fonte: Da autora (2021).

Conforme o Gráfico 8 e a Tabela 11, é possível observar que os traços de 5%, 7% e 10% de vidro moído apresentaram resistência semelhante entre eles, e maiores valores quando comparado ao traço de referência, comportamento que não foi observado por Vian (2018) que mostrou que a adição de vidro moído não alterou a resistência à compressão. Este aumento de resistência talvez possa ser explicado devido à matriz cimentícia ter se tornado mais fechada devido a granulometria do vidro ser bem menor do que o agregado miúdo conforme o item 3 desta monografia.

Righi et al. (2012), em seu estudo, também obtiveram comportamento semelhante ao deste estudo que, conforme foi aumentado o teor de substituição, foi sendo obtido ganhos de resistência à compressão. Os autores ainda citaram que este aumento pode ser atrelado ao efeito filer que o vidro moído proporciona na matriz cimentícia.

A análise de variância (ANOVA), foi realizada para os 3 traços com substituição parcial da areia por vidro moído de forma isolada, com o intuito de analisar a substituição nas diferentes porcentagens na resistência do concreto à compressão, buscando verificar se houve influência da porcentagem de adição de vidro no aumento da resistência. Pode-se observar a análise na Tabela 11.

Tabela 11 - Comparação da resistência à compressão dos traços de vidro moído de 0%, 5%, 7% e 10% no concreto.

Porcentagem de Vidro	Resistência à compressão
0%	24,99 ± 2,19 A
5%	30,22 ± 0,76 B
7%	32,69 ± 0,61 B
10%	29,46 ± 1,31 B

Os valores apresentados na tabela são a média da resistência à compressão de três amostras ± desvio padrão. A análise de variância foi ANOVA e as médias foram comparadas por Scott Knott ($p < 0,05$) onde as letras diferentes mostram diferença estatística entre os tratamentos com e sem adição de vidro.

Fonte: Da autora (2021).

Conforme pode ser observado na Tabela 11 (mostrado pelas letras maiúsculas), os traços com a substituição do agregado miúdo por vidro moído (5%, 7% e 10%) aumentaram a resistência à compressão em comparação com o traço de 0%. Já quando comparamos os

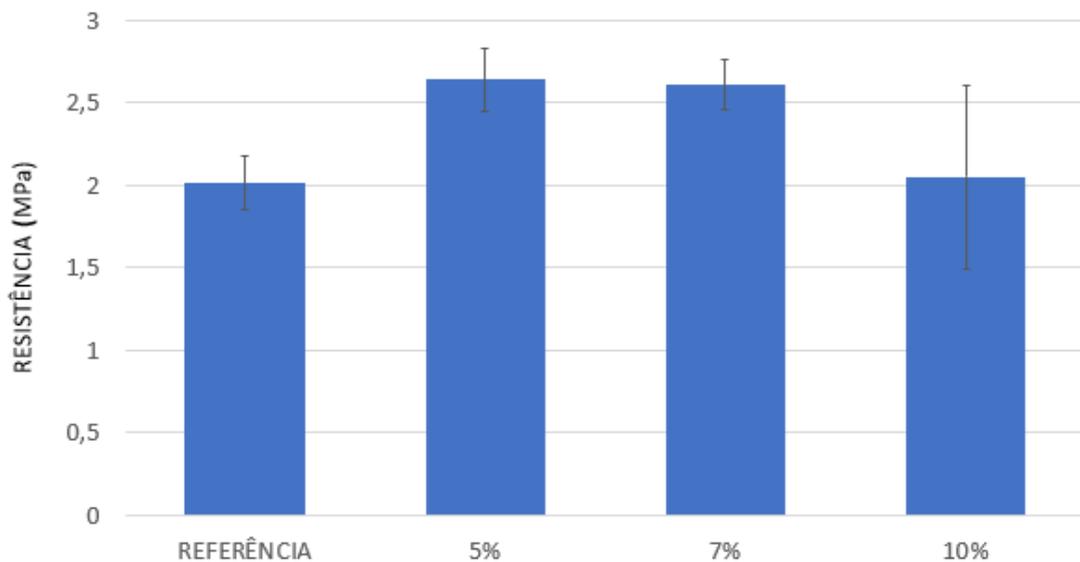
traços com substituição do agregado miúdo por vidro moído de 5%, 7% e 10% a resistência a compressão se apresenta igual ($p < 0,05$).

Os traços de 5%, 7% e 10% de vidro moído são iguais estatisticamente, sendo representados pela mesma letra.

4.2 Análise da Resistência à Tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral ocorreu conforme a NBR 7222 (ABNT, 2011), com ruptura aos 28 dias. Os ensaios estão apresentados no Gráfico 9, correspondendo ao comparativo das médias dos resultados de resistência à tração por compressão diametral sem substituição de areia pelo vidro moído e com substituição de areia pelo vidro moído com 5%, 7% e 10%. Os resultados unitários estão apresentados no apêndice A.

Gráfico 9 - Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.



Fonte: Da autora (2021).

Conforme o Gráfico 9 e Tabela 12, é possível observar uma maior variabilidade dos resultados encontrados, como pode ser observado com desvio padrão elevado. Mas se comparar com os resultados do ensaio de compressão, percebe-se uma tendência do mesmo comportamento, onde os traços com 5% e 7% aumentaram a resistência conforme traço referência. E a porcentagem de 10% obteve um valor de resistência menor quando comparado

aos demais traços com vidros mas em contrapartida valores semelhantes ao traço de referência. A análise de variância (ANOVA), foi realizada para os 3 traços com adição de vidro de forma isolada, com o intuito de analisar a adição de vidro, nas diferentes porcentagens na resistência do concreto à tração por compressão diametral, buscando verificar se houve influência da porcentagem de adição de vidro no aumento da resistência. Pode-se observar a análise na Tabela 12.

Tabela 12 - Comparação da resistência à tração por compressão diametral dos traços de vidro moído de 0%, 5%,7% e 10% no concreto.

Porcentagem de Vidro	Resistência à tração por compressão diametral
0%	2,01 ± 0,16 A
5%	2,64 ± 0,19 A
7%	2,61 ± 0,15 A
10%	2,05 ± 0,55 A

Os valores apresentados na tabela são a média da resistência à tração por compressão diametral de três amostras ± desvio padrão. A análise de variância foi ANOVA e as médias foram comparadas por Tukey ($p < 0,01$) onde as letras representam a similaridade estatística entre os tratamentos com e sem adição de vidro.

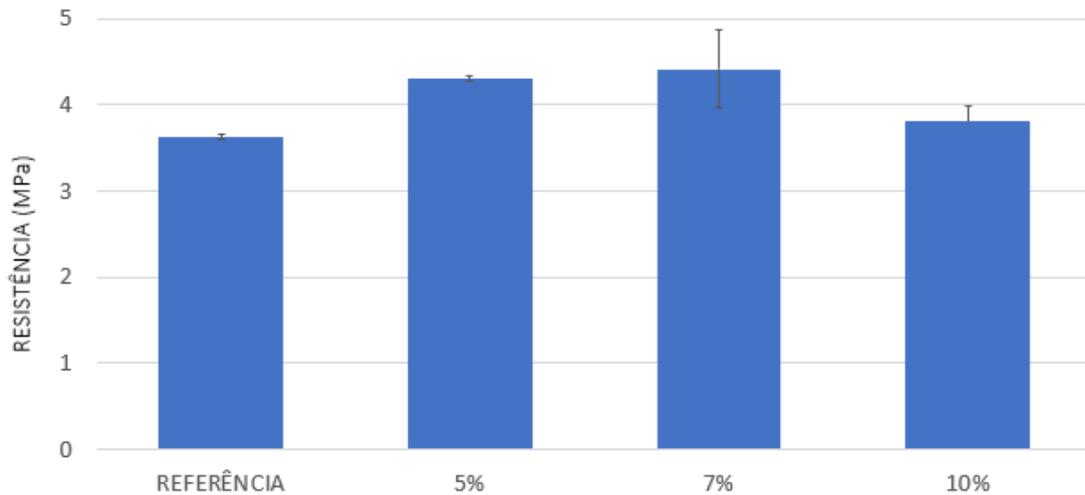
Fonte: Da autora com base nos resultados obtidos (2021).

Conforme pode-se observar na Tabela 12, nos traços de substituição de areia pelo vidro moído estatisticamente as médias das resistências à tração por compressão diametral foram iguais ao traço de referência, ou seja, a porcentagem de vidro moído substituído não teve influência significativa na resistência do concreto ($p < 0,01$).

4.3 Análise da Resistência à Tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão ocorreu conforme a NBR 12142 (ABNT, 2010), com a ruptura dos corpos de prova aos 28 dias. Lembrando que para este tipo de ensaio foram utilizados apenas corpos de prova em temperatura ambiente. O gráfico 10 apresenta um comparativo das médias dos resultados de resistência à tração na flexão sem substituição de areia pelo vidro moído e com substituição de areia pelo vidro moído com 5%, 7% e 10%. Os resultados unitários estão apresentados no apêndice A.

Gráfico 10 - Resistência à tração na flexão aos 28 dias



Fonte: Da autora (2021).

Conforme o Gráfico 10 e a Tabela 13, é possível observar que os traços com 5% e 7% de vidro moído apresentaram resistências semelhantes, e superior aos traços sem adição de vidro moído e com 10% de vidro, tratamentos que também apresentaram resistências semelhantes. A análise de variância (ANOVA), foi realizada para os 3 traços com substituição de areia pelo vidro moído de forma isolada, com o intuito de analisar a substituição de areia, nas diferentes porcentagens na resistência do concreto à tração na flexão, buscando verificar se houve influência da porcentagem de adição de vidro no aumento da resistência. Pode-se observar a análise na Tabela 13.

Tabela 13- Comparação da resistência à tração na flexão dos traços de vidro moído de 0%, 5%, 7% e 10% no concreto.

Porcentagem de Vidro	Resistência à tração por compressão diametral
0%	3,62 ± 0,03 A
5%	4,30 ± 0,03 B
7%	4,41 ± 0,45 B
10%	3,80 ± 0,17 A

Os valores apresentados na tabela são a média da resistência à compressão de três amostras ± desvio padrão. A análise de variância foi ANOVA e as médias foram comparadas por Scott Knott ($p < 0,05$) onde as letras diferentes mostram diferença estatística entre os tratamentos com e sem adição de vidro.

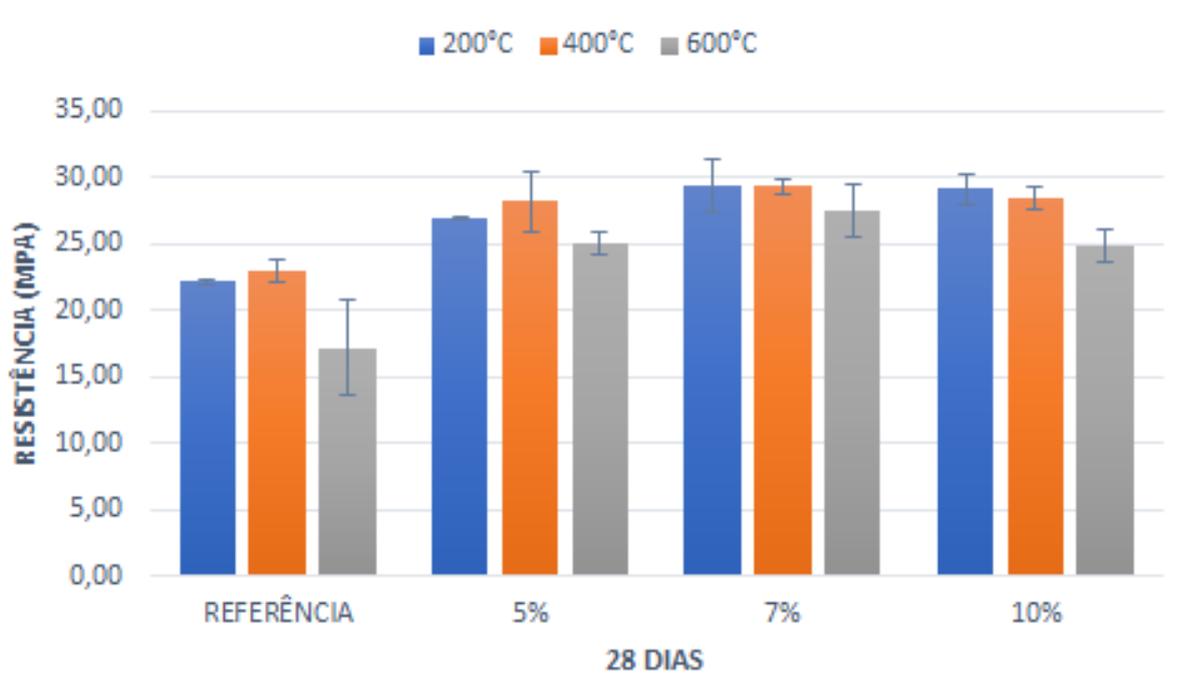
Fonte: Da autora (2021).

Conforme pode ser observado na Tabela 13, os traços com adição de vidro moído de 5% e 7% aumentaram a resistência à tração na flexão em comparação com os traços de 0% e 10% de vidro. Neste ensaio, os resultados dos traços de 0% e 10% de vidro foram similares, e o mesmo foi observado para os traços de 5% e 7% de vidro ($p < 0,05$).

4.4 Análise da Resistência à compressão em situações de incêndio

Os resultados da resistência à compressão para os corpos de prova submetidos a situações de incêndio estão apresentados no Gráfico 11. Este gráfico corresponde ao comparativo das médias dos resultados de resistência à compressão dos corpos de prova submetidos às temperaturas de 200°C, 400°C e 600°C em forno mufla. Os resultados unitários estão apresentados no apêndice B.

Gráfico 11- Resistência à compressão em situações de incêndio



Fonte: Da autora (2021).

Conforme o Gráfico 11 e a Tabela 14, é possível observar que a adição de vidro moído no concreto aumenta a resistência à compressão nas duas primeiras temperaturas ensaiadas (200° e 400°C), (análises mostradas pelas letras maiúsculas na Tabela 12). Nota-se que na temperatura de 600°C todos os traços estudados apresentaram um valor de resistência menor quando comparado com as demais temperaturas estudadas. Quando comparamos cada traço

nas diferentes temperaturas (análise mostrada pelas letras minúsculas na Tabela 12), nota-se que a queima a 200 °C e 400 °C não alterou a resistência à compressão do tratamento sem vidro em comparação ao concreto não queimado. Já a queima a 600 °C, reduziu este parâmetro, este comportamento também foi observado no tratamento com adição de 10% de vidro moído. A adição de 5% e 7% de vidro moído mostrou resistência à compressão reduzida após o processo de queima (200°C, 400 °C e 600 °C) em comparação ao concreto de referência.

A análise de variância (ANOVA) foi realizada para os 3 traços de adição de vidro e o tratamento de referência, com o intuito de analisar se a adição de vidro, nas diferentes porcentagens, altera a resistência do concreto à compressão em situações de incêndio e a comparação do mesmo tratamento nas diferentes temperaturas da mufla, buscando verificar se houve influência do forno mufla nos resultados (Tabela 14).

Tabela 14 - Comparação da resistência à compressão dos traços de vidro moído de 0%, 5%,7% e 10% no concreto em situações de incêndio

Porcentagem de vidro moído	Sem mufla	Com mufla 200 °C	Com mufla 400 °C	Com mufla 600 °C
0%	24,99 ± 2,19 Ab	22,13 ± 0,13 Ab	22,91 ± 0,84 Ab	17,12 ± 3,57 Aa
5%	30,22 ± 0,76 Bb	26,96 ± 0,14 Ba	28,17 ± 2,26 Ba	25,04 ± 0,85 Ba
7%	32,69 ± 0,61 Bb	29,34 ± 1,99 Ba	29,35 ± 0,57 Ba	27,49 ± 1,91 Ba
10%	29,46 ± 1,31 Bb	29,17 ± 1,14 Bb	28,44 ± 0,84 Bb	24,81 ± 1,21 Ba

Os valores apresentados na tabela representam a média da resistência à compressão de quatro amostras ± desvio padrão. As médias seguidas por letra maiúscula representam a comparação dos tratamentos em cada condição avaliada. As letras minúsculas representam a comparação do mesmo tratamento nas diferentes temperaturas da mufla. Esses resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste de Scott Knott ($p < 0,05$).

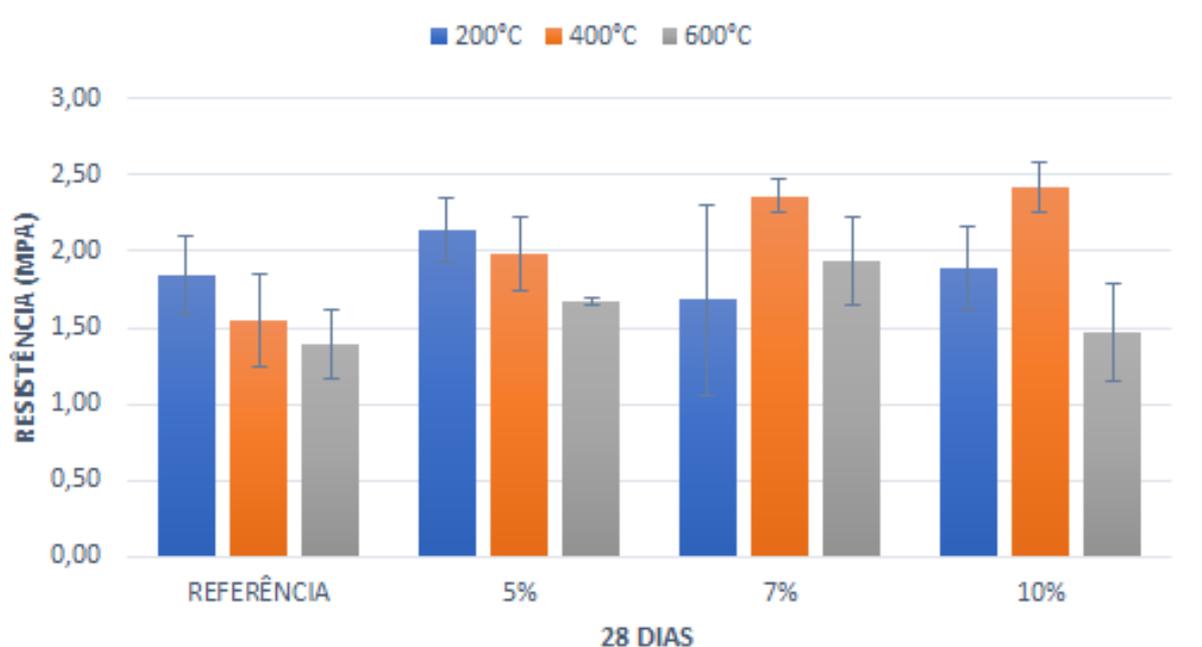
Fonte: Da autora (2021).

4.5 Análise da Resistência à tração por compressão diametral em situações de incêndio

Os resultados da resistência à tração por compressão diametral para os corpos de prova submetidos a situações de incêndio estão apresentados no Gráfico 12. Este gráfico corresponde ao comparativo das médias dos resultados de resistência à tração por compressão

diametral dos corpos de prova submetidos às temperaturas de 200°C, 400°C e 600°C em forno mufla. Os resultados unitários estão apresentados no apêndice B.

Gráfico 12- Resistência à tração por compressão diametral em situações de incêndio



Fonte: Da autora (2021).

Conforme o Gráfico 12 e Tabela 15, é possível observar grande variabilidade nos dados obtidos (mostrados pela barra de desvio padrão no Gráfico 12 e pelo valor absoluto do desvio padrão na Tabela 13). As resistências dos quatro tratamentos avaliados foram similares quando verificamos as condições sem queima, queima a 200 °C e 600 °C (resultados mostrados por letras maiúsculas similares na Tabela 13). Quando queimada a 400 °C, a adição de 7% e 10% de vidro aumentou a resistência à tração por compressão diametral. Percebe-se também, que os traços com 0% e 10% de vidro apresentaram resistência à tração por compressão diametral similar em todas as condições testadas ($p < 0,01$). No traço com 5% percebe-se que a queima (nas três temperaturas testadas) diminuiu a resistência em comparação com tratamento sem a mufla, e com 7% percebe-se que a resistência sem forno mufla e a queima a 200 °C foi similar e superior a quando este material foi queimado à 400 °C e 600 °C.

A análise de variância (ANOVA), foi realizada para os 3 traços com adição e sem adição de vidro moído, com o intuito de analisar se a adição deste componente interfere na

resistência do concreto à tração por compressão diametral em situações de incêndio, e a comparação do mesmo tratamento nas diferentes temperaturas da mufla, buscando verificar se houve influência do forno mufla nos resultados. Pode-se observar a análise na Tabela 15.

Tabela 15 - Comparação da resistência à tração por compressão diametral dos traços de vidro moído de 0%, 5%, 7% e 10% no concreto em situações de incêndio

Porcentagem de vidro moído	Sem mufla	Com mufla 200 °C	Com mufla 400 °C	Com mufla 600 °C
0%	2,01 ± 0,16 Aa	1,84 ± 0,25 Aa	1,55 ± 0,30 Aa	1,39 ± 0,22 Aa
5%	2,64 ± 0,19 Ab	2,14 ± 0,21 Aa	1,98 ± 0,24 Aa	1,68 ± 0,02 Aa
7%	2,61 ± 0,15 Ab	1,68 ± 0,62 Ab	2,36 ± 0,10Ba	1,94 ± 0,29 Aa
10%	2,05 ± 0,55 Aa	1,89 ± 0,26 Aa	2,42 ± 0,16 Ba	1,47 ± 0,32 Aa

Os valores apresentados na tabela representam a média da resistência à compressão de quatro amostras ± desvio padrão. As médias seguidas por letra maiúscula representam a comparação dos tratamentos em cada condição avaliada. As letras minúsculas representam a comparação do mesmo tratamento nas diferentes temperaturas da mufla. Esses resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste de Scott Knott ($p < 0,05$).

Fonte: Da autora (2021).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Analisando as porcentagens de vidro adicionadas, os tratamentos com 5%, 7% e 10% de vidro apresentaram resistência à compressão superior ao traço de referência. Na comparação entre os traços 5%, 7% e 10%, estes tratamentos apresentaram resistência à compressão estatisticamente iguais. Na resistência à tração por compressão diametral todos os tratamentos apresentaram resultados similares ($p < 0,01$). O ensaio de tração por flexão mostrou que os traços com adição de 5% e 7% de vidro moído apresentaram resultados superiores aos traços de 0% e 10% de vidro ($p < 0,05$).

Em relação ao efeito da exposição dos concretos a elevadas temperaturas, pode-se observar que a adição de vidro moído no concreto aumenta a resistência à compressão nas quatro condições analisadas, sem queima e nas temperaturas de 200 °C, 400 °C e 600 °C. Na resistência à tração por compressão diametral é possível observar grande variabilidade nos dados obtidos. As resistências dos quatro tratamentos avaliados foram similares quando verificamos as condições sem queima, queima a 200 °C e 600 °C. Na queima a 400 °C a adição de 7% e 10% de vidro moído aumentaram a resistência à tração por compressão diametral. Os traços com 0% e 10% de vidro apresentaram resistência à tração por compressão diametral similar em todas as condições testadas ($p < 0,01$). No traço com 5% percebe-se que a queima (nas três temperaturas testadas) diminuiu a resistência em comparação com tratamento sem a mufla, e com 7% percebe-se que a resistência sem forno

mufla e a queima a 200 °C foi similar e superior a quando este material foi queimado à 400 °C e 600 °C.

No ensaio de caracterização do vidro moído, os resultados ficaram semelhantes ao do agregado miúdo. Quando analisada a influência das porcentagens de vidro moído sobre a trabalhabilidade do concreto, verificou-se que o valor da porcentagem de vidro não afetou na trabalhabilidade quando comparado ao concreto de referência, não sendo necessário o uso de aditivo.

Conforme o estudo realizado, os resultados demonstraram que aumentou as resistências principalmente nos tratamentos de 5% e 7% de vidro. Dessa forma, a substituição parcial da areia pelo vidro moído é uma alternativa viável na construção civil com a finalidade de melhorar as características mecânicas, assim como diminuir a quantidade dos mesmos em aterros, além de reutilizar o material de forma sustentável.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, S. P. **Uso de Politereftalato de Etileno (PET) como agregado em peças de concreto para pavimento intertravado.** 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 07 out. 2016. Disponível em: <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/handle/riufcg/929>> . Acesso em: 04 mai. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland.** 7. ed. São Paulo: ABCP, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16972: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7222: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5628:** Componentes construtivos estruturais - Determinação de resistência ao fogo. Rio de Janeiro, 2001

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5737:** Cimentos Portland resistentes a sulfatos. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738:** Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739:** Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5751:** Materiais Pozolânicos- Determinação de atividade pozolânica. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7211:** Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8522:** Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12655:** Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13860:** Glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndio. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14432:** Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento. Rio de Janeiro, 2001. 14 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15116:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15900-1:** Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16605:** Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa

específica. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO TÉCNICA BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS AUTOMÁTICAS DE VIDRO (ABIVIDRO). **Sustentabilidade**. Disponível em: <www.abividro.org.br>. Acesso em: 13 abr. 2021.

BARROSO, L. B.; MOHAMAD, G.; LOPES, M. I. P.; MACIEL, A. V. Viabilidade Tecnológica para o Uso do Vidro Moído em Argamassa e Concreto. In: 52º Congresso Brasileiro do Concreto, 2010, Fortaleza, CE. **Anais** [...] Fortaleza, CE: IBRACON, 2010. Acesso em: 18 abr. 2021.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução CONAMA n.º. 307, de 5 de julho de 2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos da construção civil. Ministério do Meio Ambiente: CONAMA, 2002. Diário Oficial da União. Brasília, DF: Imprensa Oficial. Acesso em: 04 mai. 2021.

BRASIL. **Lei n.º 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF, 2 ago. 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 10 abr. 2021.

BICKLEY, John A.; MITCHELL, Denis. A State-of-the-Art Review of High Performance Concrete Structures Built in Canada: 1990-2000. **Cement Association of Canada**. Toronto, 2001. Acesso em: 04 abr. 2021.

CAMILLO JUNIOR, Abel Batista. **Manual de Prevenção e Combate a Incêndios**. 15 ed. São Paulo, SP: Senac São Paulo, 2013.

CASTRO, Gleidismar das Graças Simão. **Um método geral de cálculo para verificação de estruturas de concreto em situação de incêndio**. 2005. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 25 out. 2005. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-8CJJ7K/1/177.pdf>> Acesso em: 03 abr. 2021.

CLUBE DO CONCRETO. **O que é Slump Test (ensaio de abatimento)?** Disponível em: <http://www.clubedoconcreto.com.br/2013/08/o-que-e-slump-test-ensaio-de-abatimento_29.html> Acesso em: 03 abr. 2021

COSTA, Carla Neves. **Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio**. 2008. Tese (Doutorado em engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, SP, 16 mar. 2008. Disponível: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3144/tde-04092008-155911/publico/1_cap.pdf> Acesso em: 03 abr. 2021.

COSTA, Carla Neves; SILVA, Valdir Pignatta. **Revisão histórica das curvas padronizadas de incêndio**. Seminário internacional NUTAU, 2006 – Inovações tecnológicas e sustentabilidade, São Paulo. 2006.

CRENTSIL, K. S., BROWN, T., TAYLOR, A., **Recycled glass as sand replacement in premix concrete**. Ed. Eco-Recycled Australia and CSIRO, 2001.

DI GIULIO, G. Vantagens ambientais e econômicas no uso de borracha em asfalto. **Inovação Uniemp**. Campinas, v. 3, n. 3, p. 12-15, 2007. ISSN 1808-2394. Disponível em: <http://inovacao.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1808-23942007000300008&nr_m=iso> Acesso em: 17 abr. 2021

FÁVERO, R. B. **Avaliação da utilização de sucata de vidro como adição mineral frente à sílica ativa e como agregado miúdo artificial na produção de materiais à base de cimento**. 2009. Trabalho de Conclusão (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/28544>> Acesso em: 17 abr. 2021.

FERRARI, G.; JORGE, J. **Apostila Materiais e Tecnologias**. São Paulo, Universidade Bandeirantes. (Notas de aula). Disponível em: <<https://www.docsity.com/pt/apostila-de-materiais-e-tecnologias/4715624/>> Acesso em: 01 mai. 2021.

GIONGO, José Samuel. **Concreto armado**: Projeto estrutural de edifícios. Apostila da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: <<http://www.gdace.uem.br/romel/MDidatico/EstruturasConcretoII/ProjetoEstruturaldeEdificios-J.%20S.Gingo-EESC-Turma2-2007.pdf>> Acesso em: 01 mai. 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **Fire-Resistance Tests** – Elements of Building Construction – Part 1.1: General Requirements for Fire Resistance Testing. ISO 834. Geneva: ISO/TC, 1999.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 2000. 113 f. Tese (Doutorado em Livre Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <https://www.ietsp.com.br/static/media/media-files/2015/01/23/LV_Vanderley_John_-_Reciclagem_Residuos_Construcao_Civil.pdf> Acesso em: 16 mai. 2021

KIRCHHOF, L.D. **Estudo teórico-experimental da influência do teor de umidade no fenômeno spalling em concretos expostos a elevadas temperaturas**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/32002>> Acesso em: 16 mai. 2021.

LACÔRTE, Patrícia Maria Ribeiro. **Aproveitamento de resíduos na construção civil**. 2013. Monografia (Especialização em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-9CAEXK>> Acesso em: 01 mai. 2021.

LIMA, Rogério Cattelan Antochaves de. **Investigação dos efeitos de temperaturas elevadas em reforços estruturais com tecidos de fibra de carbono**. 2001. Dissertação (Mestrado em

Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/1677>> Acesso em: 03 abr. 2021.

LIMA, R.C.A. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/5085>> Acesso em: 04 abr. 2021.

LIMA, R. C. A.; KIRCHHOF, L. D.; CASONATO, C. A.; SILVA FILHO, L. C. P. Efeito de elevadas temperaturas no concreto. In: II Seminário de patologias das edificações: Novos Materiais e Tecnologias Emergentes, 2004, Porto Alegre. **Anais** [...] Porto Alegre: UFRGS., 2004. Disponível em: <http://www.deecc.ufc.br/Download/TB819_Patologia_e_Recuperacao_de_Estruturas_de_Concreto/Efeito_do_fogo_no_concreto.pdf> Acesso em: 04 abr. 2021.

LUZ, A. P.; RIBEIRO R. Uso de pó de vidro como fundente para produção de grês porcelanato. Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 13, n. 1, pp. 96 – 103, 2008. ISSN 1517-7076. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rmat/a/dqCcQR64TvRpbYVmtSSthzQ/?lang=pt>> Acesso em: 17 abr. 2021.

MARQUES, A. C.; RICCI, E. C.; TRIGO, A. P. M.; AKASAKI, J. L. **Resistência Mecânica do Concreto Adicionado de Borracha de Pneu Submetido à Elevada Temperatura**. Revista Tópos. Campinas, SP, v. 6, n. 1, 2012. ISSN 2675-7745. Disponível em: <<http://revista.fct.unesp.br/index.php/topos/article/view/2506/2239>> Acesso em: 17 abr. 2021.

MAXIMO, Oneida Heiderick. **Desempenho térmico de compostos cimentícios produzidos com adição de micropartículas de resíduo de vidro**. 2016. Dissertação (Mestrado em construção civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-AFGPWM/1/disserta_o_oneida.pdf> Acesso em: 10 abr. 2021.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutural, propriedades e materiais**, 3 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2014. Acesso em: 10 de abril de 2021.

MELÃO, Arthur Ribeiro. **Sobre perfis I de aço em situação de incêndio paramétrico**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3144/tde-02122016-090138/en.php>> Acesso em: 24 abr. de 2021.

MIRANDA JR, E.J.P; PAIVA, A.E.M.. Influência dos resíduos vítreos na resistência à compressão axial do concreto de cimento Portland. In: 56º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 1º Congresso Latino-Americano de Cerâmica, IX Brazilian Symposium on Glass and Related Materials, 2012, Curitiba, PR. **Anais** [...] 2012. Disponível em: <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/46/081/46081531.pdf> Acessado: 18 abr. 2021.

MORALES, G.; CAMPOS, A.; FAGANELLO, A. A ação do fogo sobre os componentes do concreto. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**. Londrina, PR, v. 32, n. 1, p.47-55, 2011. ISSN 1679-0375. Disponível em: <<http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/semexatas/article/view/4057>> Acesso em: 06 mai. 2021.

NASCIMENTO, Winny Fernanda; SANTOS, Davidson Araújo; SILVA, Breno Alcântara; TEMPONI, Gabriela Jordão; ANDRADE, Diego; LUZ, Brisa Souza; ALEXANDRINO, Carlos Henrique; CARLI, Alessandra de Paula. **Caracterização de compósitos de concreto utilizando agregado miúdo do vidro**. 2014. Artigo apresentado no XI Congresso Nacional de Meio Ambiente de Poços de Caldas. Disponível em: <<http://meioambientepocos.com.br/portal/anais/2014/arquivos2014/CARACTERIZA%C3%87%C3%83O%20DE%20COMP%C3%93SITOS%20DE%20CONCRETO%20UTILIZANDO%20AGREGADO%20MI%C3%9ADO%20DO%20VIDRO.doc>>. Acesso em: 13 abr. 2021.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto** – 2ª edição. Ed.: Bookman. 2013. ISBN:978-85-8260-071-9. Português, 2013.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. (Tradução: Salvador Giammusso). 2ª Edição. São Paulo: PINI, 2013.

PINTO-COELHO, Ricardo Motta. **Reciclagem e desenvolvimento sustentável no Brasil**. 1. Ed. Belo Horizonte: Recóleo, 2009.

PURKISS, Jonh A. **Fire Safety Engineering Design of Structures**. Butterworth Heinemann. Oxford, 1996.

RIBEIRO, Anderson Osvaldo. **Estudo de resíduo da lapidação de vidro para incorporação em argamassas de cimento Portland**. 2015. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. Acesso em: 25 de abril de 2021. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14232/1/EstudoResiduoLapidacao.pdf>> Acesso em: 04 abr. 2021

ROCHA, P.A.S.; DA SILVA, K.I. Estudo do desempenho de vigas em situação de incêndio a partir do modelo de fibras. ScienceDirect (Elsevier B.V.). **Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería**, v. 33, p. 65-71, 2017. ISSN 0213-1315. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0213131516000031>> Acesso em: 04 abr. 2021.

RODRIGUES, Publio Penna Firme. **Parâmetros de Dosagem do Concreto**. ET-67. 3ª Ed. São Paulo: IBRACON - Associação Brasileira de Cimento Portland, 1998.

RIGHI, Débora; KÖHLER, Lucas; TABARELLI, Aline; KIRCHHOF, Larissa; LIMA, Rogério. **Análise de concretos produzidos com vidro moído quando submetidos à elevadas temperaturas**. In.: XXXV Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural. 2012. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em:

<https://cimentoitambe.com.br/downloads/artigo_vidro_moido.pdf> Acesso em: 17 abr. 2021.

TENCHEV, Rosen T.; PURKISS, Jonh A. Finite Element Analysis of Coupled Heat and Moisture Transfer in Concrete Subjected to Fire. **Numerical Heat Transfer**, Part A: Applications. Chicago, v. 39, n. 7, 2001. ISSN 1521-0634. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10407780119853>> Acesso em: 04 abr. 2021.

VIAN, DANIEL. **Análise do comportamento mecânico e durabilidade de concretos produzidos com vidro moído**. 2018. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, RS. Disponível em: <<https://www.univates.br/bdu/bitstream/10737/2248/1/2018DanielVian.pdf>> Acesso em: 02 mai. 2021.

SCHENINI, P. C.; BAGNATI, A. M. B.; CARDOSO, A. C. F. Gestão de resíduos da construção civil. In: Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. 2004, Florianópolis, SC. **Anais** [...]. Florianópolis: UFSC.

SILVA, V.P. **Estruturas de aço em situação de incêndio**. Zigurate Editora, São Paulo, 2001.

SIMÕES, L. J.; SAUER, A. S.; TRISTÃO, F. A.; CALMON, J. L.; VIEIRA, G. L. V. Caracterização do resíduo de vidro laminado de parabrisas para utilização como substituto parcial do cimento em matrizes cimentícias. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**. Rio Grande do Sul, v. 22, p. 43-49, 2013. ISSN: 1677-3047 Disponível em: <http://www.editoradunas.com.br/revistatpec/Art5_N22.pdf> Acesso em: 10 abr. 2021.

APÊNDICES

APÊNDICE A – RESISTÊNCIA DOS CORPOS DE PROVA À COMPRESSÃO SIMPLES, TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL E TRAÇÃO NA FLEXÃO

Resistência à compressão simples aos 28 dias

Traço	28 dias	Média	Desvio Padrão
Referência (0%)	24,65		
	22,98	24,	2,1996
	27,34		
5% Vidro	29,34		
	30,58	30,22	0,7626
	30,73		
7% Vidro	32,06		
	32,73	32,69	0,6108
	33,28		
10% Vidro	29,83		
	30,54	29,46	1,3132
	28		

Fonte: Autora (2021)

Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias

Traço	28 dias	Média	Desvio Padrão
Referência (0%)	2,15		
	2,04	2,01	0,1625
	1,83		
5% Vidro	2,42		
	2,72	2,64	0,1928
	2,78		
7% Vidro	2,44		
	2,66	2,61	0,1553
	2,74		
10% Vidro	2,49		
	2,24	2,05	0,5541
	1,43		

Fonte: Autora (2021)

Resistência à tração na flexão aos 28 dias

Traço	28 dias	Média	Desvio Padrão
Referência (0%)	3,65		
	3,58	3,62	0,0351
	3,62		
5% Vidro	4,30		
	4,27	4,30	0,03
	4,33		
7% Vidro	4,78		
	3,91	4,41	0,4508
	4,55		
10% Vidro	3,97		
	3,62	3,80	0,1752
	3,81		

Fonte: Autora (2021)

APÊNDICE B – RESISTÊNCIA DOS CORPOS DE PROVA À COMPRESSÃO SIMPLES E TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL SUBMETIDOS AO FORNO MUFLA

Resistência à compressão simples submetido ao forno mufla aos 28 dias

28 dias	Referência	5% Vidro	7% Vidro	10% Vidro
200°C	21,99	26,92	29,80	30,43
	22,26	26,84	31,06	28,87
	22,14	27,13	27,16	28,20
Média	22,13	26,96	29,34	29,17
Desvio Padrão	0,1352	0,1497	1,9911	1,1429
400°C	22,15	25,94	29,79	27,46
	23,83	30,48	29,57	28,92
	22,76	28,08	28,70	28,94
Média	22,91	28,17	29,35	28,44
Desvio Padrão	0,8488	2,2677	0,5763	0,8487
600°C	21,21	24,17	25,37	26,22
	15,61	25,06	28,02	24,11
	14,55	25,88	29,08	24,11
Média	17,12	25,04	27,49	24,81
Desvio Padrão	3,5786	0,8552	1,9109	1,2182

Fonte: Autora (2021)

Resistência à tração por compressão diametral submetido ao forno mufla aos 28 dias

28 dias	Referência	5% Vidro	7% Vidro	10% Vidro
200°C	1,62	2,15	1,63	1,97
	2,12	1,92	1,09	2,11
	1,78	2,35	2,33	1,59
Média	1,84	2,14	1,68	1,89
Desvio Padrão	0,2553	0,2151	0,6217	0,2690
400°C	1,24	2,09	2,28	2,45
	1,84	1,70	2,48	2,25
	1,56	2,16	2,33	2,57
Média	1,55	1,98	2,36	2,42
Desvio Padrão	0,3002	0,2478	0,1040	0,1616
600°C	1,49	1,70	1,60	1,18
	1,54	1,67	2,10	1,82
	1,13	1,66	2,11	1,41
Média	1,39	1,68	1,94	1,47
Desvio Padrão	0,2236	0,0208	0,2916	0,3241

Fonte: Autora (2021)



UNIVATES

R. Avelino Talini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil
CEP 95914.014 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000
www.univates.br | 0800 7 07 08 09