

**JORGE LUIZ ROCHA BORGES**

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE VIDRO COMO AGREGADO NA PRODUÇÃO DE  
ARTEFATOS DE CIMENTO.**

**PELOTAS**

**2022**

**JORGE LUIZ ROCHA BORGES**

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE VIDRO COMO AGREGADO NA PRODUÇÃO DE  
ARTEFATOS DE CIMENTO.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Ambientais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-Rio-grandense, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre.

Orientador: Dr. Marcelo Peske Hartwig

Coorientador: Ms. Lucas Hlenka

**PELOTAS**

**2022**

### Ficha Catalográfica

B732u Borges, Jorge Luiz Rocha.  
Utilização de resíduo de vidro como agregado na produção de artefatos de cimento / Jorge Luiz Rocha Borges. – 2022.  
101 f. : il. color.  
Orientador: Prof. Dr. Marcelo Peske Hartwig.  
Dissertação (mestrado) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Ambientais, Mestrado Profissional em Engenharia e Ciências Ambientais, Pelotas, 2022.  
1. Sustentabilidade. 2. Concreto. 3. Construção civil. 4. Reciclagem do vidro 5. Agregado de vidro. I. Hartwig, Marcelo Peske . II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense - IFSul.  
III. Título.

CDD 628

Catálogo na publicação:  
Bibliotecária Vivian Iracema Marques Ritta CRB 10/1488  
Biblioteca IFSul - Câmpus Pelotas

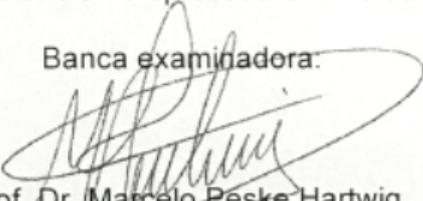
JORGE LUIZ ROCHA BORGES

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE VIDRO COMO AGREGADO NA PRODUÇÃO DE  
ARTEFATOS DE CIMENTO.

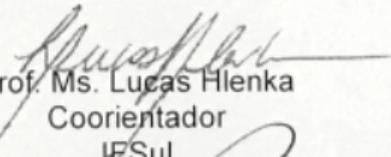
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Ambientais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-Rio-grandense, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre.

Dissertação defendida e aprovada em: 10/08 de 2022.

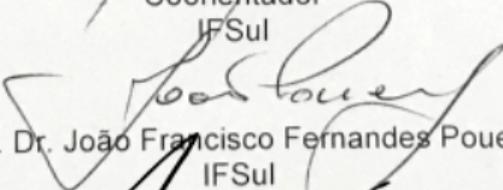
Banca examinadora:



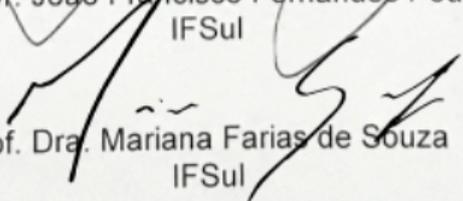
Prof. Dr. Marcelo Peske Hartwig  
Orientador  
IFSul



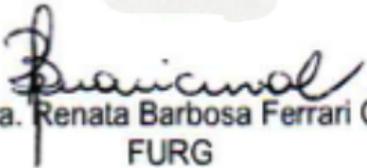
Prof. Ms. Lucas Hlenka  
Coorientador  
IFSul



Prof. Dr. João Francisco Fernandes Pouey  
IFSul



Prof. Dra. Mariana Farias de Souza  
IFSul



Prof. Dra. Renata Barbosa Ferrari Curval  
FURG

## **DEDICATÓRIA**

Primeiramente a Deus, por oportunizar-me o curso e capacitar-me ao longo dessa jornada, pois sem Ele não teria alcançado o final desse trabalho, aos meus pais que sempre me mostraram a importância do conhecimento e a minha família, Cris, Laís e Laura, que foram pacientes, compreensivas, colaborativas e amáveis diariamente.

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço primeiramente a Deus pela vida e por me oportunizar cursar esse mestrado. Agradeço por Sua graça, misericórdia, amor e a toda paciência e sabedoria que me foi concebido.

Agradeço ao professor e orientador Marcelo Peske Hartwig por ter acreditado em meu trabalho, pelos seus ensinamentos e apoio durante essa caminhada.

Agradeço ao meu coorientador, professor Lucas Hlenka, por toda paciência, apoio e conhecimentos técnicos que somados aos ensinamentos alavancou esse trabalho.

Agradeço a professora Daniela Cursio, a professora Daiane Gomes, ao professor Nereu Pitol e ao professor José Francisco Fernandes Pouey pelo incentivo, apoio e colaborações, pois não mediram esforços para que essa pesquisa se realizasse.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Ambientais do Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia Sul-rio-grandense Campus Pelotas pelo suporte e ensinamentos proporcionados pelos professores.

Agradeço ao Curso Técnico em Edificações do Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia Sul-rio-grandense Campus Pelotas por ceder suas dependências e laboratório para a realização dos ensaios.

Agradeço a Cooperativa de Trabalho dos Agentes Ambientais do Fraget pela doação da sucata de vidro e em especial a cooperada Fabiana Silveira por toda presteza e atenção para a coleta do resíduo de vidro.

Agradeço aos colegas discentes do PPGECA que me acompanharam e incentivaram durante toda a jornada do mestrado, contribuindo para o sucesso desse trabalho.

Agradeço a minha família pela paciência com minhas impaciências e ausências, pois precisava dedicar-me aos estudos. Por acreditarem e me incentivarem sempre que fraquejava, pois foi essencial para me fortalecer e me abastecer de coragem para continuar.

Agradeço a minha mãe, irmãs, sogro, cunhados e cunhadas, que mesmo de longe me incentivaram e se alegraram com essa conquista.

Agradeço ao meu pai, que mesmo não estando presente fisicamente, sei que estaria muito feliz por mais essa conquista.

Agradeço aos professores e as professoras da banca examinadora por suas importantes e essenciais contribuições.

“Para tudo há uma ocasião, e um tempo para cada propósito debaixo do céu”.

Eclesiaste 3:1

## RESUMO

Atualmente, a reciclagem do vidro contribui de duas formas para o desenvolvimento sustentável, atenuando o acúmulo nos aterros sanitários e, economicamente, diminuindo a extração de recursos naturais, utilizando-o na forma de cacos de vidro na fabricação de novas embalagens. Os resíduos de vidro só precisam ser triturados em tamanhos especificados para uso como agregado em várias aplicações, como filtragem de água, reboco de areia, cobertura de areia para gramados esportivos e substituição de areia em concreto. A utilização do resíduo de vidro como agregado, cada vez mais, tem sido estudada por pesquisadores e aplicada em concretos por alguns países como a Austrália, adotando vidro proveniente dos descartes urbanos como substituto do agregado miúdo em concretos para a construção civil. Sabe-se que a incorporação de agregado de vidro até o limite de 15%, aumentou o módulo de rigidez dos pavimentos. Os Estados Unidos da América têm uma forte tradição de construção de pavimentos urbanos, rodoviários e aeroportuários com agregado de vidro há mais de 50 anos devido às dificuldades de eliminação de resíduos de vidro. Uma solução encontrada pelas cooperativas para reduzir o espaço de armazenamento foi triturar o resíduo de vidro. Para esta pesquisa, o resíduo de vidro utilizado é oriundo dos materiais coletados pela COOTAFRA - Cooperativa de Trabalho dos Agentes Ambientais do Fraget no bairro Fragata, da cidade de Pelotas e pelas cooperativas da Rede Reciclar da Região Sul do RS. Diante do exposto, o objetivo desta pesquisa é avaliar a potencialidade do uso do resíduo de vidro moído proveniente de reciclagem da cidade de Pelotas/RS, em substituto parcial da areia no concreto. O resíduo de vidro foi usado na proporção, em substituição do agregado areia em massa, de 20%. Ensaios em concreto foram realizados com relações água/cimento variando em 0,45, 0,50, 0,536 e 0,55. Para o concreto no estado fresco, foram realizados ensaios de consistência e avaliado o comportamento dos concretos produzidos. No estado endurecido, corpos de prova foram moldados e após 28 dias de cura foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão axial. Com os resultados dessa pesquisa verificou-se que o resíduo de vidro moído pode ser utilizado na fabricação de concretos convencionais, pois resistências acima de 25 MPa aos 28 dias foram registradas para todas as relações água/cimento ensaiadas.

Palavras-Chave: Sustentabilidade; Concreto; Construção civil; Reciclagem do vidro.

## ABSTRACT

Currently, glass recycling contributes in two ways to sustainable development, mitigating the accumulation in landfills and, economically, reducing the extraction of natural resources, using it in the form of broken glass in the manufacture of new packaging. Waste glass only needs to be crushed to specified sizes for use as aggregate in various applications such as water filtration, sand plastering, sand covering for sports turf, and sand replacement in concrete. The use of waste glass as an aggregate has been increasingly studied by researchers and applied to concrete in some countries such as Australia, adopting glass from urban waste as a substitute for fine aggregate in concrete for civil construction. It is known that the incorporation of glass aggregate up to 15% increased the stiffness module of the floors. The United States of America has a strong tradition of building urban, road and airport pavements with glass aggregate for over 50 years due to the difficulties of disposing of glass waste. One solution found by the cooperatives to reduce storage space was to crush the glass waste. For this research, the glass waste used comes from materials collected by COOTAFRA - Cooperative of Work of Environmental Agents of the Fraget in the Fragata neighborhood, in the city of Pelotas and by the cooperatives of the Recycling Network of the Southern Region of RS. Given the above, the objective of this research is to evaluate the potential of using ground glass waste from recycling in the city of Pelotas/RS, as a partial substitute for sand in concrete. The glass residue was used in the proportion, in substitution of the aggregate sand in mass, of 20%. Tests on concrete were performed with water/cement ratios ranging from 0.45, 0.50, 0.536 and 0.55. For the concrete in the fresh state, consistency tests were carried out and the behavior of the concrete produced was evaluated. In the hardened state, specimens were molded and after 28 days of curing they were submitted to axial compression strength tests. With the results of this research, it was verified that the ground glass residue can be used in the manufacture of conventional concrete, since strengths above 25 MPa at 28 days were recorded for all water/cement ratios tested.

Keywords: Sustainability; Concrete; Construction; Glass recycling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Composição do vidro.....	27
Figura 2 – Valores da resistência à compressão das misturas estudadas por Righi et al. (2011) .....	33
Figura 3 – Valores da resistência à compressão das misturas estudadas por Oliveira, Gomes e Santos (2008) .....	41
Figura 4 – Valores da tensão média de ruptura das faixas granulométricas estudadas por López, Azevedo e Barbosa Neto (2005) .....	42
Figura 5 – Valores da resistência à compressão do concreto resultantes da substituição de areia por vidro com granulometria de 0,15 mm a 0,30 mm estudados por López, Azevedo e Barbosa Neto (2005) .....	44
Figura 6 – Valores da resistência à compressão dos concretos resultantes da adição de vidro com granulometria de 0,15 mm a 0,30 mm sobre a massa da areia estudadas por López, Azevedo e Barbosa Neto (2005) .....	46
Figura 7 – Organograma das variáveis consideradas na pesquisa .....	50
Figura 8 – Organograma do método experimental.....	51
Figura 9 – Composição granulométrica da areia utilizada nos experimentos.....	53
Figura 10 – Distribuição granulométrica da areia .....	54
Figura 11 – Tipos de embalagens de vidro utilizadas na moagem.....	54
Figura 12 – Moedor de caliças e resíduos cerâmicos MC-96, com sistema de mandíbulas e peneiras, marca SCHREINER .....	55
Figura 13 – Resíduo de vidro moído fornecido pela COOTAFRA .....	55
Figura 14 – Sistema de peneiramento mecânico Solotest .....	56
Figura 15 – Composição granulométrica do resíduo de vidro moído .....	56
Figura 16 – Distribuição granulométrica do vidro moído .....	57
Figura 17 – Curvas granulométricas da areia e do vidro moído .....	58
Figura 18 – Resultado da mistura da areia com 20% de resíduo de vidro moído ...	59
Figura 19 – Composição granulométrica da mistura composta de areia com 20%	

de resíduo de vidro moído .....	59
Figura 20 – Curva granulométrica da composição areia com 20% de resíduo de vidro moído.....	60
Figura 21 – Distribuição granulométrica da brita zero .....	61
Figura 22 – Curva granulométrica da brita zero .....	62
Figura 23 – Sucata de vidro moída da COOTAFRA.....	65
Figura 24 – Composição da areia com 20% de resíduo de vidro moído .....	66
Figura 25 – Curva de Abrams para a obtenção da relação a/c .....	68
Figura 26 – Estufa Biomatic .....	68
Figura 27 – Balanças utilizadas para pesagem dos materiais.....	70
Figura 28 – Materiais sendo pesados e identificados.....	71
Figura 29 – Porcionamento dos materiais para produção das dosagens.....	71
Figura 30 – Sequência de colocação dos materiais na betoneira para a produção do concreto.....	72
Figura 31 – Leitura do abatimento do tronco de cone .....	73
Figura 32 – Medições do abatimento do tronco de cone - Slump Test.....	73
Figura 33 – Moldes utilizados para moldagem dos corpos de prova.....	73
Figura 34 – Sequência de moldagem dos corpos de prova .....	74
Figura 35 – Corpos de prova moldados no laboratório do curso de Edificações .....	74
Figura 36 – Corpos de prova em cura úmida.....	75
Figura 37 – Corpos de prova secando durante 24 horas .....	75
Figura 38 – Corpos de prova identificados para o ensaio de compressão.....	76
Figura 39 – Medição da massa e dimensões dos corpos de prova (CP) .....	76
Figura 40 – Ensaio de compressão axial dos corpos de prova produzidos .....	77
Figura 41 – Gráfico dos resultados do abatimento do tronco de cone .....	79
Figura 42 – Gráfico comparativo da resistências à compressão estimada em projeto com a resistência média medida no ensaio.....	81

Figura 43 – Gráfico comparativo das resistências à compressão média medidas no ensaio.....	82
Figura 44 – Gráfico da curva de Abrams para concreto com 20% e resíduo de vidro .....	84
Figura 45 – Artefatos com resíduo de vidro moído.....	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição do vidro e suas funções .....	27
Tabela 2 – Tipos de vidro e aplicações .....	28
Tabela 3 – Abatimento dos concretos ensaiados .....	32
Tabela 4 – Abatimentos máximos medidos para diferentes substituições .....	36
Tabela 5 – Abatimento e densidade dos concretos ensaiados .....	37
Tabela 6 – Caracterização dos agregados estudados .....	40
Tabela 7 – Composição das misturas utilizadas neste estudo .....	40
Tabela 8 – Efeito da substituição em 5%, em massa, da areia por vidro moído sobre a absorção de água, índice de vazios e massa específica seca do concreto .....	43
Tabela 9 – Resultados da substituição em 5%, em massa, da areia por vidro moído sobre o abatimento do concreto fresco .....	44
Tabela 10 – Resultados da substituição de areia por vidro com granulometria de 0,15 mm a 0,30 mm sobre a absorção de água, índice de vazios e massa específica seca do concreto .....	45
Tabela 11 – Resultados da influência da substituição de areia por vidro na granulometria 0,15-0,30 mm sobre o abatimento do concreto .....	45
Tabela 12 – Resultados dos ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica seca em função da adição de vidro com granulometria de 0,15 mm a 0,30 mm sobre o teor de areia .....	47
Tabela 13 – Resultados da influência da adição de vidro moído na granulometria 0,15 mm a 0,30 mm à massa de areia sobre o abatimento do concreto .....	47
Tabela 14 – Caracterização granulométrica da areia .....	53
Tabela 15 – Caracterização granulométrica do resíduo de vidro moído .....	57
Tabela 16 – Caracterização granulométrica da composição areia com 20% de vidro moído .....	60
Tabela 17 – Caracterização granulométrica do agregado graúdo .....	62
Tabela 18 – Limites de composição do cimento Portland Pozolânico .....	63
Tabela 19 – Requisitos químicos do cimento CP IV-32 RS .....	64
Tabela 20 – Requisitos físicos e mecânicos do cimento CP IV-32 RS .....	64
Tabela 21 – Resultado da caracterização dos materiais utilizados nos concretos ..	69
Tabela 22 – Apresentação dos traços obtidos para cada a/c .....	69
Tabela 23 – Dosagens produzidas para o experimento .....	70

Tabela 24 – Ordem de colocação dos materiais na betoneira .....	72
Tabela 25 – Valores do abatimento do tronco de cone .....	78
Tabela 26 – Valores de massa específica dos concretos estudados.....	80
Tabela 27 – Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias .....	81

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c - Relação água/cimento

a.C. – Antes de Cristo

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI - American Concrete Institute (Instituto Americano do Concreto)

ARV – Agregado de resíduo de vidro

Bioquim - Especialidades Químicas, biológicas e Equipamentos Ltda.

CAA – Concreto Autoadensável

CAA-RV - Concretos autoadensáveis com resíduo de vidro

CaCO<sub>3</sub> – Carbonato de cálcio

C20RV – Concreto com 20% de resíduo de vidro

CA20RVM – Composição areia com 20% de resíduo de vidro moído

CEBRACE – Companhia Brasileira de Cristal

CONAMA – Concelho Nacional do Meio Ambiente

CP – Corpo de Prova

CP IV-32 RS – Cimento Portland Pozolânico classe de resistência 32 MPa resistente a sulfatos

COOTAFRA - Cooperativa de Trabalho dos Agentes Ambientais do Fraget no bairro Fragata

CREFO1 – Concreto referência 01 sem substituição, a/c = 0,45

CREFO2 – Concreto referência 02 sem substituição, a/c = 0,50

CREFO3 – Concreto referência 03 sem substituição, a/c = 0,536

CREFO4 – Concreto referência 04 sem substituição, a/c = 0,55

C20RV01 – Concreto com areia com 20% resíduo de vidro moído 01, a/c = 0,45

C20RV02 – Concreto com areia com 20% resíduo de vidro moído 02, a/c = 0,50

C20RV03 – Concreto com areia com 20% resíduo de vidro moído 03, a/c = 0,536

C20RV04 – Concreto com areia com 20% resíduo de vidro moído 04, a/c = 0,55

f<sub>cj</sub> – Resistência à compressão do concreto requerida aos 28 dias, em MPa

f<sub>ck</sub> – Resistência característica à compressão do concreto, em MPa

IFSUL – Instituto Federal Sul-rio-grandense

ITZ - Zona de Transição Interfacial

NBR - Norma Brasileira

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

M<sub>emédia</sub> – Massa específica média

RS – Rio Grande do Sul

RVM – Resíduo de vidro moído

S<sub>d</sub> – Condição de controle, em Mpa

s.d. – sem dados

SANEP – Serviço Autônomo de Saneamento de Pelotas

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>21</b>
1.1 Justificativa .....	22
1.2 Objetivos.....	24
1.2.1 Objetivo geral .....	24
1.2.2 Objetivos específicos .....	24
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>26</b>
2.1 Resíduos sólidos .....	26
2.2 Vidro .....	27
2.3 Panorama do mercado do vidro .....	28
2.4 O vidro como um agregado .....	30
2.5 Aplicação do resíduo de vidro em concreto.....	31
2.6 Exposição dos trabalhos experimentais .....	31
2.6.1 Trabalho de Ismail e Al-Hashmi (2009).....	31
2.6.2 Trabalho de Righi, Köhler, Tabarelli, Kirchhoff e Lima (2011) .....	32
2.6.3 Trabalho de Sharifi, Houshiar e Aghebati (2013).....	33
2.6.4 Trabalho de Camarate (2016).....	34
2.6.5 Trabalho de Gautam, Srivastava e Agarwal (2012).....	35
2.6.6 Trabalho de Malik, Bashir, Ahmad, Tariq e Chowdhary (2013) .....	35
2.6.7 Trabalho de Harrison, Berenjian e Seifan (2020).....	36
2.6.8 Trabalho de Tamanna, Tuladhar e Sivakugan (2020) .....	37
2.6.9 Trabalho de Oliveira, Gomes e Santos (2008).....	40
2.6.10 Trabalho de López, Azevedo e Barbosa Neto (2005).....	42
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>49</b>
3.1 Planejamento dos experimentos.....	49
3.2 Programa experimental .....	50
3.3 Caracterização dos materiais .....	52
3.3.1 Areia .....	52

3.3.2 Resíduo de vidro moído .....	54
3.3.3 Composição areia com 20% de vidro moído .....	58
3.3.4 Agregado graúdo .....	61
3.3.5 Água .....	63
3.3.6 Aglomerante .....	63
3.4 Métodos.....	64
3.4.1 Processo de obtenção do resíduo de vidro utilizado neste estudo.....	64
3.4.2 Armazenamento e seleção do resíduo de vidro .....	65
3.4.3 Método de dosagem dos concretos .....	66
3.4.4 Ensaio no concreto no estado fresco.....	69
3.4.5 Ensaio no concreto no estado endurecido.....	75
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>78</b>
4.1 Concreto no estado fresco.....	78
4.1.1 Ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone .....	78
4.2 Concreto no estado endurecido.....	80
4.2.1 Massa específica .....	80
4.2.2 Resistência à compressão axial simples .....	80
4.2.3 Dosagem de concretos com 20% de substituição do agregado miúdo por resíduo de vidro moído sem limpeza prévia .....	83
4.2.4 Artefatos produzidos com a CA20RVM .....	83
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>85</b>
<b>6. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>87</b>
6.1 Referências Normativas .....	87
6.2 Referências Bibliográficas .....	90

## 1 INTRODUÇÃO

Há registros da utilização do vidro pela humanidade desde 7.000 anos a.C. por sírios, fenícios e babilônios. Embora sua revelação seja atribuída aos mercadores fenícios que teriam percebido o seu processo de formação, ao acenderem uma fogueira na praia, sobre a qual apoiavam blocos de calcário, perceberam que estes elementos associados originavam uma substância viscosa, transparente e moldável que, ao endurecer, permitia a fabricação de peças de recipiente. Porém foram os egípcios, em torno de 1.500 anos a.C. que o difundiram pelas civilizações do mundo antigo (PORTAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS, 2021 E QUAGLIO, 2021).

No Brasil, a primeira oficina de produção de artefatos de vidro foi construída no século XVII, em Pernambuco. Sendo apenas no século XX que os processos industriais proliferaram pelo país (PORTAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS, 2021).

O vidro leva um milhão de anos para se decompor, mas em contrapartida pode ser reciclado infinitas vezes. Com a instituição da Política Nacional de Resíduos Sólidos pela Lei 12.305/2010 que promove e estimula o retorno da embalagem de vidro como matéria-prima, a reciclagem de embalagens de vidro se destaca na indústria vidreira, ganhando força nos últimos anos. Algumas empresas do ramo se sobressairam ao adotar a logística reversa de embalagens, utilizando as garrafas retornáveis no processo.

Em contrapartida surge um fator de empecilho: a falta de conscientização da população em realizar a coleta seletiva dos resíduos e/ou o encaminhamento das embalagens para os pontos de coleta. Outro fator de impedimento que torna inviável economicamente o retorno das embalagens às indústrias vidreiras é a grande distância geográfica de muitas cooperativas de reciclagem.

Assim os vidros quebrados ou recipientes de vidro ainda são um desafio para as cooperativas de reciclagem, visto que há um custo da coleta e triagem que não é viável economicamente se comparado com o valor recebido pela venda do material. Apesar do grande esforço, as cooperativas não possuem espaço físico suficiente para suprir a demanda. Sendo assim, uma solução encontrada por elas para reduzir o espaço de armazenamento, segundo a cooperada Fabiana Silveira em 15 de dezembro de 2020, responsável pela triagem e armazenamento da COOTAFRA -

Cooperativa de Trabalho dos Agentes Ambientais do Fraget no bairro Fragata, da cidade de Pelotas/RS, foi triturar a sucata de vidro.

Para um maior controle de qualidade, os resíduos de vidro devem ser rigorosamente classificados e limpos antes de ser derretido. Dessa forma o processo de reciclagem envolve muitas etapas e consumo de energia substancial.

Atualmente, a taxa de reciclagem de resíduos de vidro é baixa: Exemplo disso é que cerca de 130 milhões de toneladas de vidro foram produzidas em todo o mundo em 2018 e apenas 21% do vidro foi reciclado (IAN, T., 2020).

Por outro lado, o concreto é o material de construção mais utilizado pelo homem e sua demanda está aumentando a cada dia. Incorporar resíduos em concretos tem sido assunto de estudo de muitos trabalhos em todo mundo, por exemplo: em Portugal, Camarate (2016), estudou a incorporação de vidro reciclado em concretos; Limbachiya (2009), no Reino unido, estudou as propriedades de engenharia e durabilidade em massa de concreto com areia de vidro lavado; Na Austrália, Tamanna, Tuladhar e Sivakugan (2020), estudaram o desempenho da areia de vidro reciclado como substituição parcial da areia no concreto. Cada vez mais tem crescido a necessidade de destinação final do resíduo, visto que as leis ambientais a cada dia estão mais exigentes, e o concreto apresenta um grande potencial para absorver diversos tipos de resíduos na sua composição sem prejudicar a resistência e durabilidade.

Com base nas informações apresentadas, esse estudo visa contribuir de forma significativa para resolver o problema enfrentado pelas cooperativas de vidro no que tange a seu armazenamento, utilizando o resíduo de vidro como agregado para a preparação de concreto. Utiliza-se, para tanto, o resíduo de vidro moído proveniente dos materiais coletados pela COOTAFRA - Cooperativa de Trabalho dos Agentes Ambientais do Fraget no bairro Fragata, da cidade de Pelotas/RS.

## **1.1 Justificativa e importância do tema**

Em face do problema apresentado, buscar alternativas que reduza o consumo de recursos naturais tem sido cada vez mais frequente para preservar o meio ambiente e reduzir investimentos. No Brasil uma das primeiras ações com o objetivo de orientar a destinação dos resíduos da construção civil foi a resolução nº 307

CONAMA, a qual estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos sólidos na construção civil.

Contudo não foram implantadas medidas efetivas de fiscalização para verificar se tais regras estão realmente sendo cumpridas, dificultando a evolução destas questões.

O mais impressionante é que, se o vidro for descartado em aterros sanitários, leva um milhão de anos para se decompor, e de acordo com algumas fontes, não se decompõe (CA.gov.,2022). Blanc e Rubin (2021) afirmam que o vidro normalmente é muito fácil de reciclar devido ao fato de ser feito de areia e simplesmente quebrando-o e derretendo-o, pode-se produzir um novo vidro.

Já existem, em vários países como Alemanha, França, Espanha, Canadá e Estados Unidos, decretos e regulamentações que tratam do gerenciamento e deposição dos resíduos com a aplicação de elevadas taxas sobre aqueles que são depositados no meio ambiente (JURAS, 2005).

Segundo Simões (2013), para que os resíduos sejam utilizados na fabricação de novos materiais de construção, os mesmos devem ser capazes de competir no mercado e contribuir para o desenvolvimento sustentável. Materiais produzidos com sua incorporação, devem atender às exigências físicas, mecânicas e de durabilidade que as normas especificam, de forma a serem superiores ou similares aos produtos já existentes no mercado (BARBOZA, BARBIRATO E SILVA, 2008; LIMA E ROSSIGNOLO, 2010). Essas exigências são necessárias uma vez que o setor da construção civil necessita oferecer materiais que possuam boa qualidade e vida útil prolongada. O resíduo de vidro é foco de diversos estudos como aponta Santos (2015) em sua pesquisa e existe o objetivo de incorporá-lo à preparação de novos materiais na construção civil (SIMÕES, 2013). No Brasil, trabalhos abordando a utilização de resíduos vítreos no concreto, para fins estruturais, são poucos. Como exemplos, podem ser destacados os trabalhos de Azevedo (2002), López, Azevedo e Barbosa Neto (2005) e Miranda Júnior et al. (2014).

Segundo a resolução nº 307 do CONAMA o vidro é um material considerado pertencente à Classe B (reciclável); dessa forma, esses materiais deverão ser reutilizados, reciclados ou encaminhados a áreas de armazenamento temporário, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura.

Em 2013, a Justiça Federal proibiu a mineração o que ocasionou falta de areia para a construção civil no Rio Grande do Sul (reportagem por Fábio Almeida da RBS TV em 12 de jul. de 2013), enquanto que as cooperativas de reciclagem de Pelotas e região Sul do Estado do Rio Grande do Sul apresentaram um grande volume de vidros armazenados em seus depósitos. Em uma conversa informal com o senhor Fábio de Castro, proprietário da empresa Bioquim Especialidades Químicas, Biológicas e Equipamentos Ltda., em 15 de dezembro de 2020, informou este que são recolhidos pelas cooperativas em Pelotas aproximadamente em média 50 toneladas de sucata de vidro todo mês, porém a expectativa seria de 160 toneladas mês.

Sendo assim, uma alternativa que contribuiria para o desenvolvimento sustentável das cooperativas, seria utilizar os cacos de vidro moído em substituição de parte da areia em artefatos de cimento, como: pavers, tijolos, blocos, ladrilhos, cobogós, tubos, drenos, calhas, meios-fios, vasos decorativos etc.

Desta forma, afirma-se que ao substituir parcial a areia do concreto por resíduo de vidro moído, sem provocar prejuízo as propriedades físicas e mecânicas, se proporcionará maior conservação dos recursos naturais, redução de destino inadequado dos resíduos sólidos e desenvolvimento de artefatos de cimento com menor custo.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo geral**

O objetivo desta pesquisa foi avaliar a potencialidade do uso do resíduo do vidro moído proveniente da coleta seletiva da cidade de Pelotas, em substituto parcial do agregado miúdo (areia) no concreto.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Para atender o objetivo geral da pesquisa foram estudados e avaliados os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial simples dos exemplares de concretos produzidos com resíduo de vidro moído, sem limpeza prévia (somente

remoção das tampas), em substituição parcial do agregado miúdo (areia) e comparados os resultados com o concreto de referência (sem substituição). Assim os objetivos específicos propostos são:

- Avaliar as propriedades dos concretos com ou sem o uso do vidro como agregado;
- Avaliar as propriedades físicas e mecânicas e comparar os resultados obtidos utilizando análise estatística;
- Encontrar uma alternativa de dosagem do concreto com resíduo de vidro para se atingir as resistências requeridas.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

Para melhor esclarecimento do tema pesquisado será fornecido um referencial teórico, mostrando definições e características sobre o vidro, o cenário do segmento do setor de vidros e o ciclo de geração, descarte e reciclagem do resíduo de vidro. Também, descrever os procedimentos utilizados, as propriedades dos materiais empregados e a composição das misturas realizadas e os resultados obtidos em cada estudo.

### **2.1 Resíduos sólidos**

O crescente desenvolvimento urbano, industrial e econômico requer mudanças e atualizações tecnológicas fazendo com que recursos naturais explorados aumente a cada ano. Associado a esse aumento da produtividade e consumo existe um enorme aumento na quantidade de resíduos produzidos, fazendo com que milhões de toneladas de resíduos sejam geradas a cada dia em todo mundo.

Camila Boehm da Agência Brasil, numa reportagem publicada em 01 de agosto de 2018, no Brasil, 20 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos poderiam ser recuperados por ano com reciclagem, segundo dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe), o que representa cerca de 25% do total do lixo gerado, ocupando o quinto lugar na geração de lixo no mundo e, diante dos baixos índices de reaproveitamento, contribui para o esgotamento dos recursos naturais do planeta (AGÊNCIA BRASIL, 2018).

A estimativa é que o Brasil perca cerca de R\$ 3 bilhões por ano ao não reaproveitar os resíduos sólidos gerados, de acordo com o presidente da Abrelpe, Carlos Silva Filho. Além disso, o país gasta cerca de R\$ 6 bilhões por ano com a descontaminação das áreas de destinação inadequada, nas quais esses resíduos são depositados. Segundo Schunck (2022), em 2020, o Brasil alcançou um total de 82,5 milhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos – RSU ou 1,07 kg por habitantes. Desse volume, apenas 4% foi destinado à reciclagem. A CEMPRE (2019) em sua pesquisa, constatou que, em 2018, o volume coletado pelas iniciativas de coleta seletiva, apenas cerca de 8% é vidro.

Grande parte desse movimento de separação de resíduos, triagem e reciclagem é feito por cadeias de cooperativas de catadores, proporcionando geração de renda e emprego. O sistema de reaproveitamento de resíduos sólidos, quanto mais privilegiado for, maior será a inserção social, viabilizando maior retorno e maior renda desses trabalhadores (AGÊNCIA BRASIL, 2018).

## 2.2 Vidro

O vidro é uma substância inorgânica, fisicamente homogênea, sólida e amorfa, composta por uma mistura de areia, calcário, barrilha, alumina e corantes. Os constituintes da mistura são submetidos a uma temperatura entorno de 1500°C e 1600°C até formar uma massa semilíquida, que enrijece sem cristalizar após sofrer um processo de resfriamento controlado (SICHIER, CARAM E dos SANTOS, 2007). Os elementos que compõe o vidro sodo-cálcico estão representados na Figura 1 e na Tabela 1 a função de cada componente.

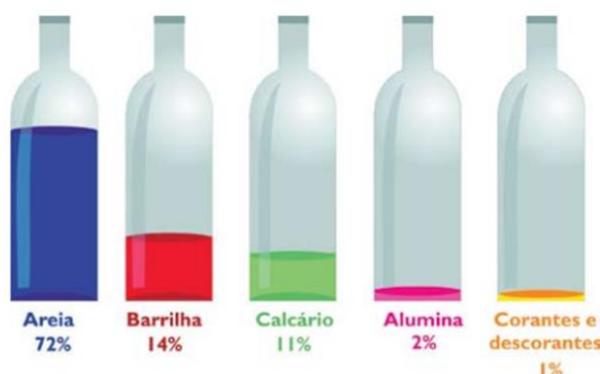


Figura 1 - Composição do vidro. Fonte: Abividro

Tabela 1 - Composição do vidro e suas funções

Composição do vidro	Função
72 % de Sílica (SiO <sub>2</sub> )	matéria-prima básica (areia) com função vitrificante
14% de Barrilha (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	fonte de óxido de sódio e agente fundente
11% de Calcário (CaO)	proporciona estabilidade ao vidro contra ataques de agentes atmosféricos
2% de Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	aumenta a resistência mecânica
1% de Corantes	promove a cor do vidro

Fonte: adaptado da ABIVIDRO (2018)

Em sua forma pura, o vidro é um óxido metálico, super-resfriado, transparente, essencialmente inerte e biologicamente inativo (DIAS E CRUZ, 2009). Essas propriedades, entretanto, podem ser modificadas com a adição de outros compostos ou tratamento de calor, conduzindo a um grande número de usos do vidro.

O vidro tem incontáveis aplicações nas mais variadas indústrias, dada suas características de inalterabilidade, elevada dureza, resistência e propriedades térmicas, ópticas e acústicas, tornando-se um dos poucos materiais ainda insubstituível, estando cada vez mais presente nas pesquisas de desenvolvimento tecnológico para o bem-estar do homem (CEBRACE, 2014).

Na Tabela 2 estão especificados os tipos de vidros, composição química e suas respectivas aplicações.

Tabela 2 - Tipos de vidro e aplicações

TIPOS	COMPOSIÇÃO QUÍMICA	APLICAÇÕES
Vidros para embalagens	Vidro sodo-cálcico	Garrafas, potes, frascos e outros vasilhames fabricados nas cores branca, âmbar e verde.
Vidros planos	Vidro sodo-cálcico	Vidros de janelas, de automóveis, fogões, geladeiras, micro-ondas, espelhos etc.
Vidros domésticos	Vidro boro-Silicato Vidro ao chumbo	Tigelas, travessas, copos, pratos, painéis e produtos domésticos.
Fibras de vidro	-	Mantas, tecidos, fios e outros produtos para aplicações de reforço ou de isolamento.
Vidros técnicos	-	Lâmpadas incandescentes ou fluorescentes, tubos de TV, vidros para laboratório, ampolas, garrafas térmicas, vidros oftálmicos e isoladores elétricos.

Fonte: Adaptado de CEMPRE (2019) e ABIVIDRO (2018)

### 2.3 Panorama do mercado do vidro

A produção mundial atingiu, em 2018, cerca de 130 milhões de toneladas de vidro (IAN, 2020). No Brasil, em 2020, segundo a ABRAVIDRO (2021), foram produzidas cerca de 61.999.390 m<sup>2</sup> de vidros processados não automotivos, subdivididos em: 56,7% temperado, 27% espelho, 11,1% laminado, 4,7% tampos e 0,5% insulados. Stefan David, gerente de sustentabilidade da Abividro, afirma que é

produzido, no país, 8,6 bilhões de embalagens por ano, o que equivale a 1,3 milhões de toneladas de vidro (ABIVIDRO, 2018).

De acordo com a ABIVIDRO (2018), o vidro não se perde no processo de reciclagem e pode ser 100% reaproveitado, sem perder a qualidade. O caminho mais natural de sua reciclagem se encontra na própria indústria vidreira, que utiliza os cacos como matéria prima para a fabricação de novos vidros.

A fabricação das embalagens de vidro inicia-se com a pesagem das matérias primas e se for incorporado cacos de vidro reciclado o mesmo também deverá ser pesado de acordo com as quantidades estipuladas (SIMÕES, 2013). Porém não é simples o processo de reciclagem do vidro, pois antes de ser derretido, ele deve ser rigorosamente classificado e limpo, envolvendo muitas etapas e consumo de energia substancial (GUO et al., 2020). Um exemplo, é a diversidade de cores que os cacos de vidro apresentam indicam mudanças na composição química e propriedades específicas para cada utilização.

Atualmente, a taxa de reciclagem de resíduos de vidro é baixa. Ian (2020) constatou que somente 21% da produção mundial de vidro foi reciclado em 2018 e que o vidro de recipiente foi responsável pela maior taxa de reciclagem entre os materiais de vidro, com cerca de 32% dos resíduos reciclados.

No Brasil, a reciclagem de vidro movimentava aproximadamente R\$ 120 milhões por ano, de acordo com Daniela De Fiori (ABIVIDRO, 2018), diretora de relações corporativas da DIAGEO PUB (Paraguai, Uruguai e Brasil) que afirma que apenas 47% do vidro reciclado é reaproveitado.

A inclusão de cacos de vidro no processo de fabricação de vidro reduz o gasto com energia. Várias indústrias de fabricação de embalagens já constataram que para cada 10% de cacos de vidro agregados à mistura, economizam-se 3 a 4% de energia necessária para a fusão em fornos industriais. Reduz-se também em 10% a utilização de água, além de reduzir em 5% a emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Segundo o Ministério de Minas e Energia (2020), o consumo médio de água na indústria vidreira é cerca de 1,0 m<sup>3</sup>/t. Ao ano são enviados a aterros sanitários cerca de 470 mil toneladas de embalagens de vidro usado. Um contraste enorme, já que a reciclagem impulsiona ganhos econômicos bem interessantes. Algumas empresas que vendem o resíduo para fábricas de vidro faturam até R\$ 270 mil por mês (VERDE GHAIA RESÍDUOS, 2018).

Por outro lado, a recuperação do valor máximo dos resíduos de vidro é uma componente chave para isso. Diferentes setores da indústria já estão realizando várias iniciativas para minimizar a geração de resíduos e melhorar a gestão de resíduos de vidro para maximizar os benefícios econômicos e ambientais, geralmente enfatizando o aumento da reciclagem para reutilização.

## **2.4 O vidro como agregado**

Com a transformação da sucata de vidro em agregado artificial, economiza-se um consumo de energia considerável em relação à extração da areia e britagem de rochas. O vidro por se tratar de um material mais frágil, pode ser fragmentado com facilidade e não necessita ser extraído com o auxílio de explosivos ou outras formas mecânicas.

Limbachiya (2009) constatou que os resíduos de vidro podem ser moídos a fim de fornecer agregados de vidro com propriedades físicas que satisfaçam os requisitos atuais, definidos em normas, de areias naturais para concretos.

Conforme Tamanna, Tuladhar e Sivakugan (2020), a existência de contaminantes como tampas plásticas, metais e papéis que acompanham as embalagens de vidro, bem como a variação química dos diferentes tipos de vidro, como também a dificuldade em separação desse resíduo devido sua coloração, são aspectos que dificultam o processo de reciclagem tornando-o inviável economicamente, assim como a sua reutilização pela indústria vidreira.

Para Sharifi, Houshiar e Aghebaty (2013) a frequente pressão das entidades ambientais para reduzir os resíduos sólidos e reciclar o máximo possível, a indústria da construção civil vem adotando uma série de métodos para atingir esse objetivo, substituindo os resíduos de vidro por materiais de composição do concreto.

A alternativa para a sucata de vidro está na fabricação de outros materiais, sendo os artefatos cimentícios promissores para essa utilização. A sucata de vidro pode ser triturada em partículas variadas, podendo substituir parcialmente o cimento e totalmente os agregados miúdo e graúdo de concreto (LOPES, 2017; BOSTANCI, 2020; JAIN, SANCHETI E GUPTA, 2020; TAMANNA, TULADHAR E SIVAKUGAN, 2020).

## **2.5 Aplicação do resíduo de vidro em concreto**

A utilização do resíduo de vidro triturado em concreto como substituto da areia oferece uma plataforma atraente para sua utilização. Não só diminui a extração de areia natural, como reduz o impacto adverso ao meio ambiente quanto ao uso excessivo de recursos naturais não renováveis, mas também ajuda a reduzir a quantidade de resíduos de vidro que vão para aterros sanitários. Segundo Shi e Zheng (2007), a primeira tentativa de incorporar resíduos de vidro no concreto ocorreu na década de 1960, mas falhou. Constatou-se que o concreto sofreu grandes e extensas expansões que levaram a fissuras e fraturas e a consequente perda da segurança estrutural após alguns anos. Isso ocorreu devido à interação entre a sílica nos agregados e a pasta de cimento alcalina. Nos últimos 20 anos e devido regulamentação ambiental, que tributa o despejo de resíduos por peso e tipo, os esforços foram renovados para a produção de concreto incorporando vidro reciclado (CASTRO E BRITO, 2013). Como consequência dos maiores custos de despejo, do aumento do número de novas construções e demolições e do baixo custo de aquisição de resíduos, a viabilidade de concretos e argamassas onde os agregados de vidro são usados para substituir os agregados naturais ou cimento, está sendo discutido novamente.

## **2.6 Exposição dos trabalhos experimentais**

Várias pesquisas foram consultadas para essa revisão bibliográfica, nas quais o vidro reciclado triturado foi utilizado como substituto de constituintes em concretos.

### **2.6.1 Trabalho de Ismail e Al-Hashmi (2009)**

Os autores avaliaram, neste estudo, as propriedades dos concretos contendo resíduos de vidro moído como agregado miúdo, onde foi utilizada como substituição parcial da areia a 10%, 15% e 20% na produção de concreto com fator a/c igual a 0,53. O concreto controle, sem substituição, também foi produzido.

A Tabela 3 mostra os resultados do ensaio de abatimento feito no concreto fresco, indicando diminuição na consistência com o aumento do teor de vidro residual. Apesar desse declínio no abatimento dessas misturas, elas apresentam boa trabalhabilidade. Um estudo de Park, Lee e Kim (2004) também mostrou resultados dos ensaios de abatimento no concreto fresco, onde ambos os fatores de abatimento e compactação, são diminuídos devido à forma angular do grão.

O teor de ar é aumentado devido ao envolvimento de numerosas partículas de tamanho pequeno que são encontradas nos resíduos de vidro. A porcentagem ideal de resíduos de vidro foi de 20%, sendo a que fornece os valores máximos de resistência à compressão e à flexão. Registrando valores de 4,23% e de 11,20% acima do medido no concreto controle, para a resistência à compressão e para a resistência à flexão, respectivamente, aos 28 dias.

Notou-se que com o uso de resíduos de vidro como substituto parcial do agregado miúdo não se produziu nenhuma alteração notável na cor do concreto. O efeito pozolânico dos resíduos de vidro no concreto foi mais evidente na idade posterior aos 28 dias. Os resultados dos testes indicaram que a substituição parcial de areia por vidro residual reduz a expansão da reação álcali-sílica.

Tabela 3 - Abatimento dos concretos ensaiados

Taxas de substituição de vidro (%)	0	10	15	20
Abatimento máximo medido (mm)	75	57,5	52,5	50

Fonte: Adaptada de Ismail e Al-Hashmi (2009)

### **2.6.2 Trabalho de Righi, Köhler, Tabarelli, Kirchhoff e Lima (2011)**

Nesta pesquisa, os autores estudaram a substituição da areia utilizada na produção de concreto por sucata de vidro moído, proveniente da moagem de garrafas “long neck” de vidro. Contemplou ainda a avaliação do comportamento dos concretos produzidos em altas temperaturas, simulando a exposição a um incêndio. Além dos ensaios de resistência à compressão simples à temperatura de serviço, também se analisou o seu comportamento à 600°C. Foram moldados corpos de prova cilíndricos de 10 cm por 20 cm, para as substituições parciais de 0%, 10, 15, 20 e 100 % da

quantidade de areia por vidro moído, os quais foram submetidos à ensaios aos 63 dias de idade e adotando uma relação a/c igual a 0,45.

Na Figura 2, os resultados revelaram que as diferentes taxas de substituição do agregado natural (areia) por agregado de vidro reciclado não alteraram significativamente a resistência à compressão. Sendo possível afirmar que o teor de substituição mais adequado nesta pesquisa foi de 20%, pois atingiu um patamar de resistência equivalente ao concreto sem substituição.

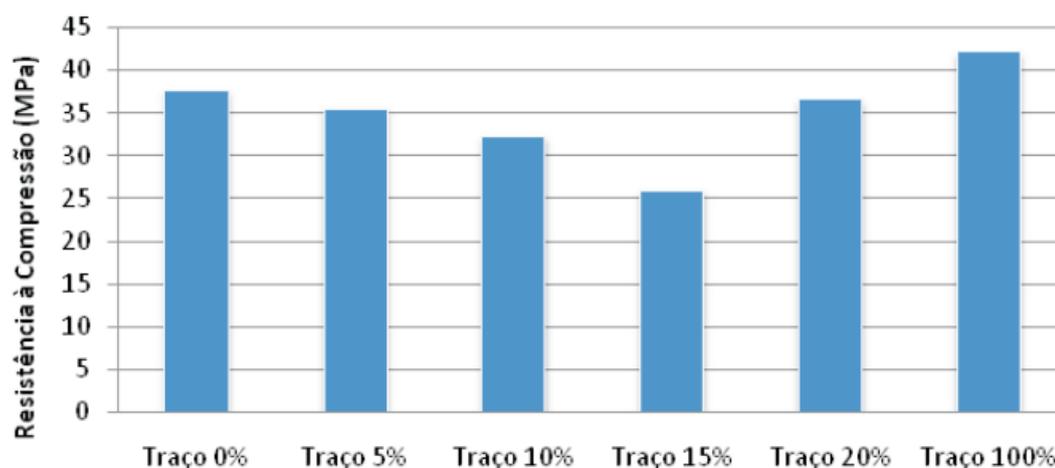


Figura 2 - Valores da resistência à compressão das misturas estudadas por Righi et al. (2011).  
Fonte: Righi et al. (2011)

No caso da substituição de 100% da areia por vidro, apesar de atingir uma resistência superior à do concreto referência, a trabalhabilidade foi altamente prejudicada, inviabilizando a moldagem manual dos corpos de prova.

### 2.6.3 Trabalho de Sharifi, Houshiar e Aghebati (2013)

Sharifi, Houshiar e Aghebati investigaram neste trabalho o efeito da substituição do agregado miúdo por resíduos de vidro em seis diferentes proporções de peso, variando de 0% a 50%, nas propriedades do concreto autoadensável. Os resultados indicaram que as características de fluidez foram aumentadas à medida que o vidro residual foi incorporado ao volume da pasta. As resistências à compressão, à flexão e à tração dos CAA-RV foram diminuídas, mas a diminuição foi insignificante. A redução da resistência do concreto em diferentes proporções de

substituição do vidro não é notável, portanto, pode-se produzir CAA com resíduo de vidro como agregado miúdo de maneira padronizada.

#### **2.6.4 Trabalho de Camarate (2016)**

Analizou o autor, em sua dissertação, a influência do processo de amassamento nas características do agregado reciclado de vidro. Para verificar as alterações no desempenho mecânico provocadas pela betoneira, comparativamente com a mistura manual, foram fabricados concretos com uma taxa de substituição, em volume, de 25 % e 50 % do agregado natural britado pelo agregado reciclado de vidro. Concluiu que apesar de verificar uma alteração na granulometria do agregado reciclado de vidro quando avaliado o seu desgaste numa betoneira, esta alteração não influencia significativamente as propriedades dos concretos ensaiados.

Apesar do seu elevado desgaste no ensaio de Los Angeles, os agregados reciclados de vidro podem ser aplicados em concretos com cimento Portland. No que se refere à trabalhabilidade, verificou uma tendência negativa quando substituiu o agregado natural britado pelo reciclado de vidro, provavelmente devido à forma das partículas de vidro que obrigam a um aumento da relação a/c para a mesma trabalhabilidade. A massa específica do concreto sofreu um decréscimo, já esperado, devido à diferença entre as densidades do agregado reciclado de vidro e do agregado natural britado. Os valores da resistência à compressão aos 28 dias sofrem um decréscimo com o aumento da incorporação de agregado reciclado de vidro.

No entanto, para as dosagens realizadas na betoneira, quando a idade de cura é inferior a 7 dias, a resistência inverte essa tendência, não tendo sido possível deduzir uma justificativa para esta diferença. Os concretos misturados manualmente com agregados reciclados de vidro apresentaram maiores ganhos de resistência à compressão mais tardiamente, aos 7 e 28 dias, pois, aos 2 dias, a resistência foi bem mais baixa comparando a dos concretos misturados mecanicamente. Considerou que a menor resistência dos concretos misturados em betoneira deve-se à menor aderência dos agregados reciclados de vidro à pasta de cimento.

O ensaio de ultrassons permitiu avaliar a uniformidade do concreto para além da zona superficial, confirmando as expectativas relacionadas a resistência à compressão e a porosidade. Embora o ensaio de esclerometria só permita avaliar a

resistência superficial dos corpos de prova dos concretos, ainda assim, os resultados do ensaio apresentaram, em geral, uma correlação aceitável com os da resistência à compressão.

### **2.6.5 Trabalho de Gautam, Srivastava e Agarwal (2012)**

Nesta pesquisa foi estudada a influência da utilização de resíduos de vidro como substituto do agregado miúdo em concreto. Para esse propósito, produziram concretos com taxas de substituição de 10, 20, 30, 40 e 50 % de resíduo vítreo, além do concreto referência, sem substituição. A relação a/c adotada nas diferentes composições foi igual a 0,50. Os referidos concretos foram ensaiados aos 7 e 28 dias de idade para a resistência à compressão.

No estudo, observaram que quando o agregado miúdo é substituído por 10% de resíduo de vidro, a resistência à compressão em 7 dias de idade aumenta cerca de 47,75% em média. No entanto, no mesmo nível de substituição, o ensaio de resistência à compressão revela um incremento na resistência de apenas 3,30%, aos 28 dias. Já na substituição do agregado miúdo por 20% de resíduo de vidro, mostrou um aumento da resistência à compressão em 13,64%, em 7 dias. Porém, em 28 dias, revelou um aumento na resistência à compressão de apenas 2,18%. Foi visto nas substituições de agregado miúdo em 30 e 40% por vidro, um aumento na resistência à compressão entorno de 11,32%, em 7 dias. Enquanto que aos 28 dias de idade, a resistência à compressão não apresentou alteração substancial. Assim, no final do estudo, afirmam que o resíduo de vidro pode ser usado como substituição do agregado miúdo até uma taxa de substituição de 40% e que a ideal é de 10%.

### **2.6.6 Trabalho de Malik, Bashir, Ahmad, Tariq e Chowdhary (2013)**

Neste trabalho, os autores estudaram o comportamento de concretos envolvendo o uso de resíduos de vidro como substituição parcial de agregados miúdos. O vidro foi pulverizado em aparelho de abrasão Los Angeles, depois peneirado na malha 1,18 mm e misturado à areia manualmente. Para esse estudo, produziram concretos com taxas de substituição de 10%, 20%, 30% e 40% em massa

para a mistura, além do concreto de referência, sem substituição. Para as diferentes composições foi adotada a relação a/c igual a 0,45. Os referidos concretos foram ensaiados quanto a resistência à compressão aos 7 e 28 dias de idade. Os ensaios de abatimento mostraram valores relativamente baixos, aumentando com o aumento do teor de resíduos de vidro, como mostra a Tabela 4. As partículas de resíduos de vidro absorveram menos água em comparação com a areia e, assim, melhoraram a trabalhabilidade da mistura de concreto. O abatimento máximo medido foi de 50 mm para a mistura de concreto contendo 40% de resíduo de vidro no lugar de agregados miúdos.

Tabela 4 - Abatimentos máximos medidos para diferentes substituições

Taxas de substituição (%)	Abatimento medido (mm)
0	25
10	29
20	34
30	40
40	50

Fonte: Valores de abatimento das composições estudadas por de Malik et al. (2013)

Observaram que com a taxa de 20% de substituição do agregado miúdo por pó de vidro residual a resistência à compressão aumentou, 15 e 25% aos 7 e 28 dias, respectivamente. Os resultados concluíram que se pode utilizar pó de vidro como substituição parcial dos agregados naturais miúdos em até 30 % em massa, desde que a dimensão máxima do vidro residual seja de até 1,18 mm e que no final, o concreto terá uma massa específica média mais baixa do que a do concreto convencional.

### **2.6.7 Trabalho de Harrison, Berenjian e Seifan (2020)**

Nesta análise, os autores exploraram as possibilidades de incorporar resíduos de vidro em materiais à base de cimento. Descobriram que o vidro residual é inadequado como substituto de matéria prima para a produção de clínquer, devido a fase líquida que se forma no forno e como agregado graúdo, devido à superfície lisa.

Resultados promissores foram encontrados ao incorporar partículas finas de vidro em materiais à base de cimento devido à reação pozolânica favorável que beneficia as propriedades mecânicas. Verificaram que 20% do cimento pode ser substituído por resíduos de vidro com dimensão máxima de 20 µm sem causar efeitos prejudiciais às propriedades mecânicas. Substituições superiores a 30% podem causar impactos negativos, pois as quantidades de CaCO<sub>3</sub> que permanecem, são insuficientes para reagir com a sílica do vidro. Este efeito é conhecido como efeito de diluição. No estudo, ainda afirmam que a medida que aumenta em mais de 20% a substituição do agregado miúdo por resíduos de vidro, as propriedades mecânicas diminuem proporcionalmente, no entanto, até 20% tem resultados semelhantes às misturas tradicionais.

### 2.6.8 Trabalho de Tamanna, Tuladhar e Sivakugan (2020)

Tamanna, Tuladhar e Sivakugan avaliaram, nesse estudo, o desempenho da areia de vidro reciclado como substituição parcial da areia no concreto. Produziram concretos substituindo a areia natural de rio por 20%, 40% e 60% de areia de vidro reciclado, além do concreto controle, sem substituição. Neste estudo, foi utilizado vidro sodo-cálcico de cores mistas, coletado pelo Conselho Regional de Cairns, Austrália. Realizaram experimentos no concreto fresco e endurecido aos 7, 28 e 56 dias de idade. Para as diferentes composições foi adotada a relação a/c igual a 0,53. Conforme mostra a Tabela 5, o concreto controle apresentou abatimento de 90 mm, que estava na faixa de abatimento desejado de 80 a 100 mm.

Tabela 5 - Abatimento e densidade dos concretos ensaiados

Taxas de substituição (%)	Abatimento medido (mm)	Densidade do concreto fresco (kg/m <sup>3</sup> )	Densidade do concreto endurecido (kg/m <sup>3</sup> )		
			7 dias	28 dias	56 dias
0	90	2394	2406	2399	2396
20	60	2377	2387	2372	2378
40	65	2365	2361	2369	2382
60	40	2350	2358	2356	2361

Fonte: Valores de abatimento e densidade das substituições estudadas por Tamanna, Tuladhar, Sivakugan (2020)

No entanto, a trabalhabilidade diminuiu significativamente com o aumento da quantidade de vidro residual. Esta tendência decrescente estava de acordo com o estudo de Adaway e Wang (2015). Os resultados mostraram que a adição de resíduo de vidro teve uma diminuição significativa na trabalhabilidade devido às bordas angulares e textura áspera da areia de vidro. Padrão semelhante de diminuição foi observado por Tan e Du (2013) na fluidez da argamassa.

Ainda na tabela 5, percebe-se que a densidade do concreto fresco e do endurecido com areia de vidro foi muito semelhante à do concreto controle. O valor de densidade ligeiramente reduzido nos concretos com areia de vidro reciclado pode ser devido à menor massa específica do resíduo de vidro de  $2,42 \text{ t/m}^3$ , em comparação com a areia utilizada no estudo, igual a  $2,62 \text{ t/m}^3$ .

Os testes de resistência à compressão dos concretos com as várias taxas de substituição foram realizados e comparados com o concreto controle, sem substituição de areia de vidro. O concreto com 20% de ARV ganhou resistência à compressão de 34,2 MPa aos 7 dias, que foi 5,8% maior que o controle, que foi caracterizada em 32 Mpa aos 28 dias. À medida que o nível de substituição aumentou, a resistência diminuiu ligeiramente. Todas as misturas de concreto atingiram a resistência característica de 32 MPa aos 28 dias. O concreto controle ganhou uma resistência média de 38,75 MPa aos 28 dias. O concreto com 20% de ARV obteve a maior resistência, 41,40 Mpa, que foi 7% maior que o concreto controle aos 28 dias. As outras duas substituições de agregados miúdos, 40% de ARV e 60% de ARV, mostraram um desempenho favorável, atingindo 86% e 96% da resistência do concreto controle, respectivamente.

O aumento da resistência dos concretos para as substituições do agregado miúdo por vidro foi atribuído à natureza angular da ARV, desfavorecendo o concreto controle com areia de superfície naturalmente arredondada, o que também foi comprovado por outras pesquisas (ADAWAY E WANG, 2015).

Além disso, foi observada que a evolução da resistência do concreto depende da ligação entre a matriz de cimento e a areia de vidro, que é governada pelo desenvolvimento da zona de transição interfacial. O concreto controle atingiu 43,22 MPa de resistência, correspondendo a 34% de melhora aos 56 dias. O concreto com 20% de ARV alcançou a maior resistência à compressão aos 56 dias, atingindo 1% acima do concreto controle. Ficou evidente que a quantidade de ARV teve um impacto

ligeiramente negativo em sua resistência à medida que a quantidade de areia de vidro aumentou.

O aumento da quantidade de areia de vidro enfraquece a ligação mecânica dentro da microestrutura do concreto, levando a uma diminuição na resistência da zona de transição interfacial. Os concretos com 40% de ARV e com 60% de ARV, aos 56 dias, atingiram resistências de 92% e 89% respectivamente, em relação ao concreto controle. Mostrando que evolução da resistência à compressão tem um aumento mais lento aos 56 dias em comparação aos 28 dias. O concreto com 40% de ARV foi o que mais cresceu, 31%, seguido em 28% pelo concreto com 20% de ARV e 24% pela substituição de 60% de ARV.

Os ensaios de resistência à flexão e de resistência à tração indireta foram realizados no concreto controle e nos concretos com substituição, aos 28 dias. Não revelando diferença significativa na resistência à flexão e à tração para a adição de areia de vidro em comparação com o concreto de controle. Os resultados de resistência tenderam a aumentar com o aumento da quantidade de areia de vidro. O tamanho angular da areia de vidro pode estar associado a um melhor intertravamento entre o cimento e a areia de vidro. No entanto, uma diminuição na resistência à flexão e à tração foi encontrada para 40% de ARV e para 60% de ARV, respectivamente. A redução da resistência à tração do concreto com maior percentual de substituição, 60% de ARV, está alinhada com a redução registrada da resistência à compressão para a mesma taxa de substituição.

Para testar a durabilidade dos concretos produzidos foram feitos testes rápidos de penetração de cloreto, de acordo com a norma ASTM C1202, onde o concreto com 60% de ARV apresentou maior resistência à penetração de íons cloreto e assumindo o concreto menos permeável. A adição de vidro reciclado como substituto da areia natural também não foi prejudicial à reação álcali-sílica. Os testes nos corpos de prova apresentaram expansão inferior a 0,10% aos 21 dias, o que é classificado como não reativo, baseado na norma AS 1141.60.1. O maior valor de expansão de cerca de 0,086% foi observado para as amostras controle aos 21 dias. Além disso, o uso de ARV em substituição à areia natural reduz a reação álcali-sílica devido à reação pozolânica entre partículas de vidro mais finas e álcalis da hidratação do cimento. Os resultados mostram que o vidro triturado reciclado pode ser usado para substituir até 60% de areia no concreto.

### 2.6.9 Trabalho de Oliveira, Gomes e Santos (2008)

Os autores apresentaram um estudo experimental onde exploraram a viabilidade de utilizar vidro colorido na composição de concretos estruturais. Para isso, realizaram um concreto de referência e outras misturas com a substituição da areia natural por areia de vidro nas seguintes proporções: 25%, 50% e 100%. Para a avaliação do desempenho das misturas, com diferentes teores de substituição da areia natural por areia de vidro, foram determinadas as resistências à compressão dos concretos nas idades de 7, 28 dias. A Tabela 6 apresenta a caracterização dos agregados estudados.

Tabela 6 - Caracterização dos agregados estudados

Agregados	Areia (D <sub>máx</sub> = 4,75 mm)	Brita (D <sub>máx</sub> = 12,7 mm)	Vidro (D <sub>máx</sub> = 4,76 mm)
Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	2520	2700	2510
Massa Unitária (kg/m <sup>3</sup> )	s.d.	s.d.	s.d.
Módulo de finura	3,47	s.d.	2,40

Fonte: Características dos agregados estudados por Oliveira, Gomes e Santos (2008)

Para o estudo, uma mistura de referência foi produzida com as seguintes proporções em massa: 1 : 0,29 : 1,87 : 3,14 (cimento : cinza volante : agregado miúdo : agregado graúdo), com uma relação a/c de 0,60. Na Tabela 7 são apresentadas as quantidades dos constituintes utilizados nos diversos concretos ensaiados.

Tabela 7 - Composição das misturas utilizadas neste estudo

Taxa de Substituição	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Cinza Volante (kg/m <sup>3</sup> )	Brita (kg/m <sup>3</sup> )	Vidro (kg/m <sup>3</sup> )	Areia (kg/m <sup>3</sup> )	Água (kg/m <sup>3</sup> )
0% de ARV	350	101,5	1099	0	654,5	210
25% de ARV	350	101,5	1099	163,6	490,8	210
50% de ARV	350	101,5	1099	327,25	327,25	210
100% de ARV	350	101,5	1099	654,5	0	210

Fonte: Composição das misturas estudadas por Oliveira, Gomes & Santos (2008)

Na Figura 3 estão representados os resultados dos ensaios de resistência à compressão. Observaram que a resistência à compressão aumentou com o acréscimo da areia de vidro no concreto. Nas taxas de 25%, 50% e 100 % a resistência à

compressão cresceu na ordem dos 26%, 26% e 34 % respectivamente, aos 7 dias. Já aos 28 dias o aumento foi de 24%, 25% e 29 %. Estes resultados são contrários aos obtidos por Park, Lee e Kim (2004) e por Topçu e Canbaz (2004) em seus estudos. Em geral, a resistência à compressão de concretos contendo agregados de vidro são inferiores aos que utilizam agregados naturais. As resistências são particularmente mais baixas quando se utilizam cimentos com alto percentual de álcalis.

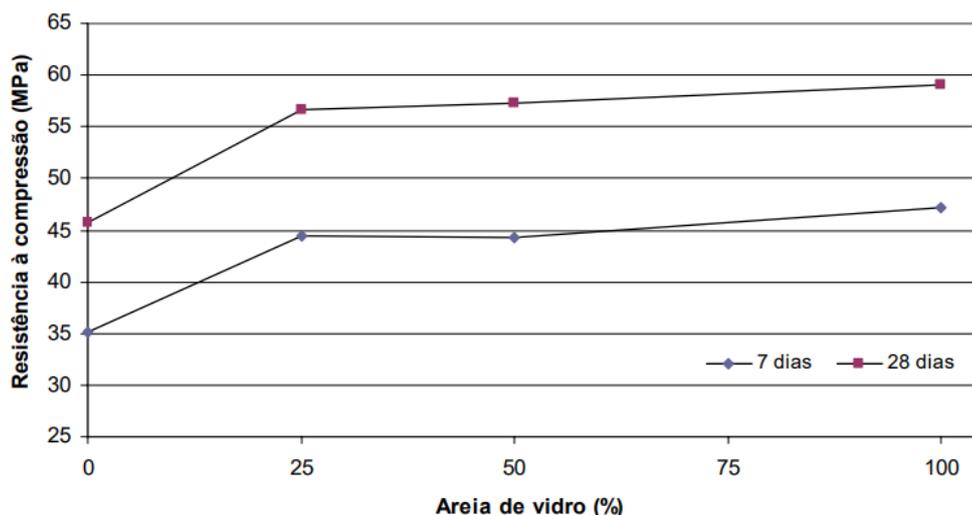


Figura 3 - Valores da resistência à compressão das misturas estudadas por Oliveira, Gomes e Santos (2008). Fonte: Oliveira, Gomes & Santos (2008)

Este aparente desacordo é provavelmente causado pelo uso de cinza volante em cerca de 30%, que demonstrou efetivo controle, mitigando as reações expansivas e evitando um decréscimo das resistências. Porém, a parte mais fina do agregado de vidro pode ter agido como material reativo e ainda melhorar o empacotamento granular. O abatimento do concreto fresco só foi mantido entre 90 mm e 110 mm, devido à forma lamelar das partículas de vidro e da adição de um adjuvante redutor de água para manter a relação água/cimento. Os concretos com areia de resíduos de vidro apresentaram coeficientes de capilaridade inferior ou similar ao valor da mistura de referência. Com todos os resultados dos ensaios realizados, os autores afirmam que, o agregado reciclado com resíduos de vidro colorido pode ser um substituto satisfatório das areias naturais e que isso traz benefícios tanto econômicos como ambientais à sociedade.

### 2.6.10 Trabalho de López, Azevedo e Barbosa Neto (2005)

López, Azevedo e Barbosa Neto estudaram a viabilidade técnica da utilização de vidro não reciclado como material agregado ao concreto, especificamente pela comparação das propriedades mecânicas de concretos fabricados com o novo componente. Produzindo primeiramente concretos com a substituição da areia por vidro moído e, numa segunda parte, pela adição do vidro moído sobre a massa de areia. O concreto sem adição de vidro foi tomado como referência para efeitos de comparação.

Na primeira etapa foi determinada uma faixa granulométrica para o vidro com a qual obtivesse maior resistência à compressão. Substituindo 5% do agregado miúdo (a areia) por vidro moído nas seguintes faixas granulométricas, 0 a 0,15 mm, 0,15 a 0,30 mm e 0,30 a 0,60 mm. O vidro utilizado nos ensaios foi proveniente do lixo da cidade de Canoas/RS e constituía-se de 100% do tipo soda-cal, com uma massa específica de 2,50 g/cm<sup>3</sup>. A areia tinha módulo de finura 2,3 e massa específica de 2,78 g/cm<sup>3</sup> e a pedra britada de origem basáltica apresentou uma distribuição granulométrica de números 1 e 2. O cimento utilizado foi o CP IV-32 da marca VOTORAN. A relação água/cimento utilizada foi de 0,83. Os valores da resistência média à compressão obtidos dos corpos de prova com a substituição da areia por vidro moído, na proporção de 5% em massa, estão representados na Figura 4. Onde mostrou um aumento da tensão média de ruptura com o aumento da granulometria até atingir a faixa de 0,15 a 0,30 mm, após esta faixa, a tensão de ruptura diminuiu novamente, porém, mantendo-se superior ao do corpo de prova de referência.

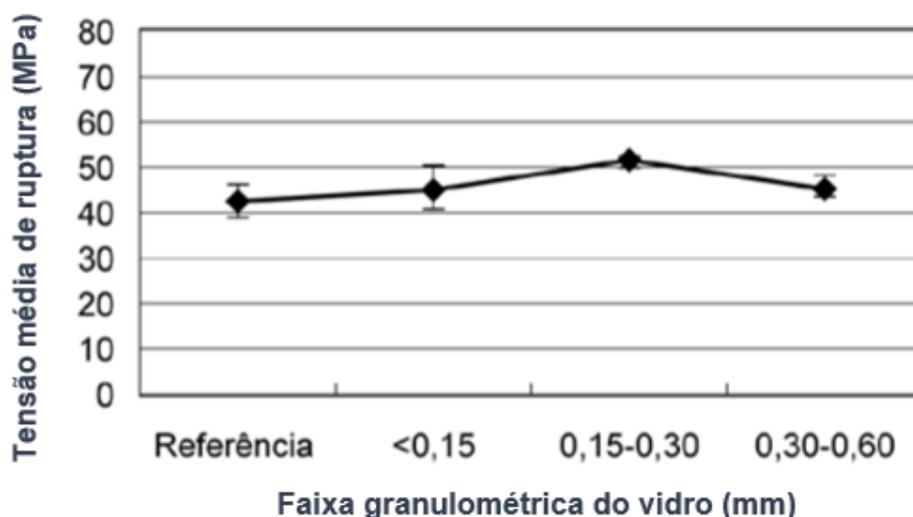


Figura 4 - Valores da tensão média de ruptura das faixas granulométricas estudadas por López, Azevedo e Barbosa Neto (2005). Fonte: López, Azevedo e Barbosa Neto (2005)

Segundo os autores, este aumento de tensão de ruptura na faixa granulométrica de 0,15 a 0,30 mm, pode estar associado ao preenchimento de vazios pelo vidro fino, melhorando o empacotamento da mistura e fazendo com que a interação química entre o vidro e o cimento aumente a resistente à compressão deste material, conforme já estudado por Shao et al. (2000). E quanto a diminuição da tensão na faixa granulométrica de 0,30 a 0,60 mm se explicaria pelo fato que o vidro já apresenta as características granulométricas da areia utilizada neste ensaio.

A Tabela 8 mostra uma relação inversamente proporcional entre a absorção de água, porosidade das amostras e o aumento da granulometria do vidro até a faixa de 0,15 a 0,30 mm. A diminuição da absorção se deve à diminuição da porosidade, indicando que o vidro preenche os interstícios formados pela areia e fechamento dos poros. Com o uso da faixa mais grosseira de 0,30 a 0,60 mm, o preenchimento dos poros diminui, o que se reflete num aumento da porosidade do concreto, e conseqüentemente, da absorção de água. Uma vez que o concreto obtido com o uso de vidro apresenta um índice de vazios menor, sua massa específica aumenta.

Tabela 8 - Efeito da substituição em 5%, em massa, da areia por vidro moído sobre a absorção de água, índice de vazios e massa específica seca do concreto

Faixa granulométrica do vidro	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )
Concreto Referência	11,35	23,10	2,03
< 0,15 mm	11,32	22,90	2,15
0,15 mm – 0,30 mm	8,93	19,44	2,35
0,30 mm – 0,60 mm	9,29	20,13	2,29

Fonte: Resultados dos ensaios estudados por López, Azevedo e Barbosa Neto (2005)

Os resultados obtidos nos ensaios de abatimento (Slump Test) estão na Tabela 9, onde mostra que o uso de vidro com faixa granulométrica entre 0,15 e 0,30 mm produziu um concreto com menor abatimento e, por conseguinte, obteve maior ganho na resistência mecânica nos ensaios de compressão uniaxial.

A diminuição do abatimento do concreto, com o vidro de granulometria de 0,15 a 0,30 mm, indica, por sua vez, que houve um aumento da consistência do concreto o que diminui a sua trabalhabilidade.

Tabela 9 - Resultados da substituição em 5%, em massa, da areia por vidro moído sobre o abatimento do concreto fresco

Corpos de prova	Abatimento (mm)
Sem adição de vidro moído	40
Com substituição de 5% na faixa < 0,15 mm	30
Com substituição de 5% na faixa de 0,15 mm a 0,30 mm	20
Com substituição de 5% na faixa de 0,30 mm a 0,60 mm	30

Fonte: Resultados dos ensaios estudados por López, Azevedo e Barbosa Neto (2005)

Com a faixa granulométrica de 0,15 a 0,30 mm definida como a que obteve a tensão de ruptura mais elevada, foram realizados ensaios aumentando a porcentagem de vidro moído substituindo a areia. A Figura 5 mostra os resultados obtidos destes ensaios.

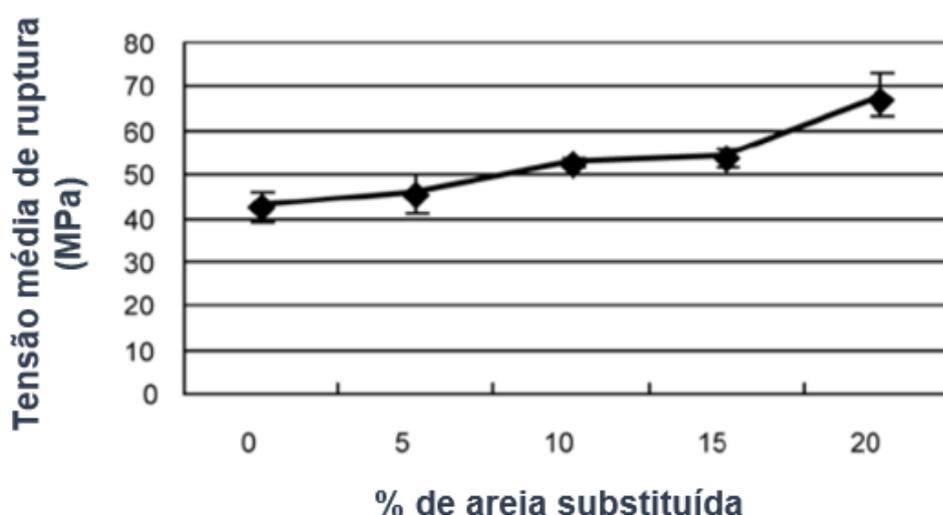


Figura 5 - Valores da resistência à compressão do concreto resultantes da substituição de areia por vidro com granulometria de 0,15 mm a 0,30 mm estudados por López, Azevedo e Barbosa Neto (2005). Fonte: López, Azevedo e Barbosa Neto (2005)

Os resultados revelam um aumento progressivo da resistência à compressão com o aumento do teor de vidro no concreto, sendo que o aumento da tensão média para o concreto, com 20% de substituição, foi de 57% sobre a resistência do material de referência.

Conforme os autores, este aumento está associado a vários fatores, sendo um deles a maior quantidade de vidro na granulometria de 0,15 a 0,30 mm substituída pela areia, estaria fazendo com que a areia utilizada se aproximasse da sua curva granulométrica ideal, de forma que o agregado fino existente teria quantidades suficientes de partículas finas para preencher completamente os vazios entre as

partículas mais grosseiras. É sabido que com uma maior quantidade de finos, aumenta também a superfície específica dos agregados a serem hidratados, provocando uma redução do fator água/cimento, com o conseqüente aumento da tensão média de ruptura.

A Tabela 10 apresenta dados que sustentam estas considerações. Onde prova que o aumento da massa de vidro fino no concreto causa uma diminuição de 32% na absorção de água, de 26% no índice de vazios e um aumento de 26% na massa específica do concreto produzido. A diminuição do índice de vazios demonstra que o concreto está se tornando menos poroso em função da diminuição da relação água/cimento. Conseqüentemente, a diminuição da relação a/c leva ao aumento da resistência do concreto.

Tabela 10 - Resultados da substituição de areia por vidro com granulometria de 0,15 mm a 0,30 mm sobre a absorção de água, índice de vazios e massa específica seca do concreto

% de areia substituída	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )
Concreto Referência	11,35	23,10	2,03
5	11,32	22,90	2,15
10	8,86	19,25	2,37
15	8,80	18,04	2,47
20	7,69	17,10	2,56

Fonte: Resultados dos ensaios estudados por López, Azevedo e Barbosa Neto (2005)

Observa-se na Tabela 11 que o menor abatimento medido foi na mistura contendo 20% de vidro com granulometria de 0,15 mm a 0,30 mm, o qual corrobora o maior ganho na resistência à compressão.

Tabela 11 - Resultados da influência da substituição de areia por vidro na granulometria 0,15-0,30 mm sobre o abatimento do concreto

% de areia substituída	Abatimento (mm)
Concreto Referência	40
5	30
10	20
15	15
20	10

Fonte: Resultados dos ensaios estudados por López, Azevedo e Barbosa Neto (2005)

De acordo com os autores, a diminuição dos valores de abatimento evidencia que uma maior proporção de vidro adicionado acarreta uma diminuição da relação água/cimento utilizada e, conseqüentemente, uma diminuição da trabalhabilidade do concreto produzido. A utilização de agregado fino de vidro reciclado demanda uma quantidade maior de água do que o uso de agregados finos naturais, já que há um aumento de área superficial a ser hidratada em função do aumento de partículas finas dentro do agregado fino.

Os resultados da adição de vidro moído sobre a massa do agregado natural fino (areia) estão representados na Figura 6, onde pode ser observado a evolução da resistência à compressão em função da porcentagem de vidro adicionado sobre a massa da areia.

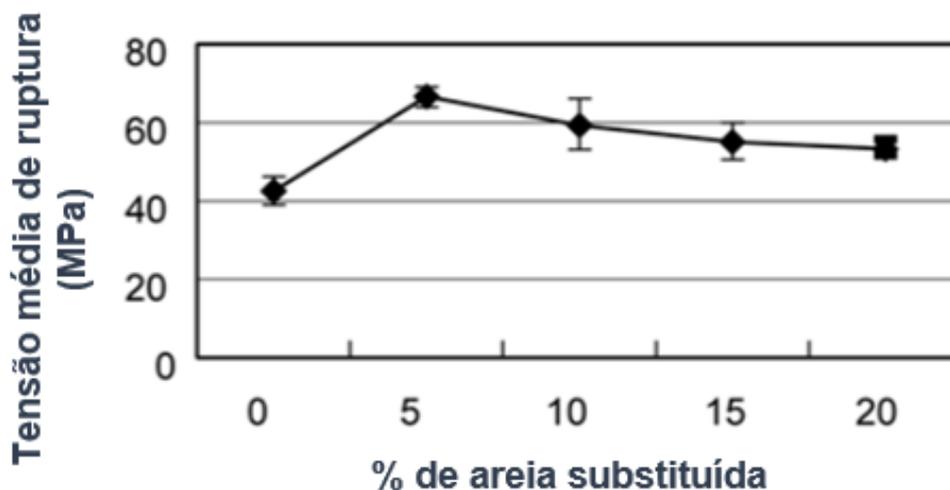


Figura 6 - Valores da resistência à compressão dos concretos resultantes da adição de vidro com granulometria de 0,15 mm a 0,30 mm sobre a massa da areia estudadas por López, Azevedo e Barbosa Neto (2005). Fonte: López, Azevedo e Barbosa Neto (2005)

Os resultados demonstraram que a adição de 5% de vidro moído sobre a massa da areia aumentou a tensão média de ruptura em 56,6% sobre a resistência do material de referência. A partir daí o aumento da porcentagem de vidro acarretou uma redução na tensão média de ruptura, porém, mantendo-se sempre acima da tensão média de ruptura do material de referência.

Pela observação dos autores, o aumento de resistência pode estar associado diretamente ao efeito do preenchimento de vazios, pelo aumento de partículas finas. Entretanto, acima desta porcentagem, o aumento progressivo da massa adicionada teria como efeito uma hidratação insuficiente das partículas sólidas, proporcionando assim o aumento dos vazios da massa e redução da tensão média de ruptura dos

corpos de prova. Tais considerações podem ser comprovadas pelo aumento do índice de absorção de água, do índice de vazios e pela redução da massa específica seca, devido ao aumento da porcentagem de vidro moído adicionada ao concreto, como mostra os resultados na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultados dos ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica seca em função da adição de vidro com granulometria de 0,15 mm a 0,30 mm sobre o teor de areia

% de areia substituída	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )
Concreto Referência	11,35	23,10	2,03
5	7,73	17,24	2,54
10	7,80	17,38	2,53
15	7,89	17,70	2,50
20	8,15	17,92	2,49

Fonte: Resultados dos ensaios estudados por López, Azevedo e Barbosa Neto (2005).

Segundo Su e Chen (2002) a adição de vidro moído sobre a massa de areia, em porcentagens acima de 5%, acarreta a presença de uma quantidade maior de material hidrofóbico fazendo com que a hidratação das partículas seja comprometida, por conseguinte, proporcionando um aumento dos vazios da massa e redução da sua resistência à compressão.

Esta observação é corroborada pelo ensaio de abatimento, Tabela 13, onde com o aumento da adição de vidro acarretou no aumento do abatimento do concreto obtido.

Tabela 13 - Resultados da influência da adição de vidro moído na granulometria 0,15 mm a 0,30 mm à massa de areia sobre o abatimento do concreto

% de areia substituída	Abatimento (mm)
Concreto Referência	40
5	10
10	15
15	15
20	20

Fonte: Resultados dos ensaios estudados por López, Azevedo e Barbosa Neto (2005)

Logo, esta pesquisa demonstra a viabilidade técnica da substituição do agregado miúdo por vidro móido. Entende-se aqui também, que serão necessárias novas pesquisas para a avaliação de todo o potencial da utilização do vidro móido como material agregado ao concreto.

### **3 METODOLOGIA**

Neste trabalho a metodologia aplicada foi a quanti-qualitativa, onde será avaliada a viabilidade técnica da utilização de resíduo de vidro moído na preparação de concretos e assim foram realizados procedimentos e ensaios no decorrer dos experimentos.

Primeiramente, foi realizada a caracterização de todos os materiais utilizados no concreto, onde foi observado que as curvas granulométricas da areia e de resíduo de vidro moído espelhavam similaridade, surgindo assim um novo agregado miúdo, a composição areia com 20% de resíduo de vidro moído. Nova caracterização e análise granulométrica foi realizada, onde resultou em novos parâmetros e o ponto de partida para o experimento. López, Azevedo e Barbosa Neto (2005) e Su e Chen (2002) em suas pesquisas, experimentaram a adição de vidro moído sobre a massa de areia, também.

Para isso, verificou-se, num estudo de literatura preliminar, que a substituição que conferem melhores resultados mecânico e de durabilidade, é de 20% de substituição da areia por resíduo de vidro moído. Afirma Ismail e Al-Hashmi (2009) que a porcentagem ideal de resíduos de vidro é de 20%, onde fornece valores máximos de resistência à compressão e à flexão para a relação  $a/c = 0,53$  e Righi et al. (2011) em seu trabalho, conferiram que é possível adotar 20% de resíduo de vidro em substituição à areia, o concreto atinge um patamar de resistência equivalente ao concreto sem substituição.

A seguir, apresenta-se as etapas experimentais do trabalho.

#### **3.1 Planejamento dos Experimentos**

Os ensaios de laboratório foram conduzidos com a intenção de investigar como influencia no desempenho dos concretos produzidos, a substituição de agregado miúdo por resíduo de vidro moído com distintas relações água/cimento ( $a/c$ ).

Para este planejamento foram consideradas três variáveis distintas com o intento de auxiliar a execução e análise dos ensaios, assim como na parte teórica e

na revisão bibliográfica, que são: variáveis dependentes, variáveis independentes e variáveis de controle conforme mostra a Figura 7.

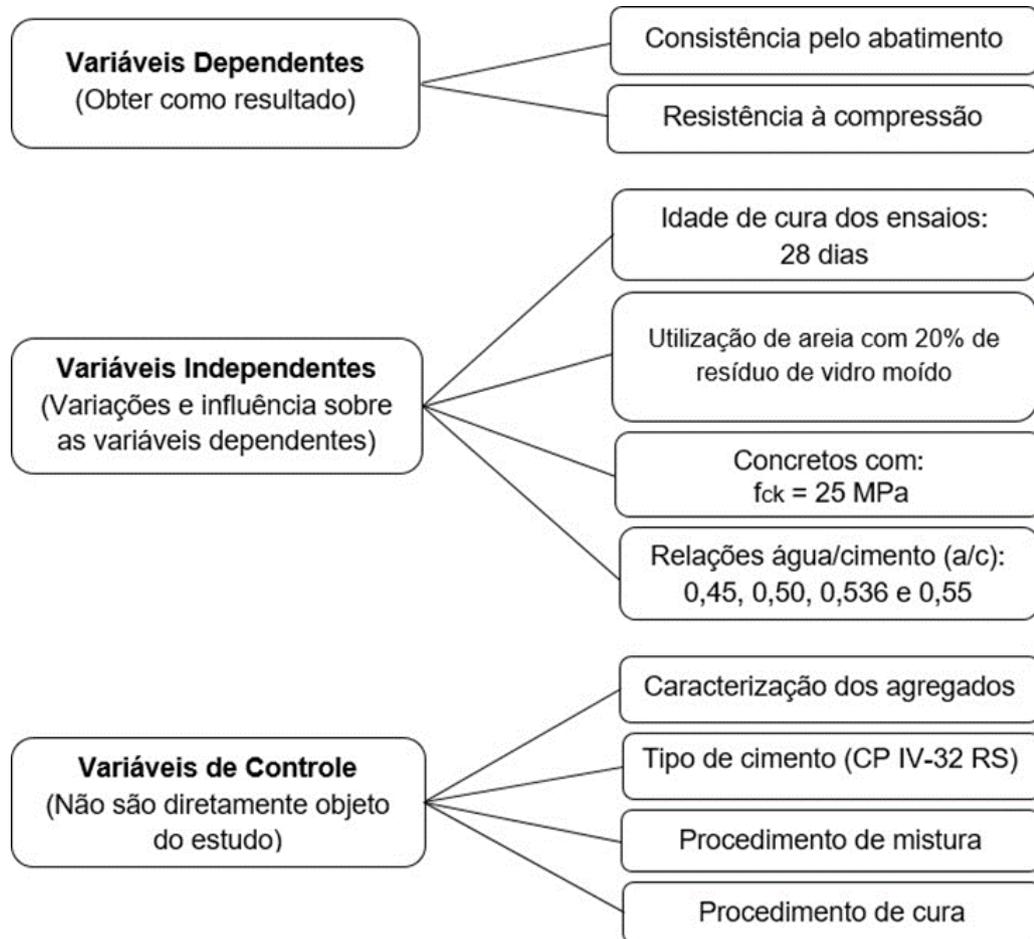


Figura 7 – Organograma das variáveis consideradas na pesquisa. Fonte: produção do autor

### 3.2 Programa Experimental

O esquema mostra os principais procedimentos e ensaios para avaliar a viabilidade técnica da utilização de resíduo de vidro moído na preparação de concretos. Para isso, sete etapas foram percorridas:

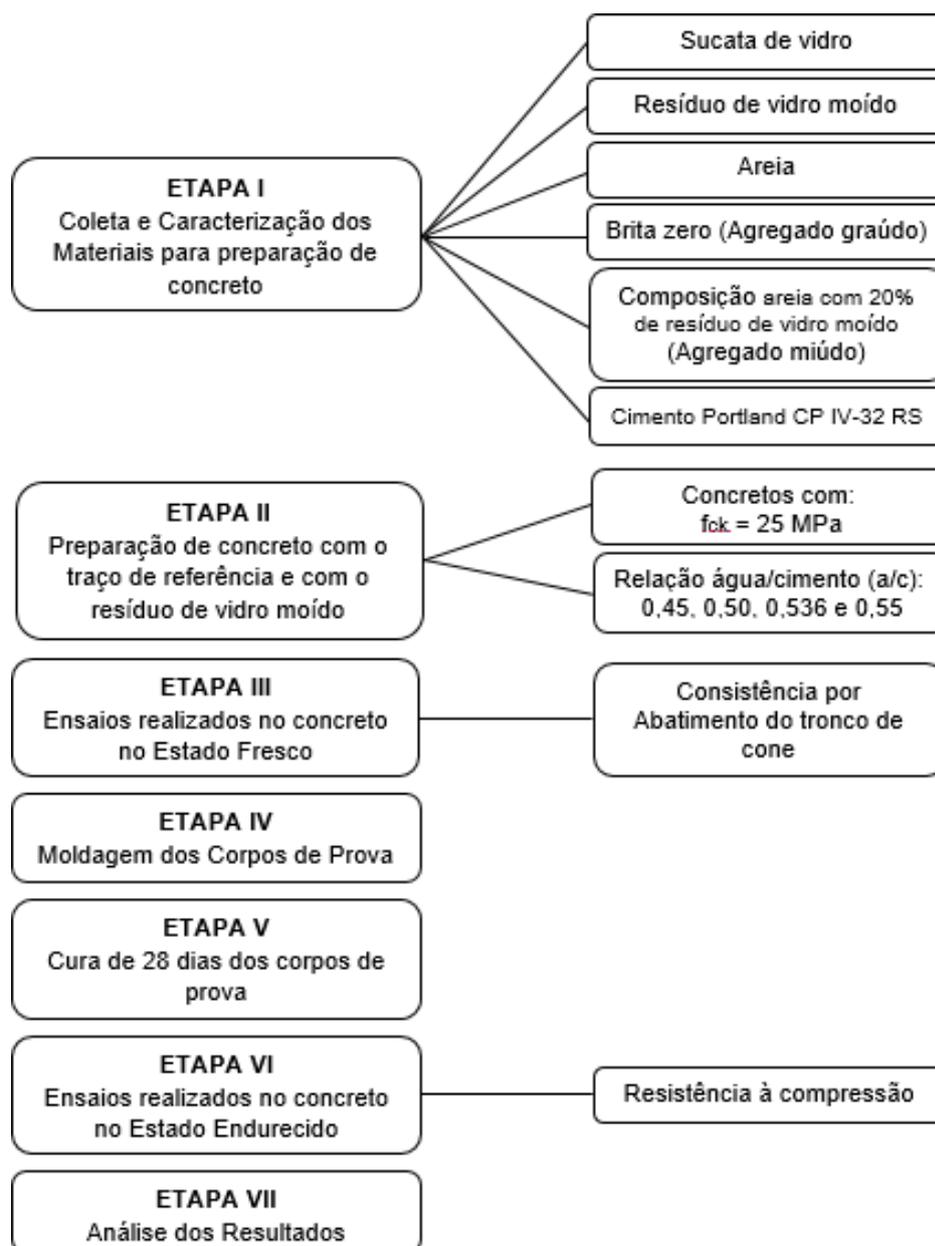


Figura 8 - Organograma do método experimental. Fonte: produção do autor

Assim, primeiramente, foi desenvolvido traços adotando a resistência característica do concreto em 25 MPa e a relação água/cimento igual a 0,50, e outro traço alterando somente a relação água/cimento para 0,536. Dois traços mais foram desenvolvidos adotando a relação água/cimento igual a 0,55 e 0,45, o que resultou na produção de concretos para a moldagem de corpos de prova e, posteriormente, ensaios de compressão axial. Para cada traço foram determinados: o consumo de cimento, água, agregados graúdo e miúdo.

Os materiais utilizados na produção dos concretos foram adquiridos no comércio local, os mesmos empregados nas obras de construção civil da região.

### **3.3 Caracterização dos materiais**

Na caracterização dos agregados (miúdo, graúdo e resíduo de vidro moído) utilizados na fabricação do concreto, de acordo com as normas específicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas, foram realizados ensaios para a determinação da composição granulométrica, dimensão máxima, módulo de finura, massa unitária, massa específica e teor de absorção. Para isso, as amostras dos agregados utilizados nos ensaios foram secas em estufa por 48 horas a uma temperatura de 105°C conforme recomenda a ABNT NM 248:2001 e esfriada à temperatura ambiente por 1 (uma) hora antes dos ensaios de caracterização.

Nos ensaios, os materiais utilizados para o preparo de concretos dos 45 corpos de prova foram: areia natural de jazida, pedra britada de origem granítica, cimento Portland CP IV-32 RS, água fornecida pela concessionária local (Sanep) e sucata de vidro proveniente da coleta seletiva, que foi triturada e cedida pela COOTAFRA - Cooperativa de Trabalho dos Agentes Ambientais do Fraget no bairro Fragata em Pelotas — RS — Brasil.

Os agregados utilizados na preparação dos concretos foram armazenados em baias independentes abrigadas, não sujeitas a intempéries e sujeiras, no interior do curso de Edificações - IFSul campus Pelotas.

Todos os ensaios de caracterização dos agregados e mecânicos foram realizados no Laboratório de Ensaios Tecnológicos do Curso de Edificações — IFSul Campus Pelotas. O levantamento das quantidades dos materiais foi racionalizado para a realização dos ensaios de caracterização e moldagem de corpos de prova.

#### **3.3.1 Areia**

A areia utilizada como agregado miúdo trata-se de uma areia quartzosa proveniente de jazida, classificada de acordo com a norma ABNT NBR 7211:2009.

A Figura 9 ilustra o resultado do peneiramento mecânico com as quantidades retidas em cada peneira. A composição granulométrica da areia, descrita na Tabela 14, está atendendo a ABNT NM 248:2003.

Apresentou módulo de finura igual a 3,54 e dimensão máxima de 4,75 mm. A curva da distribuição granulométrica está ilustrada na Figura 10. Atendendo os procedimentos da ABNT NBR 7251:1982 obteve-se a massa unitária da areia igual a 1,4547 kg/dm<sup>3</sup> e de acordo com os procedimentos da ABNT NBR 9776:1987 a massa específica foi igual a 2,5934 kg/dm<sup>3</sup>.

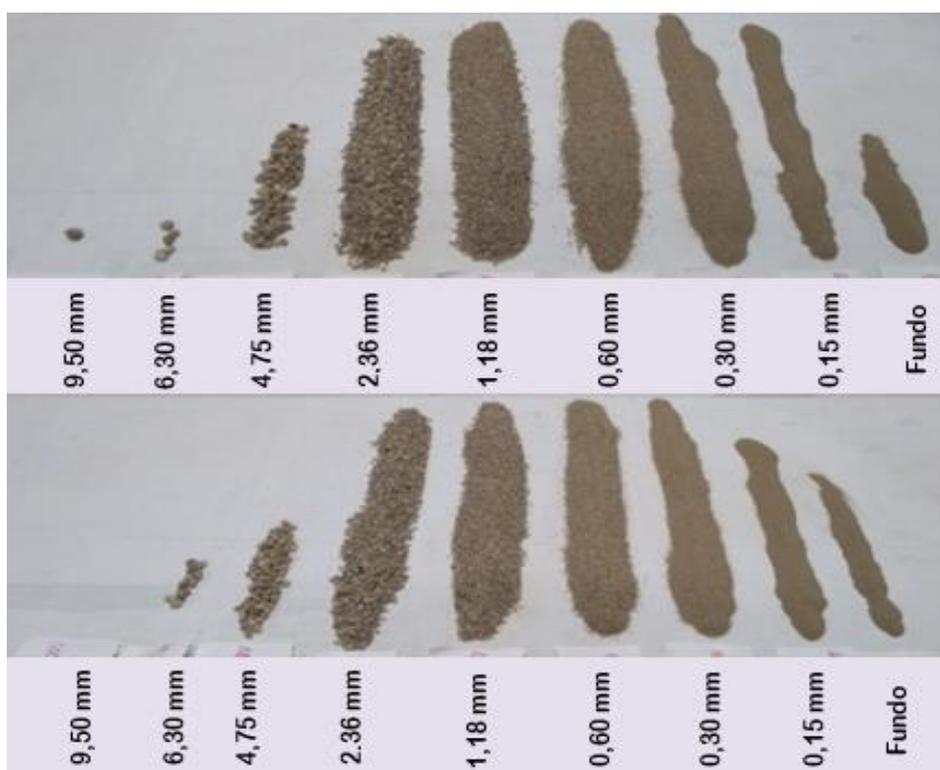


Figura 9 - Composição granulométrica da areia utilizada nos experimentos. Fonte: acervo do autor

Tabela 14 - Composição granulométrica da areia (massa inicial seca das amostras (a) e (b) são iguais a 1000 g)

Abertura das Peneiras (mm)	Massa Retida (g)		Massa Retida (%)		Vr = b - a	M <sub>mm</sub> = (a + b)/2	Massa Retida Acumulada (%)
	Ensaio (a)	Ensaio (b)	Ensaio (a)	Ensaio (b)	Massa Retida (%) Variação = ± 4 %	Massa Retida Média (%)	
9,5	1,27		0,13	0,00	0,13	0,06	0,06
6,3	2,92	6,89	0,29	0,69	-0,40	0,49	0,55
4,75	32,36	31,05	3,24	3,11	0,13	3,17	3,72
2,36	233,14	218,32	23,31	21,83	1,48	22,57	26,30
1,18	293,31	288,7	29,33	28,87	0,46	29,10	55,40
0,6	219,02	226,49	21,90	22,65	-0,75	22,28	77,67
0,3	144,85	153,06	14,49	15,31	-0,82	14,90	92,57
0,15	55,86	57,17	5,59	5,72	-0,13	5,65	98,22
Fundo	17,27	18,32	1,73	1,83	-0,11	1,78	100,00
Total (g) =	1000	1000					

D<sub>máx</sub> (mm) = 4,75                      Módulo Finura = 3,54

Fonte: produção do autor

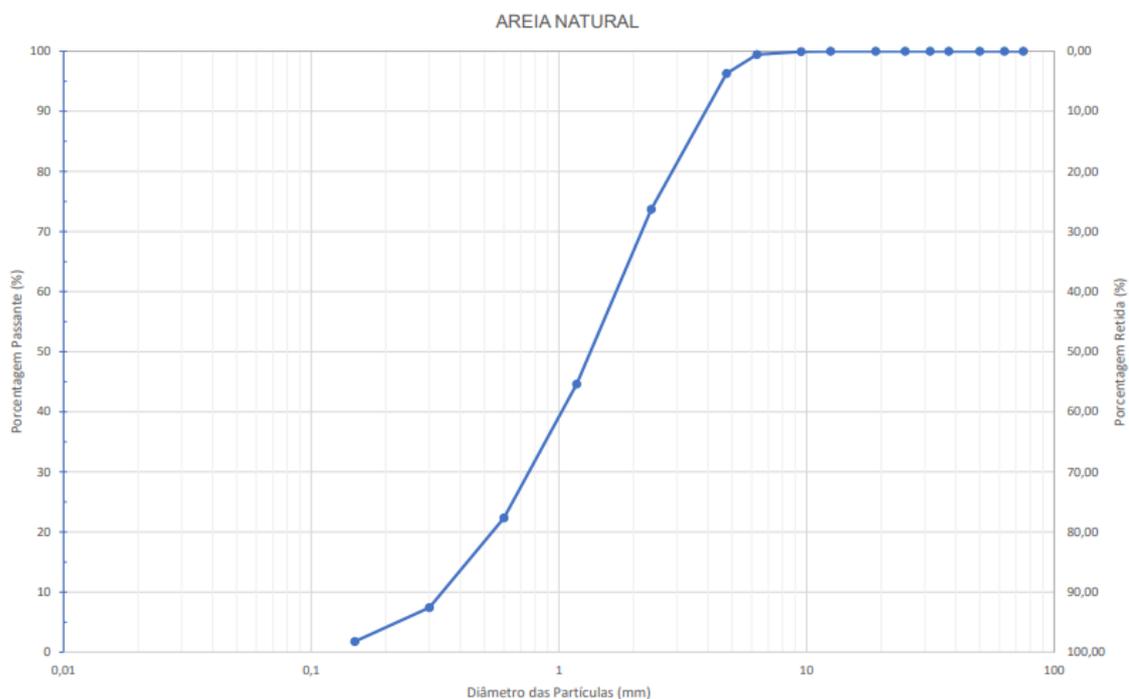


Figura 10 – Distribuição granulométrica da areia. Fonte: acervo do autor

### 3.3.2 Resíduo de vidro moído

As embalagens de vidro utilizadas (Figura 11) não tiveram nenhuma limpeza preliminar, sem distinção de cores, somente as tampas foram extraídas, antes do processo de trituração. Os recipientes foram diversos, como: garrafas, vidros de conservas, de azeite, copos, taças etc.



Figura 11 - Tipos de embalagens de vidro utilizadas na moagem. Fonte: acervo do autor

O equipamento utilizado para a trituração das embalagens de vidro foi um moedor de caliças e resíduos cerâmicos MC-96, (Figura 12), com sistema de mandíbulas e peneiras, da marca SCHREINER.



Figura 12 - Moedor de caliças e resíduos cerâmicos MC-96, com sistema de mandíbulas e peneiras, marca SCHREINER. Fonte: acervo do autor

Os cacos obtidos da trituração, como ilustra a Figura 13, foram peneirados mecanicamente, atendendo a ABNT NM ISO 3310-2:2010. Para isso, foi utilizado peneiras de malha de aço da série normal, através do equipamento vibratório da marca Solotest (Figura 14). O resultado do peneiramento está ilustrado na Figura 15, com as quantidades retidas em cada peneira.



Figura 13 - Resíduo de vidro moído fornecido pela COOTAFRA. Fonte: acervo do autor



Figura 14 - Sistema de peneiramento mecânico Solotest. Fonte: acervo do autor



Figura 15 - Composição granulométrica do resíduo de vidro moído. Fonte: acervo do autor

Atendendo a ABNT NM 248:2003, a composição granulométrica com as porcentagens retida e acumulada em cada peneira, estão representadas na Tabela 15 e na Figura 16, através da curva granulométrica contínua.

Tabela 15 - Composição granulométrica do resíduo de vidro moído (massa inicial seca das amostras (a) e (b) são iguais a 1000 g)

Abertura das Peneiras (mm)	Massa Retida (g)		Massa Retida (%)		Vr = b - a	M <sub>mm</sub> = (a + b)/2	
	Ensaio (a)	Ensaio (b)	Ensaio (a)	Ensaio (b)	Massa Retida (%) Variação = ± 4 %	Massa Retida Média (%)	Massa Retida Acumulada (%)
9,5	5,86		0,59	0,00	0,59	0,29	0,29
6,3	1,38		0,14	0,00	0,14	0,07	0,36
4,75	0,35	0,96	0,04	0,10	-0,06	0,07	0,43
2,36	137,52	187,46	13,79	18,78	-4,99	16,29	16,71
1,18	557,52	511,19	55,90	51,22	4,68	53,56	70,27
0,6	226,9	226,12	22,75	22,66	0,09	22,70	92,98
0,3	65,88	70,31	6,61	7,04	-0,44	6,83	99,80
0,15	1,33	1,39	0,13	0,14	-0,01	0,14	99,94
Fundo	0,6	0,63	0,06	0,06	0,00	0,06	100,00
Total (g) =	997,34	998,06					

D<sub>máx</sub> (mm) = 4,75 Módulo Finura = 3,80  
 Fonte: produção do autor

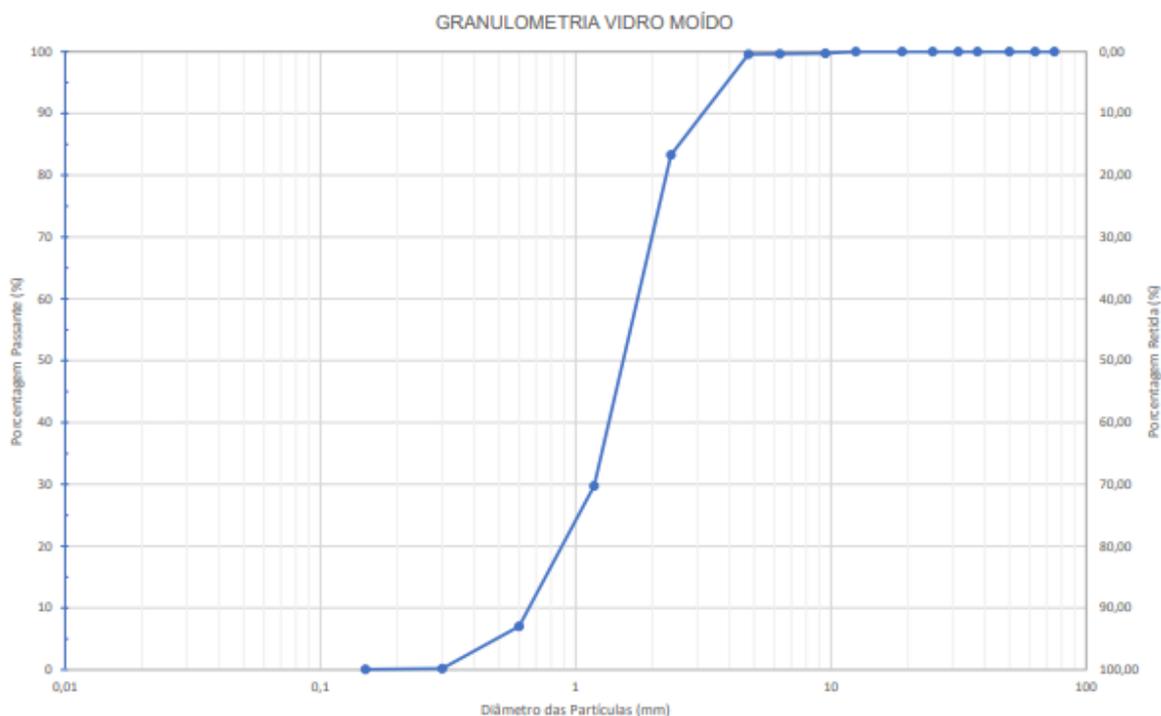


Figura 16 – Distribuição granulométrica do vidro moído. Fonte: acervo do autor

Em relação a distribuição granulométrica do vidro moído, as porcentagens retidas acumuladas nas diferentes peneiras, atendem os limites de distribuição granulométrica conforme previsto na ABNT NBR 7211:2009, para que um material seja considerado agregado miúdo para concreto.

Em tal classificação, foi determinado o módulo de finura igual a 3,80 e 4,75 mm para a dimensão máxima do agregado. Atendendo os procedimentos da ABNT NBR 9776:1987 obteve-se a massa específica do vidro moído utilizado igual a 2,2522 kg/dm<sup>3</sup>. E de acordo com os procedimentos da ABNT NBR 7251:1982, a massa unitária do vidro moído foi 1,2687 kg/dm<sup>3</sup>.

### 3.3.3 Composição areia com 20% de resíduo de vidro moído

A composição areia com 20% de resíduo de vidro moído adotada nos ensaios, surgiu da indicação de trabalhos já estudados anteriormente na revisão de literaturas, onde a substituição da areia por 20% de vidro moído é a que apresenta melhores resultados. Na Figura 17 estão representadas as curvas granulométricas da areia e do resíduo de vidro moído, onde ao comparar as mesmas, mostraram-se próximas, surgindo assim a ideia de misturá-las antes de fazerem parte do processo.

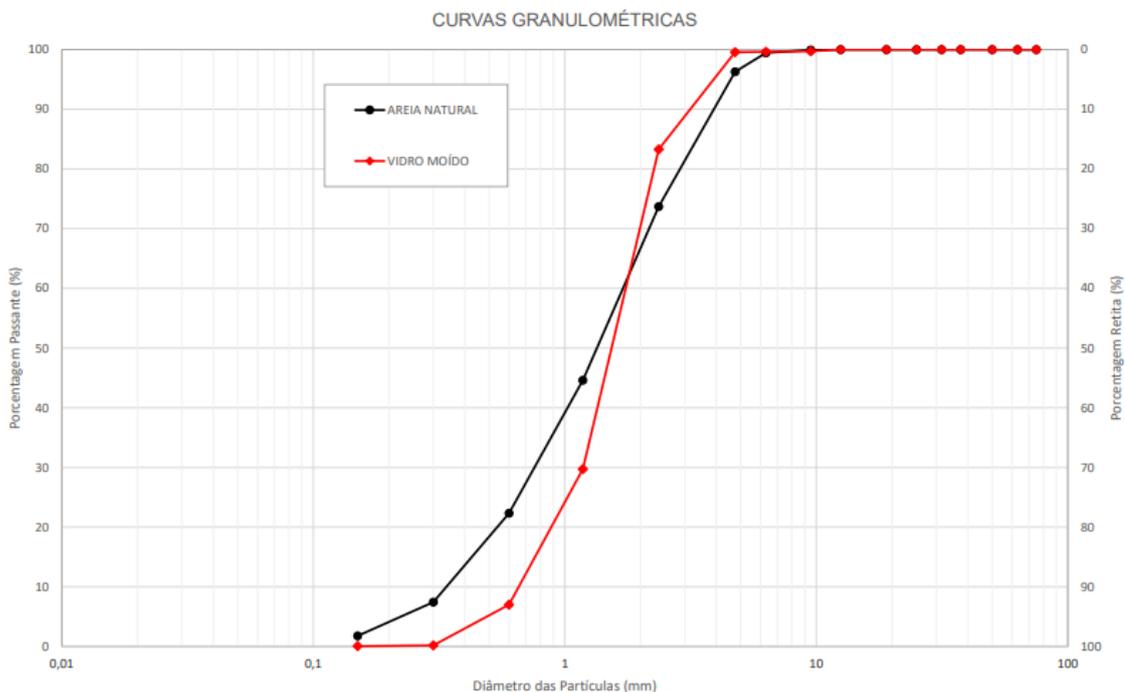


Figura 17 - Curvas granulométricas da areia e do vidro moído. Fonte: acervo do autor

O processo de mistura foi executado manualmente, até que a mistura atingisse uma aparência uniforme (Figura 18). Com isso veio a necessidade de novos ensaios físicos como caracterização e classificação desta composição areia com 20% de vidro

moído. A Figura 19 ilustra o resultado do peneiramento mecânico com as quantidades retidas em cada peneira.



Figura 18 - Resultado da mistura da areia com 20% de resíduo de vidro moído. Fonte: acervo do autor

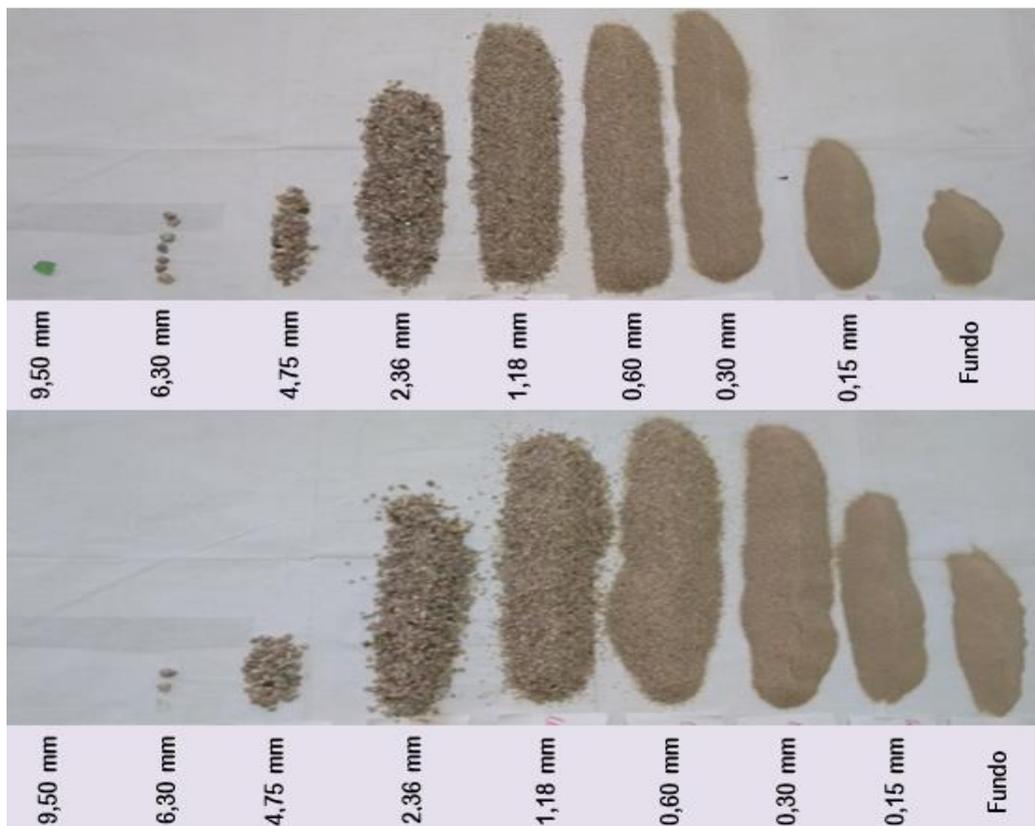


Figura 19 - Composição granulométrica da mistura composta de areia com 20% de resíduo de vidro moído. Fonte: acervo do autor

A mistura areia com 20% de resíduo de vidro moído foi utilizada como agregado miúdo e classificada de acordo com a norma NBR 7211 (ABNT, 2009). A CA20RVM foi peneirada mecanicamente, atendendo a ABNT NM 248:2003 para a caracterização

granulométrica, obtendo-se uma curva granulométrica contínua conforme mostra a Figura 20.

A Tabela 16 mostra a composição granulométrica com as porcentagens retida e acumulada em cada peneira. Apresentou módulo de finura igual a 3,30 e dimensão máxima de 4,75 mm.

Tabela 16 - Composição granulométrica da CA20RVM (massa inicial seca das amostras (a) e (b) são iguais a 1000 g)

Abertura das Peneiras (mm)	Massa Retida (g)		Massa Retida (%)		Vr = b - a	M <sub>mm</sub> = (a + b)/2	Massa Retida Acumulada (%)
	Ensaio (a)	Ensaio (b)	Ensaio (a)	Ensaio (b)	Massa Retida (%) Variação = ± 4 %	Massa Retida Média (%)	
9,5	0,98		0,10	0,00	0,10	0,05	0,05
6,3	4,17	5,41	0,42	0,54	-0,12	0,48	0,53
4,75	17,78	20,82	1,78	2,08	-0,30	1,93	2,46
2,36	174,48	176,17	17,45	17,62	-0,17	17,53	19,99
1,18	283,18	282,06	28,32	28,21	0,11	28,26	48,25
0,6	235,6	244,01	23,56	24,40	-0,84	23,98	72,23
0,3	178,21	174,44	17,82	17,44	0,38	17,63	89,87
0,15	72,6	68,19	7,26	6,82	0,44	7,04	96,91
Fundo	33	28,9	3,30	2,89	0,41	3,10	100,00
Total (g) =	1000	1000					

D<sub>máx</sub> (mm) = 4,75 Módulo Finura = 3,30  
 Fonte: produção do autor

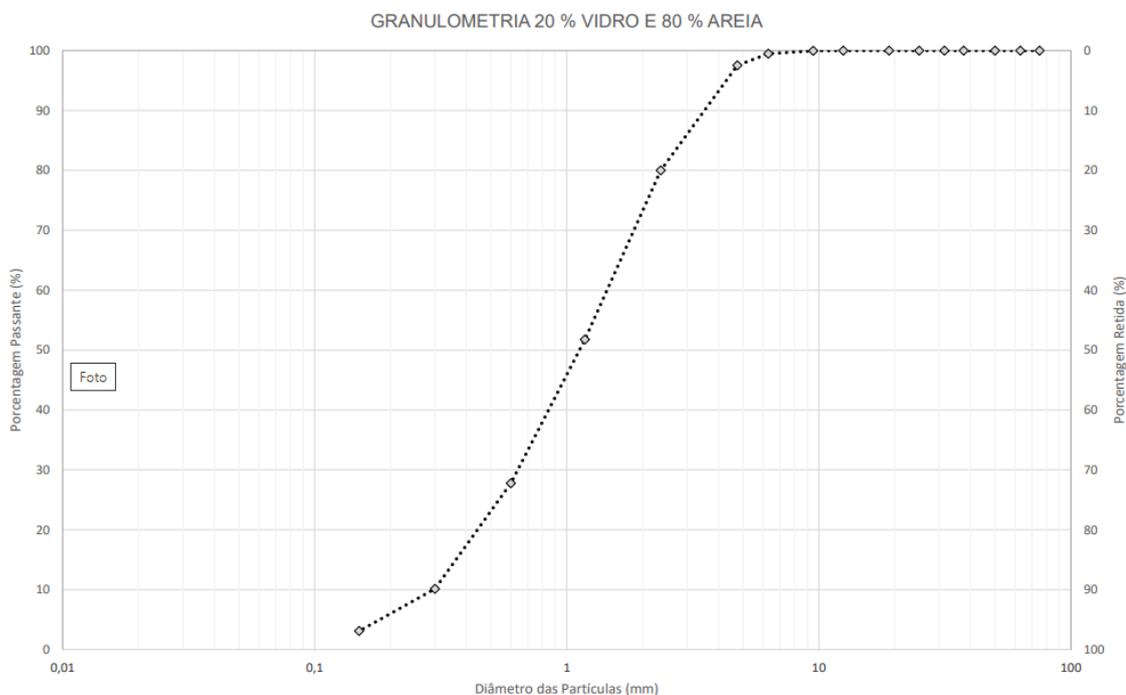


Figura 20 – Curva granulométrica da composição areia com 20% de resíduo de vidro moído.  
 Fonte: acervo do autor

Foi observado em relação a distribuição granulométrica da CA20RVM, que as porcentagens retidas acumuladas nas diferentes peneiras, estão dentro dos limites de distribuição granulométrica conforme previsto na ABNT NBR 7211:2009, para que um material seja considerado agregado miúdo para concreto. Atendendo os procedimentos da ABNT NBR 9776:1987 obteve-se a massa específica da CA20RVM igual a 2,5907 kg/dm<sup>3</sup>. E de acordo com os procedimentos da ABNT NBR 7251:1982, a massa unitária da CA20RVM moído foi 1,5547 kg/dm<sup>3</sup>.

### 3.3.4 Agregado graúdo

A brita utilizada como agregado graúdo trata-se de uma pedra granítica proveniente de jazida, classificada dentro do limite da zona ótima de acordo com a norma ABNT NBR 7211:2009.

A Figura 21 ilustra o resultado do peneiramento mecânico com as quantidades retidas em cada peneira e na Tabela 17 apresenta-se o resultado da sua composição granulométrica, já na Figura 22 a curva granulométrica contínua resultante do ensaio. Apresentou módulo de finura igual a 5,17 e dimensão máxima igual a 9,5 mm.



Figura 21 - Distribuição granulométrica da brita zero. Fonte: acervo do autor

Tabela 17 – Composição granulométrica do agregado graúdo (massa inicial seca das amostras (a) e (b) são iguais a 1000 g)

Abertura das Peneiras (mm)	Massa Retida (g)		Massa Retida (%)		$V_r = b - a$	$M_{rm} = (a + b)/2$	
	Ensaio (a)	Ensaio (b)	Ensaio (a)	Ensaio (b)	Massa Retida (%) Variação = $\pm 4\%$	Massa Retida Média (%)	Massa Retida Acumulada (%)
9,5	0	1,74	0,00	0,17	-0,17	0,09	0,09
6,3	190,31	173,65	19,03	17,37	1,67	18,20	18,29
4,75	367,76	408,81	36,78	40,88	-4,10	38,83	57,11
2,36	282,41	281,75	28,24	28,18	0,07	28,21	85,32
1,18	33,38	34,69	3,34	3,47	-0,13	3,40	88,73
0,6	38,96	34,47	3,90	3,45	0,45	3,67	92,40
0,3	37,14	27,78	3,71	2,78	0,94	3,25	95,64
0,15	24,64	18,39	2,46	1,84	0,63	2,15	97,79
Fundo	25,4	18,72	2,54	1,87	0,67	2,21	100,00
Total (g) =	1000	1000					

$D_{m\acute{a}x}$  (mm) = 9,5

Módulo Finura = 5,17

Fonte: produção do autor

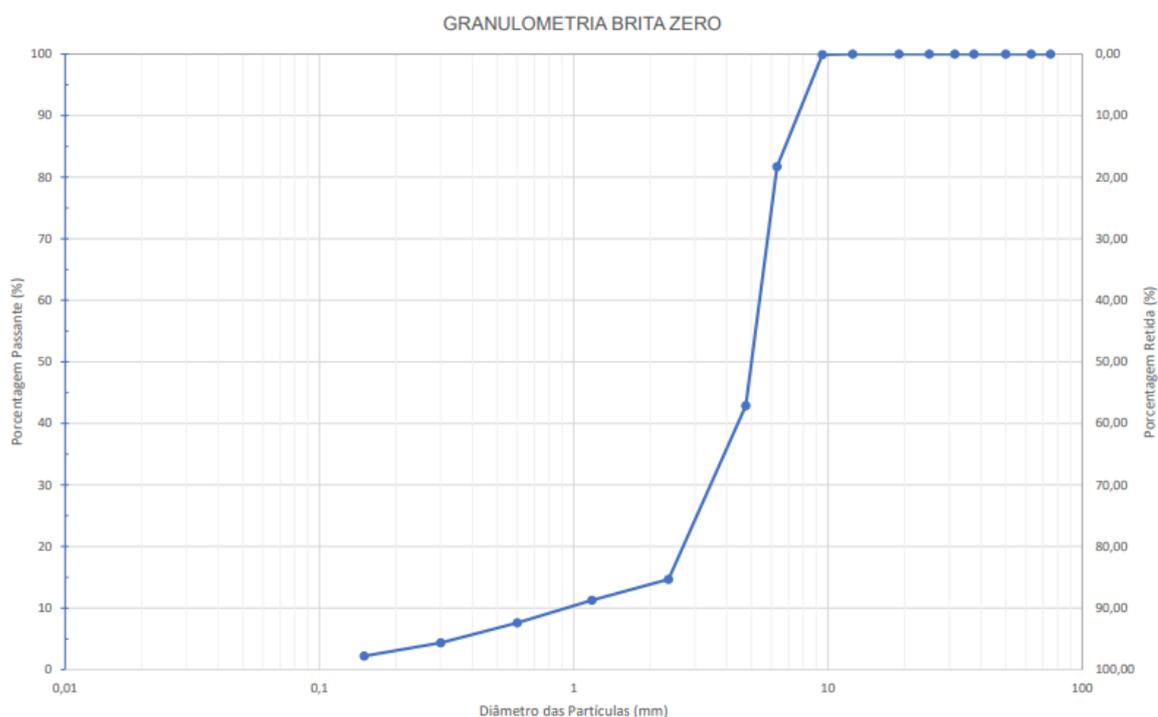


Figura 22 – Curva granulométrica da brita zero. Fonte: acervo do autor

Atendendo os procedimentos da ABNT NBR 7251:1982 obteve-se a massa unitária da brita zero igual a 1,3544 kg/dm<sup>3</sup> e de acordo com os procedimentos da ABNT NM 53:2003 uma massa específica igual a 2,6925 kg/dm<sup>3</sup> com o teor de absorção igual a 1,57%.

Optou-se pela brita zero por proporcionar melhor desempenho e trabalhabilidade na produção de artefatos de concreto pré-moldado.

### 3.3.5 Água

A água usada é distribuída pelo Serviço Autônomo de Saneamento de Pelotas (SANEP), que abastece o IFSul.

### 3.3.6 Aglomerante

O aglomerante utilizado foi o cimento Portland Pozolânico do tipo CP IV-32 RS, marca Votoran, de acordo com a norma ABNT NBR 16697:2018. O mesmo foi adotado por ser um aglomerante que apresenta baixo calor de hidratação, o que o torna bastante recomendável na concretagem de grandes volumes e sob temperaturas elevadas.

Além disso, o alto teor de pozolana, entre 15 e 50%, proporciona estabilidade no uso com agregados reativos e em ambientes de ataque ácido, em especial de ataque por sulfatos. É altamente eficiente em argamassas de assentamento e revestimento, em concreto magro, concreto armado, concreto para pavimentos e solo-cimento. As tabelas 18, 19 e 20 apresentam as características do cimento CP IV-32 RS. A massa específica do cimento CP IV-32 RS igual a 2,83 g/cm<sup>3</sup> foi fornecida pelo método de ensaio da ABNT NBR NM 23:2001.

Tabela 18 - Limites de composição do cimento Portland Pozolânico

Limites de composição do cimento Portland Pozolânico CP IV-32 RS					
Sigla	Classe de resistência (MPa)	Sufixo	Porcentagem de massa		
			Clínquer + Sulfatos de Cálcio (gesso)	Material pozolânico	Material carbonático
CP IV	32	RS	45 - 85	15 - 50	0 - 10

Fonte: Adaptada da Tabela 2 da ABNT NBR 16697:2018

Tabela 19 - Requisitos químicos do cimento CP IV-32 RS

Sigla	Resíduo insolúvel (RI)	Perda ao fogo (PF)	Óxido de Magnésio (MgO)	Trióxido de Enxofre (SO <sub>3</sub> )
CP IV	-	≤ 6,5	-	≤ 4,5

Fonte: Adaptada da ABNT NBR 16697:2018

Tabela 20 - Requisitos físicos e mecânicos do cimento CP IV-32 RS

Sigla	Classe	Finura			Resistência à compressão MPa			
		Resíduo na peneira 75µm (%)	Tempo de início de pega (min)	Expansibilidade a quente (mm)	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
CP IV	32	≤ 8,0	≥ 60	≤ 5,0	-	≥ 10	≥ 20	≥ 32

Fonte: Adaptada da ABNT NBR 16697:2018

### 3.4 Métodos

#### 3.4.1 Processo de obtenção do resíduo de vidro utilizado neste estudo

Em decorrência do vidro ser considerado por muito tempo um material altamente sustentável, onde permitia sua reutilização por inúmeras vezes, o vidro quebrado ou recipientes de vidro ainda são um desafio para as cooperativas de reciclagem, visto que há um custo da coleta e triagem que não compensa tanto ao se comparado com o valor recebido pela venda do material.

Dessa forma, incorporar resíduos em concretos tem sido estudo de pesquisa em todo mundo, por exemplo, Austrália, Alemanha, Brasil, Canadá, Espanha, Estados Unidos e França, como já citado.

Cada vez mais tem crescido a necessidade de destinação final do resíduo, visto que as leis ambientais a cada dia estão mais exigentes, e que o concreto apresenta um grande potencial para absorver diversos tipos de resíduos na sua composição sem prejudicar sua resistência e durabilidade.

A sucata de vidro utilizada no estudo é proveniente da coleta seletiva, sem receber nenhum tratamento de limpeza prévio, sem distinção de cores, somente as tampas das embalagens foram extraídas, antes do processo de trituração e, cedida

pela COOTAFRA - Cooperativa de Trabalho dos Agentes Ambientais do Fraget no bairro Fragata em Pelotas – RS – Brasil.

A Figura 23 mostra a sucata triturada fornecida pela COOTAFRA que será empregada nos concretos da pesquisa.



Figura 23 - Sucata de vidro moída da COOTAFRA. Fonte: acervo do autor

### **3.4.2 Armazenamento e seleção do resíduo de vidro**

A sucata de vidro triturada da COOTAFRA, foi armazenada em baias no interior do curso de Edificações do IFSul - Campus Pelotas, selecionada e caracterizada conforme descrito no item 3.3.2 Resíduo de vidro moído, onde parte deste resíduo foi misturado a areia numa porcentagem de 20%. A composição areia com 20% de resíduo de vidro moído utilizada nos concretos, surgiu da indicação de trabalhos já estudados anteriormente na revisão bibliográfica, sendo a porcentagem que apresenta melhor resultado.

Tamanna, Tuladhar, Sivakugan (2020) testaram a resistência à compressão de concretos com substituição de areia natural por resíduo de vidro moído em 20%, 40% e 60%. Para os traços propostos adotaram uma relação água/cimento igual a 0,53 para obterem uma resistência característica de 32 MPa aos 28 dias. Verificaram a resistência à compressão aos 7, 28 e 56 dias. Sendo que todos os traços alcançaram

valores superiores ao determinado. O concreto com 20% de resíduo de vidro obteve uma resistência 7% maior que o concreto controle aos 28 dias.

Ao juntar e comparar as curvas granulométricas da areia e do resíduo de vidro moído, notou-se configurações próximas, nascendo a ideia de misturá-las antes de fazerem parte do processo. Malik et al. (2013) adotou método semelhante, misturando o resíduo de vidro à areia antes de compor a dosagem. O processo de mistura foi executado manualmente, até que a mistura atingisse uma aparência uniforme como ilustra a Figura 24. Assim, nova classificação e caracterização desta composição areia com 20% de vidro moído fez-se necessária como já demonstrado no item 3.3.3.

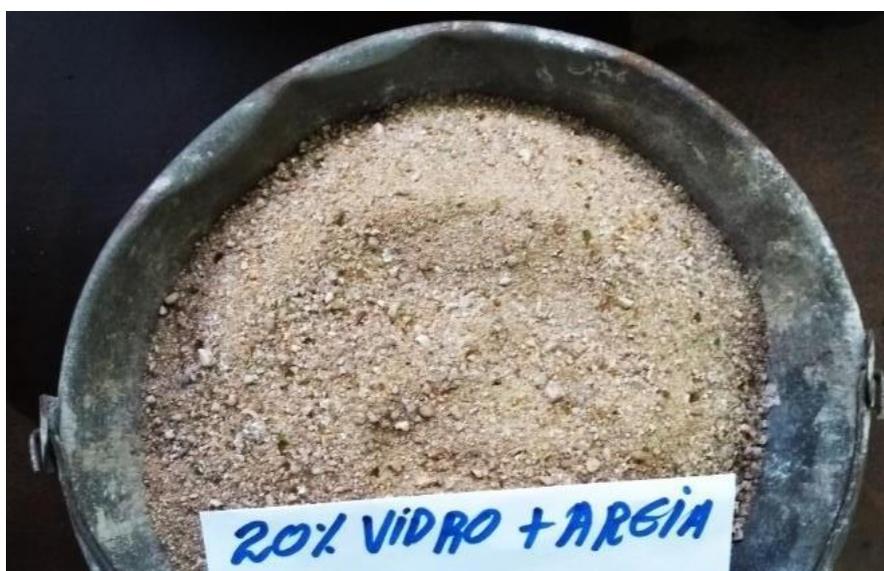


Figura 24 - Composição da areia com 20% de resíduo de vidro moído. Fonte: acervo do autor

### 3.4.3 Método de dosagem dos concretos

O método de dosagem adotado nesta pesquisa foi o método recomendado pela Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (RODRIGUES, 1998) adaptado do método da American Concrete Institute – ACI 211.1 - 81 (Standart Practice for Selecting Proportion for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete - 1985), onde considera tabelas e gráficos elaborados a partir de informações experimentais, que permitem a utilização dos agregados que se enquadram nos limites propostos pela norma ABNT NBR 7211:2009.

O método ABCP/ACI considera concretos de consistência plástica a fluída e atende os critérios de durabilidade pelas normas ABNT NBR 12655:2015 e ABNT NBR

6118:2014, que propõe para a escolha da relação água/cimento (a/c) o uso da curva de Abrams, que relaciona a resistência de dosagem e a resistência nominal do cimento com o fator a/c.

Para adotar o método da ABCP/ACI, a escolha do cimento foi essencial, o cimento CP IV-32 RS é o mais empregado na construção civil (RODRIGUES, 1998), possui grande variedade de aplicações e de menor valor no comércio local.

Se faz necessário conhecer o tipo, a massa específica e o nível de resistência aos 28 dias do cimento, assim como conhecer a análise granulométrica de cada agregado, a massa específica, o módulo de finura do agregado miúdo e a dimensão máxima característica do agregado graúdo, assim com as características do concreto que se quer produzir. Para esta pesquisa a mistura areia com 20% de vidro moído foi caracterizada como agregado miúdo para comparar seu comportamento com o concreto referência, sem substituição. A resistência prevista para a dosagem não é diretamente o  $f_{ck}$ , e sim, o  $f_{cj}$  aos 28 dias. Adotou-se a Equação 2.1 recomendada na ABNT NBR 12655: 2015 para determinar o  $f_{cj}$ .

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65.S_d \quad \text{Equação 2.1}$$

Em que:

$f_{cj}$  = Resistência à compressão do concreto requerida aos 28 dias, em MPa

$f_{ck}$  = Resistência característica à compressão do concreto, em MPa

$S_d$  = Condição de controle, em MPa

Para a aplicação do método de dosagem fixou-se a resistência característica à compressão do concreto e a condição de controle  $S_d = 4,0$  MPa, onde o cimento, os agregados e a água foram medidos em massa conforme a norma ABNT NBR 12655:2015, para determinar o  $f_{cj}$  aos 28 dias. Primeiramente, com o  $f_{cj}$  obtido e com a resistência nominal do cimento CP IV-32 RS aos 28 dias, na curva de Abrams, encontra-se o fator a/c do concreto referência CREF01, como mostra a Figura 25. Para cada nova relação a/c adotada, um novo  $f_{cj}$  é determinado pela curva de Abrams. Por conseguinte, um novo  $f_{ck}$  é encontrado, permitindo a determinação de um novo traço de concreto.

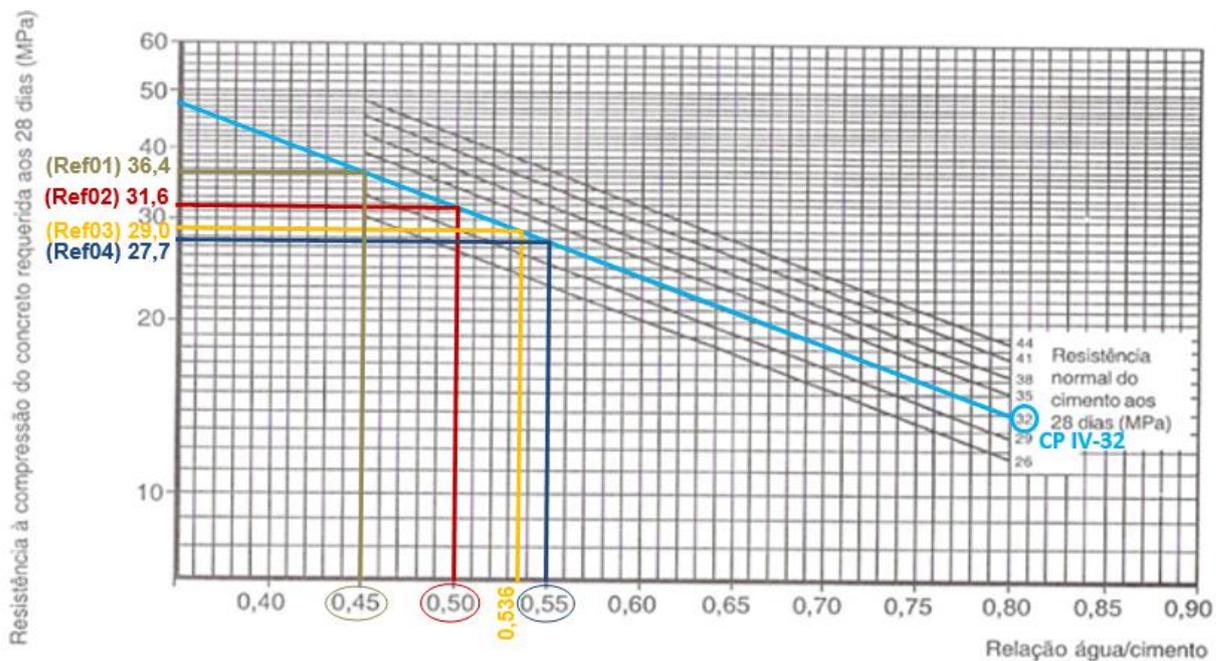


Figura 25 - Curva de Abrams para a obtenção da relação a/c. Fonte: Rodrigues, 1998.

As amostras dos agregados utilizados nos ensaios foram secas em uma estufa da marca Biomatic (Figura 26) por 48 horas a uma temperatura de 105°C conforme recomenda a ABNT NM 248:2001 e esfriada à temperatura ambiente por 1 (uma) hora antes dos ensaios de caracterização. Considerando as normas especificadas e utilizadas na caracterização dos materiais, conforme descrito no item 2.3 Caracterização dos materiais, os resultados obtidos dos ensaios foram registrados na Tabela 21 e usados para determinar o consumo de água, cimento e agregado graúdo e miúdo como recomenda Rodrigues (1998) para obter o traço em massa.



Figura 26: Estufa Biomatic. Fonte: acervo do autor

Tabela 21 – Resultado da caracterização dos materiais utilizados nos concretos

Caracterização dos agregados					
Materiais	Módulo de Finura	D <sub>máx</sub> (mm)	Massa Unitária (kg/dm <sup>3</sup> )	Massa Específica (kg/dm <sup>3</sup> )	Teor de absorção (%)
Areia	3,54	4,75	1,4547	2,5934	-
Resíduo de vidro moído	3,80	4,75	1,2687	2,2522	-
CA20RVM	3,30	4,75	1,5547	2,5907	-
Brita zero	5,17	9,5	1,3544	2,6925	1,57

Fonte: produção do autor

Quatro diferentes traços foram calculados para as relações água/cimento 0,45, 0,50, 0,536 e 0,55, os quais estão representados na Tabela 22.

Tabela 22 - Apresentação dos traços obtidos para cada a/c

Descrição	Legenda	Cimento	Areia	Areia com 20% de vidro moído	Brita zero	a/c
Traço referência 01, a/c = 0,45	CREFO1	1	1,720	0	1,317	0,45
Traço areia c/ 20% de vidro moído 01, a/c = 0,45	C20RV01	1	0	1,647	1,390	
Traço referência 02, a/c = 0,50	CREFO2	1	2,020	0	1,463	0,50
Traço areia c/ 20% de vidro moído 02, a/c = 0,50	C20RV02	1	0	1,937	1,543	
Traço referência 03, a/c = 0,536	CREFO3	1	2,020	0	1,463	0,536
Traço areia c/ 20% de vidro moído 03, a/c = 0,536	C20RV03	1	0	1,937	1,543	
Traço referência 04, a/c = 0,55	CREFO4	1	2,307	0	1,609	0,55
Traço areia c/ 20% de vidro moído 04, a/c = 0,55	C20RV04	1	0	2,218	1,698	

Fonte: produção do autor

#### 3.4.4 Ensaios no concreto no estado fresco

Para cada traço desenvolvido uma dosagem de concreto foi produzida, variando a relação água/cimento (a/c), a fim de medir a resistência à compressão aos 28 dias. Concretos referência (sem adição de resíduo de vidro moído) e concretos

com areia com 20% de resíduo de vidro moído foram produzidos atendendo dosagens racionais, como mostra a Tabela 23.

Tabela 23 - Dosagens produzidas para o experimento

Descrição	Legenda	Cimento (g)	Areia (g)	Areia com 20% de vidro moído (g)	Brita zero (g)	Consumo de água (g)	a/c
Concreto de Referência 01	CREFO1	6130	10548	0	8080	2760	
Concreto com areia com 20% de vidro moído 01	C20RV01	6130	0	10104	8520	2760	0,45
Concreto de Referência 02	CREFO2	5520	11140	0	8080	2760	
Concreto com areia com 20% de vidro moído 02	C20RV02	5520	0	10690	8520	2760	0,50
Concreto de Referência 03	CREFO3	5520	11140	0	8080	2960	
Concreto com areia com 20% de vidro moído 03	C20RV03	5520	0	10690	8520	2960	0,536
Concreto de Referência 04	CREFO4	5020	11570	0	8080	2760	
Concreto com areia com 20% de vidro moído 04	C20RV04	5020	0	11130	8520	2760	0,55

Fonte: produção do autor

Para cada dosagem de concreto produzida (Tabela 23), os materiais foram medidos em massa conforme determina a ABNT NBR 8953:2015, utilizando balanças eletrônicas de precisão da marca Marte nos modelos: AD5002 divisão = 0,01g classe de exatidão II; MS 10K 1 divisão = 0,1g; LS50 divisão = 10g classe de exatidão III, como ilustra as Figuras 27 e 28.



Figura 27 - Balanças utilizadas para pesagem dos materiais. Fonte: acervo do autor



Figura 28 - Materiais sendo pesados e identificados. Fonte: acervo do autor

Conforme as amostras eram pesadas e identificadas, as mesmas eram reservadas em baldes de aço galvanizado, como ilustra a Figura 29.



Figura 29 - Porcionamento dos materiais para produção das dosagens. Fonte: acervo do autor

Para a produção dos concretos, primeiramente preparou-se a betoneira, do tipo estacionária. Com a mesma em movimento, foi inserido o volume de um balde com água, onde permaneceu girando por 2 (dois) minutos. Em seguida, descartou-se essa água até escorrer totalmente o excesso. Com a betoneira ainda em movimento, os materiais foram sendo adicionados na sequência conforme mostra a Tabela 24 e ilustra a Figura 30. Cada material que entrou na betoneira foi misturado por 1 (um) minuto, e quando todos já estavam lá, foi misturado por mais 3 minutos. Por se tratar de pequenos volumes dosados de materiais, concluída a etapa de mistura, verificou-se a existência da formação de grumos ou pelotas. Assim a operação foi repetida para

as diferentes dosagens. A betoneira estacionária utilizada para a produção dos concretos foi da marca Irmãos Fischer S.A. Ind. Com. modelo 800112 capacidade 112 litros motor monofásica potência 1 HP.

Tabela 24 - Ordem de colocação dos materiais na betoneira

Sequência	Quantidades %	Materiais
1	60	Água
2	100	Agregado graúdo
3	100	Cimento
4	100	Agregado miúdo
5	40	Água

Fonte: produção do autor

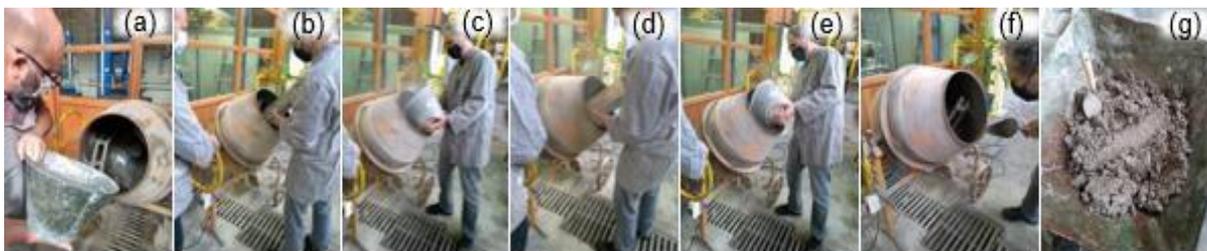


Figura 30 - Sequência de colocação dos materiais na betoneira para a produção do concreto.

Fonte: acervo do autor

(a) parte da água; (b) brita zero; (c) cimento; (d) agregado miúdo; (e) restante da água; (f) verificação da existência de grumos; (g) mistura uniforme concreto no carrinho.

Após verificar que a mistura do concreto dosado estava uniforme, despejou-se o concreto no carrinho de mão e fez-se a última conferência da mistura esfregando a colher de pedreiro sobre o concreto. Atendendo as diretrizes da norma ABNT NM 67: 1996, fez-se os ensaios para medir a consistência pelo abatimento do tronco de cone para cada concreto produzido. A Figura 31, ilustra simplificada o passo a passo do ensaio e a Figura 32 algumas das medições feitas no laboratório do curso de Edificações.

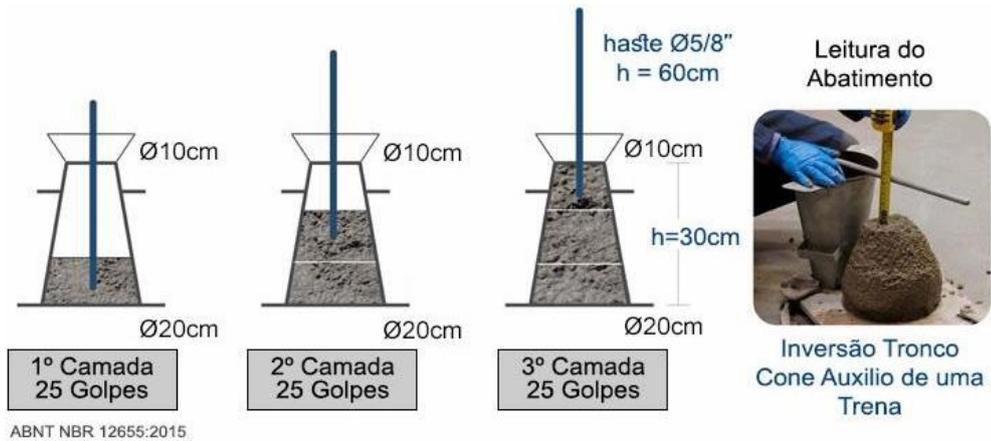


Figura 31 - Leitura do abatimento do tronco de cone. Fonte: <https://bityli.com/ipA4wf>



Figura 32 - Medições do abatimento do tronco de cone – Slump Test. Fonte: acervo do autor

A condição de retirada do concreto da betoneira, o volume da amostra dosada, o intervalo de tempo para a obtenção da primeira e a última amostra e a preparação das amostras, atenderam os requisitos da norma da ABNT NBR 16886:2020.

Para a moldagem dos corpos de prova, seguiu-se o que estabelece a norma da ABNT 5738:2016. Para cada dosagem, 5 (cinco) corpos de prova cilíndricos (100 mm de diâmetro e 200 mm de altura) foram moldados.



Figura 33 - Moldes utilizados para moldagem dos corpos de prova. Fonte: acervo do autor

As Figuras 33 e 34, mostram os moldes utilizados, as respectivas dimensões e a sequência do processo de moldagem dos corpos de prova.

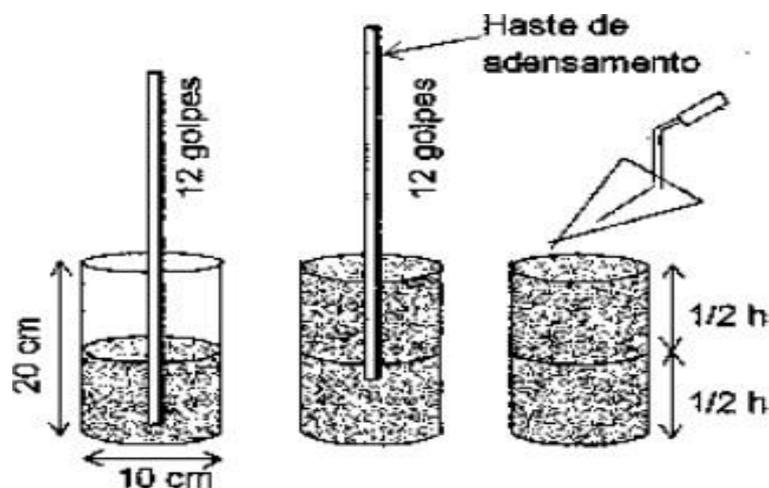


Figura 34 - Sequência de moldagem dos corpos de prova. Fonte: <https://abre.ai/dzsK>

A moldagem ocorreu sobre uma superfície horizontal rígida, livre de vibrações e protegida das intempéries, com a finalidade de evitar perda de água do concreto, como mostra a Figura 35. Para o experimento, no total, foram moldados 40 (quarenta) unidades sendo realizados no Laboratório de Ensaio Tecnológicos do Curso de Edificações - IFSul Campus Pelotas.



Figura 35 - Corpos de prova moldados no laboratório do curso de Edificações. Fonte: acervo do autor

### 3.4.5 Ensaio no concreto no estado endurecido

Na preparação de corpos de prova cilíndricos para o ensaio de resistência à compressão axial simples, os corpos de prova, após decorrido 24 horas de cura, foram desmoldados e colocados imersos em tanques com água e cal hidratada, onde ficaram em cura úmida por 27 dias (Figura 36).



Figura 36 - Corpos de prova em cura úmida. Fonte: acervo do autor

Após serem removidos da cura úmida, foram armazenados em uma superfície de fácil secagem (Figura 37).



Figura 37 - Corpos de prova secando durante 24 horas. Fonte: acervo do autor

Passadas as 24 horas de secagem, os corpos de prova foram identificados pelo fuste com marcador permanente (Figura 38) e suas dimensões e massa aferidas e registradas, como mostra a Figura 39. Para medir a massa dos corpos de prova foi usada a balança eletrônica de precisão da marca Marte modelo MS 10K 1 divisão = 0,1g e para medir suas dimensões foi usado um paquímetro universal de aço carbono de 300 mm resolução = 0,02 mm/0-12x0,001” da marca Insize.



Figura 38 - Corpos de prova identificados para o ensaio de compressão. Fonte: acervo do autor



Figura 39 - Medição da massa e dimensões dos corpos de prova (CP). Fonte: acervo do autor

Para os ensaios de resistência à compressão axial simples, as diretrizes da norma ABNT NBR 5739:2018 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos foram atendidas. Aos 28 dias de idade, 24 (vinte e quatro) corpos de prova foram preparados (identificados, medidos e pesados) e submetidos aos ensaios de resistência à compressão, sendo 3 (três) corpos de prova para cada dosagem de concreto produzido.

Etapas preliminares se fizeram necessárias como: medição do diâmetro de cada corpo de prova em três níveis: topo, meio e base, que servirá para calcular a área média de cada corpo de prova, a massa específica do concreto e o cálculo da resistência mecânica após ser medida a carga de ruptura. Para medir a resistência à compressão axial simples foi utilizada a prensa hidráulica computadorizada EMIC DL2000 com capacidade máxima de 2.000 kN, instalada no Laboratório de Ensaios Tecnológicos do Curso de Edificações do IFSul - Campus Pelotas – RS. A Figura 40 mostra a prensa EMIC DL2000 sendo operada.



Figura 40 - Ensaio de compressão axial dos corpos de prova produzidos. Fonte: acervo do autor

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No capítulo 3 foram apresentados o planejamento e o programa experimental da pesquisa, além das características física e química dos materiais utilizados na produção dos traços de concreto, dosagens produzidas para o experimento, ensaio de consistência e ensaio mecânico nos concretos produzidos. Também foi definida no capítulo anterior a metodologia de análise dos resultados.

Quatro (4) traços com diferentes relações água/cimento (0,45, 0,50, 0,536 e 0,55) foram desenvolvidos. Atendendo dosagens racionais, concretos referência (sem adição de resíduo de vidro moído) e concretos com areia com 20% de resíduo de vidro moído foram produzidos, a fim de medir a resistência à compressão aos 28 dias.

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados da caracterização dos materiais utilizados e dos ensaios realizados no concreto no estado fresco e no estado endurecido do programa experimental.

### 4.1 Concreto no estado fresco

#### 4.1.1 Ensaio de consistência pelo Abatimento do tronco de cone

O ensaio de abatimento do tronco de cone foi executado conforme recomenda a norma da ABNT NBR 67:1998, como descrito no item 3.4.4 e apresentado na Tabela 25.

Tabela 25 - Valores do abatimento do tronco de cone

Legenda	Relação a/c	Abatimento (mm)
CREFO1 C20RV01	0,45	50,5 50
CREFO2 C20RV02	0,50	47 37
CREFO3 C20RV03	0,536	52 117
CREFO4 C20RV04	0,55	125 67

Fonte: produção do autor

A Figura 41 apresenta o comportamento das consistências dos concretos produzidos.

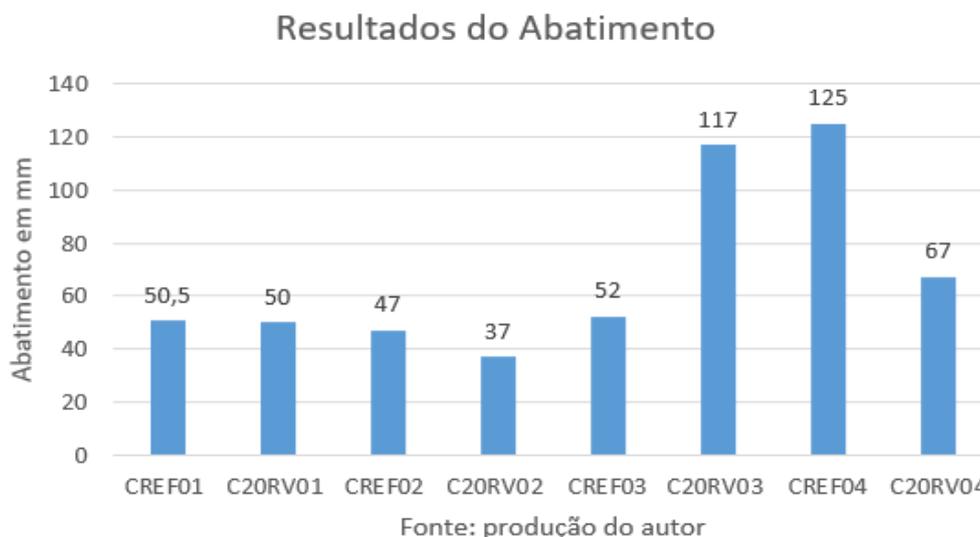


Figura 41 - Gráfico dos resultados do abatimento do tronco de cone. Fonte: acervo do autor

Nota-se que para os traços produzidos, independente da relação água/cimento, o abatimento em geral, manteve-se baixo (com exceção das misturas C20RV03 e CREF04), apresentando um aspecto coeso, plástico e dentro da faixa de abatimento desejado de 80 a 100 mm. Pôde-se notar que as misturas com vidro tornaram-se mais fáceis de lançar e moldar o concreto das peças produzidas, mesmo com valores de abatimento inferiores ao de referência.

Camarate (2016) em seu estudo mediu baixos valores de abatimento e associou ao fato dos agregados terem sido secos em estufa, sendo a única maneira de controlar a quantidade de água colocada na mistura. Esses resultados corroboram também com as pesquisas de Ismail & Al-Hashmi (2009) e de Park, Lee & Kim (2004), onde reconheceram uma diminuição no índice de consistência das amostras, devido à forma angular do grão do vidro moído, assim como o trabalho experimental de Tamanna, Tuladhar & Sivakugan (2020), que associaram a diminuição da trabalhabilidade do concreto às bordas angulares e textura áspera do grão de vidro moído. A reduzida variação da trabalhabilidade pode ser devido à semelhança das composições granulométricas da CA20RVM e da areia natural utilizada no experimento. Ou ainda, segundo Taha & Nounu (2008), devido à falta de finos no resíduo de vidro utilizado na mistura.

## 4.2 Concreto no estado endurecido

### 4.2.1 Massa específica

Na Tabela 26, observa-se, ao comparar, que as massas específicas dos concretos com a CA20RVM e dos concretos de referência (sem substituição) são muito semelhantes. Os valores de densidade ligeiramente reduzidos nos concretos com a CA20RVM podem estar associados à menor massa específica da CA20RVM de 2,5907 kg/dm<sup>3</sup>, em comparação com a areia natural utilizada na pesquisa, igual a 2,5934 kg/dm<sup>3</sup>. Outro ponto que chama a atenção é o fato de não haver interferência a variação da relação água/cimento das misturas.

Tabela 26 – Valores de massa específica dos concretos estudados

Legenda	CREFO1	C20RV01	CREFO2	C20RV02	CREFO3	C20RV03	CREFO4	C20RV04
Relação água/cimento		0,45		0,50		0,536		0,55
M <sub>médio</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	2252,93	2236,77	2274,71	2263,27	2273,74	2232,66	2246,33	2228,99

Fonte: produção do autor

### 4.2.2 Resistência à compressão axial simples

Para a realização dos ensaios de resistência à compressão axial simples, foram testados 3 (três) corpos de prova de cada dosagem para a idade de 28 dias, conforme diretrizes da norma ABNT NBR 5739:2018. Considerado o ensaio que permite avaliar a propriedade mecânica mais importante do concreto.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão estão representados na Tabela 27 e graficamente na Figura 42, e devem ser referidos como valores médios de resistência à compressão.

Tabela 27 – Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias

Legenda	Relação água/cimento	fck estimado de projeto (MPa)	Resistência à compressão média – fck médio (MPa)	Percentual de aumento da resistência (%)
CREFO1	0,45	29,8	39,79	33,52
C20RV01		29,8	35,89	20,44
CREFO2	0,50	25	34,97	39,88
C20RV02		25	28,6	14,4
CREFO3	0,536	22,4	31,22	39,38
C20RV03		22,4	28,88	28,93
CREFO4	0,55	21,1	29,9	41,71
C20RV04		21,1	25,14	19,15

Fonte: produção do autor

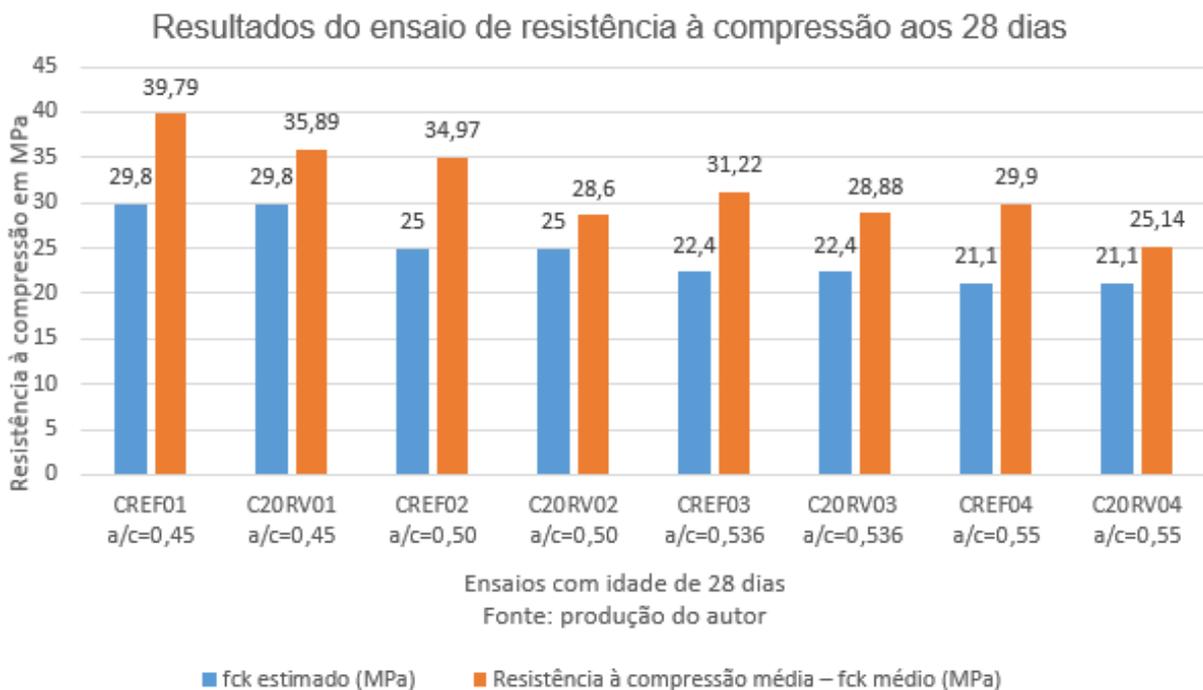


Figura 42 - Gráfico comparativo da resistências à compressão estimada em projeto com a resistência média medida no ensaio. Fonte: acervo do autor

Pode-se observar na Figura 42 que todas as dosagens apresentaram resistência à ruptura superior à resistência estimada em projeto. Mas ao comparar a resistência do concreto com a CA20RVM com a resistência do concreto de referência, ilustrada na Figura 43, não acompanha o mesmo crescimento.

## Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias

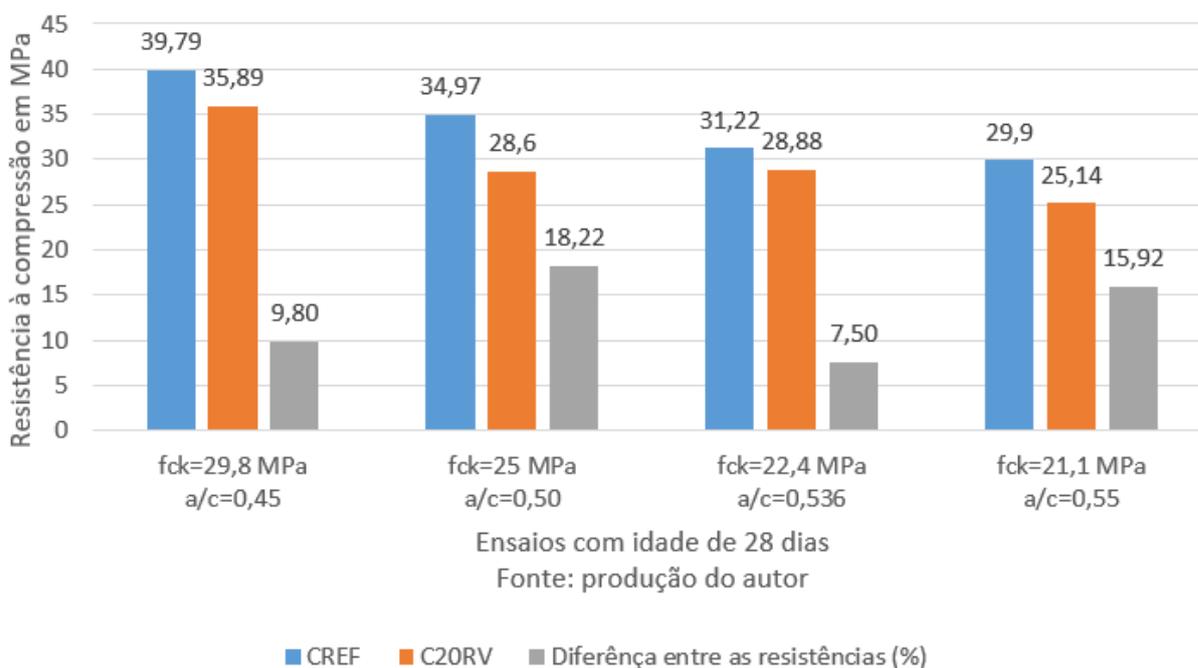


Figura 43 - Gráfico comparativo das resistências à compressão média medidas no ensaio.

Fonte: acervo do autor

Conforme mostra o gráfico comparativo da Figura 43, a mistura C20RV01, para a relação a/c de 0,45, obteve uma resistência média de ruptura de 35,89 MPa aos 28 dias, que foi 9,8% inferior a resistência do concreto referência, contradizendo o resultado encontrado por Malik et al. (2013) para a mesma relação a/c.

Na mistura C20RV02, com a relação a/c de 0,50, alcançou uma resistência média de 28,6 MPa, que foi 18,22% menor que a resistência referência, contestando o resultado da pesquisa de Gautam, Srivastava e Agarwal (2012) para a mesma relação a/c.

Já a mistura C20RV03 atingiu uma resistência média de 28,88 MPa com a/c igual a 0,536, que foi 7,5% menor que o concreto referência, contrariando o resultado do experimento de Tamanna, Tuladhar e Sivakugan (2020) para a mesma taxa de substituição (porém com vidro limpo) e para, praticamente, a mesma relação a/c.

Porém para a mistura C20RV04, a resistência média alcançada foi de 25,14 MPa, para a relação a/c de 0,55, que foi 15,92% inferior a resistência do concreto referência, confirmando os resultados obtidos por Park, Lee e Kim (2004) e por Topçu e Canbaz (2004) em seus estudos. Em geral, concretos contendo agregados de vidro apresentam resistência à compressão inferior aos concretos que utilizam agregados naturais.

Para este experimento a relação água/cimento foi alterada para cada dosagem estudada, que aparentemente não influenciou na evolução das resistências por não apresentar um padrão de aumento.

Os estudos sobre concreto e argamassa contendo resíduo de vidro, revelam uma clara distinção em termos de desempenho, em função da dimensão dos agregados substituídos, tratamento prévio e metodologia de preparo dos resíduos de vidro. Existe uma certa tradição de usar o vidro residual para substituir parte do cimento, parte do agregado miúdo ou graúdo e até mesmo os dois simultaneamente, e como pó para mitigar a reação álcali-silica (RAS) entre a pasta de cimento e um agregado reativo.

#### **4.2.3 Dosagem de concretos com 20% de substituição do agregado miúdo por resíduo de vidro moído sem limpeza prévia**

Observou-se que o concreto com adição de 20 % de resíduo de vidro moído, necessita de uma relação água/cimento menor para atingir a mesma resistência à compressão simples do concreto convencional, conforme demonstra os resultados do ensaio de resistência à compressão da Figura 43. A partir da metodologia de dosagem que utiliza a curva de Abrams para determinação da relação água/cimento, foi desenvolvida nova curva de dosagem para o cimento CP-IV 32. A metodologia segue o mesmo procedimento descrito no Item 3.4.3 de dosagem sem adição de vidro, calculando-se o  $f_{cj}$  (para a mesma condição de controle - Sd) através da alteração da relação água/cimento, que será reduzida em comparação a do concreto de referência (concreto convencional). A relação a/c para o C20RV é obtida com a curva de Abrams da Figura 44.

A curva foi elaborada com base nos resultados da pesquisa que demonstraram redução média de resistência à compressão simples aos 28 dias de 12,86 %. Como sugestão para pesquisas futuras, há a necessidade de realizar novas dosagens com as novas relações água/cimento propostas.

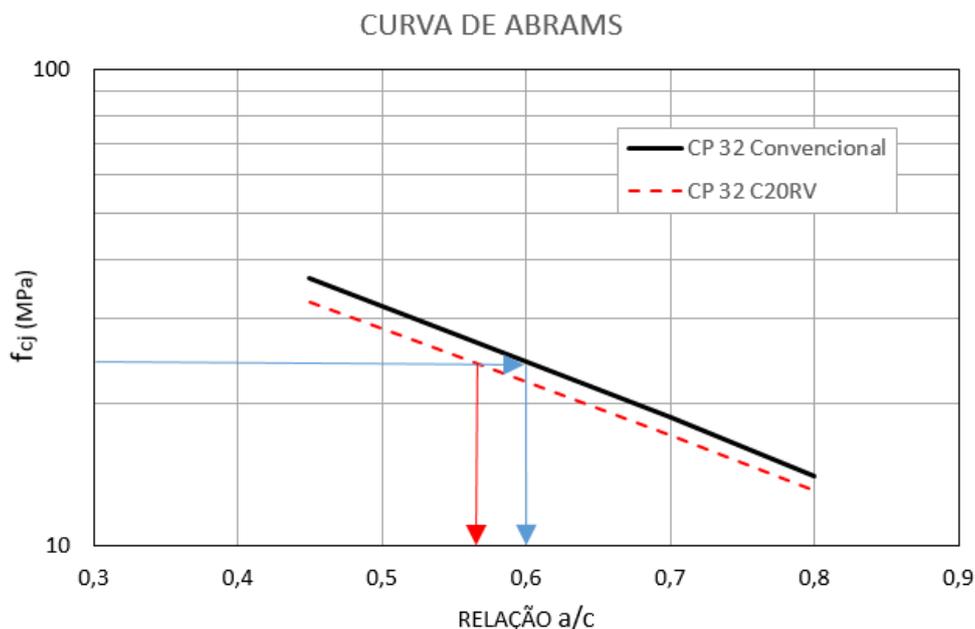


Figura 44 - Gráfico da curva de Abrams para concreto com 20% de resíduo de vidro.  
Fonte: acervo do autor

#### 4.2.4 Artefatos produzidos com a CA20RVM

Durante a pesquisa foram produzidas peças como: cobogó (empregado para dividir ambientes), tijolos para alvenarias, paver para pavimentação e vaso para plantas, como ilustra a figura 45. Sendo assim, a CA20RVM mostrou-se bastante viável e sem dificuldades na moldagem dos artefatos de cimento.



Figura 45 - Artefatos com resíduo de vidro moído. Fonte: acervo do autor  
(a) Cobogó; (b) Tijolo; (c) Paver; (d) Vaso para plantas

## 5. CONCLUSÕES

A Indústria da Construção Civil é uma das maiores consumidoras dos recursos naturais e também a responsável por transformar o ambiente natural em ambiente construído. Se a construção civil privilegiasse materiais menos agressivos ao meio ambiente assim como recicláveis em geral, reduziria significativamente o impacto ambiental (LAMBERTS et al., 2007).

A revisão bibliográfica mostrou que o resíduo de vidro gerado é um grave problema ambiental, sendo necessário buscar alternativas para seu uso, a fim de minimizar os impactos causados pelo seu descarte de forma incorreta.

Este projeto de pesquisa mostra que os resíduos vítreos provenientes do processo de moagem da sucata de vidro concebidos pela COOTAFRA, na cidade de Pelotas/RS, podem ser utilizados como material de construção, enquanto agregado. O reaproveitamento desse resíduo na indústria da construção civil é viável, considerando sua utilização na produção de concretos convencionais, pois produziu resultados muito satisfatórios, quando comparados com os concretos de referência.

A inserção do resíduo de vidro em substituição da areia na produção de concretos, tende a reduzir o custo do concreto, visto que, promove a redução da quantidade de areia a ser usada. A reciclagem do resíduo de vidro evita o descarte inadequado, tornando os concretos produzidos com a substituição parcial do agregado miúdo um material de construção sustentável, intensificando a cadeia produtiva do vidro, dando um novo destino ao material que antes era simplesmente descartado em lixões.

As conclusões deste estudo podem ser resumidas da seguinte forma:

- a. A classificação do resíduo de vidro moído proveniente da coleta seletiva da COOTAFRA mostrou-se com textura lisa irregular, mas atendendo os requisitos atuais de qualidade da norma para areia natural;
- b. Na preparação dos traços de concreto com a CA20RVM não foi possível provar diferença na trabalhabilidade das misturas. O abatimento em geral, independente da relação água/cimento, manteve-se baixo, apresentando um aspecto coeso, plástico e dentro da faixa de abatimento aceitável para a moldagem de peças de concreto;

- c. As misturas com a CA20RVM não apresentaram diferença significativa no valor da massa específica em relação ao concreto de referência;
- d. Os resultados alcançados no ensaio de resistência à compressão axial mostraram, primeiramente, que todas as misturas traçadas com a CA20RVM ultrapassaram a resistência à compressão estimada e não atingiram a resistência à compressão do concreto de referência;
- e. As análises demonstraram que concretos com adição de vidro requerem uma relação água/cimento menor para alcançar resistência equivalente ou superior à do concreto de referência.

A pesquisa demonstra que o concreto com adição de resíduo de vidro pode ser empregado para uso estrutural, pois resistências acima de 25 MPa aos 28 dias foram registradas para todas as relações água/cimento ensaiadas. Ainda como possibilidade, ou apenas com o intuito de reduzir o descarte de vidro de forma inadequada, podemos utilizar o concreto com adição de vidro moído na produção de peças de concreto não estrutural.

Durante a realização desse trabalho despertou o interesse por outros ensaios, que foram inviáveis devido ao acesso restrito a laboratórios de pesquisa e ao tempo disponível para a mesma. À vista disso, sugere-se algumas análises para trabalhos futuros:

- Realizar estudos das resistências à tração por compressão diametral e à bração;
- Estudar o comportamento do módulo de elasticidade;
- Avaliar a zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento por microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- Realizar o estudo das resistências para além dos 28 dias de cura;
- Analisar as propriedades mecânicas de concretos com misturas areia com maiores teores de substituição;
- Estudar o comportamento da trabalhabilidade de concretos frescos para outras misturas areia com maiores teores de substituição;
- Verificar a influência da adição de adjuvante e plastificante;
- Estudar os efeitos da reação expansiva do tipo álcali-sílica;
- Verificar as novas relações água/cimento propostas nesta pesquisa.

## 6 REFERÊNCIAS

### 6.1 Referências Normativas

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

\_\_\_\_\_. **NBR 5739:** concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 6023:** Informação e documentação – Referência – Elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

\_\_\_\_\_. **NBR 6024:** Informação e documentação numeração progressiva das seções de um documento - Apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 6027:** Informação e documentação - Sumário - Apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 6028:** Informação e documentação - Resumo - Apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto - Procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211:** Agregados para concreto. Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215:** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

\_\_\_\_\_. **NBR 7222:** Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 7251:** Determinação de Massa Unitaria. Rio de Janeiro: ABNT, 1982.

\_\_\_\_\_. **NBR 7584:** Concreto endurecido — Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão — Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 8953:** Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 9776:** Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR 9779:** Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 9833:** Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 10520:** Informação e documentação - Citações em documentos – Apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

\_\_\_\_\_. **NBR 11706:** Vidro na construção civil. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 12042:** Materiais inorgânicos — Determinação do desgaste por abrasão. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 12653:** Materiais Pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 12655:** Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 14724:** Informação e documentação – Trabalhos acadêmicos - Apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 14931:** Execução de Estruturas de Concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 15900-1:** Água para amassamento do concreto. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 15900-3:** Água para amassamento do concreto. Parte 3: Avaliação preliminar. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 16607:** Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 16697:** Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 16886:** Concreto — Amostragem de concreto fresco. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

\_\_\_\_\_. **NBR 16889:** Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 15:** Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 26:** Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45:** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 46:** Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

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

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

\_\_\_\_\_. **NM ISO 3310-2:** Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação. Parte 2: Peneiras de ensaio de chapa metálica perfurada. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

## 6.2 Referências Bibliográficas

ABIVIDRO - Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro. 2018. Disponível em: <https://abividro.org.br/2019/02/07/vidro-o-residuo-infinitamente-reciclavel/>. Acesso em 08 abril 2021.

ABRAMS, D. A. Design of Concrete Mixtures. Chicago, Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, 1918. Bulletin 1.

ABRAVIDRO - Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos. Disponível em: <https://abraavidro.org.br/>. Acesso em: 08 abril 2021.

ABRAVIDRO - Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos. 2021. Disponível em: <https://abraavidro.org.br/punoticias/panorama-abraavidro-2021-mostra-crescimento-do-setor-no-ano-passado/>. Acesso em: 13 maio 2022.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Disponível em: <https://abrelpe.org.br>. Acesso em 08 abril 2021.

ADAWAY, M.; WANG, Y. Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in structural concrete – Effects on compressive strength. **Revista Eletrônica de Engenharia Estrutural**, v. 14, n. 1, pág. 116-122, 2015. Disponível em: <https://ejsei.com/EJSE/article/download/195/194>. Acesso em: 27 maio 2022.

AGÊNCIA BRASIL – Empresa Brasileira de Comunicação. **Consumo de recursos naturais superou o que o mundo pode renovar no ano.** Reportagem por Camila Boehm – Publicado em 01 de agosto de 2018. São Paulo. Disponível em:

<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2018-08/consumo-de-recursos-naturais-superou-que-o-planeta-pode-renovar-no-ano>. Acesso em: 04 maio 2022.

AKERMAN, M. Apostila de introdução ao vidro e sua produção. Ed. 2013. Disponível em: <http://www.certev.ufscar.br/documentos/arquivos/introducao-ao-vidro> Acesso em 22 setembro 2019.

ALMEIDA, D. H. de. Adição de resíduo de louça sanitária como agregado em diferentes formulações de concreto. Poços de Caldas, 2017. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, Minas Gerais, 2017.

ALMEIDA, F. **Justiça Federal revoga liminar e libera extração de areia no Rio Jacuí** (Reportagem Geral da RBS TV em 12 de jul. de 2013). Disponível em: <http://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2013/07/justica-federal-revoga-liminar-e-libera-extracao-de-areia-no-rio-jacui.html>. Acesso em 14 março 2022.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 211.1-81: Standart practice for selecting proportions for normal, heavyweight and mass concrete: ACI manual of concrete practice. Detroit, Michigan, 1985. (revised 1988). Part 1: materials and general properties of concrete.

ASTMC1202, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, in ASTM C1202, ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, (2012).

AS1141.60.1, Methods for Sampling and Testing Aggregates, Method 60.1: Potential Alkali-Silica Reactivity - Accelerated Mortar Bar Method, in Australian Standards AS 1141.60.1. (2014).

ARABANI, M. Effect of glass cullet on the improvement of the dynamic behaviour of asphalt concrete. **Construction and Building Materials** , v. 25, n. 3, pág. 1181-1185, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.043>. Acesso em: 26 maio 2022.

AZEVEDO, C. A. Avaliação da utilização de vidro cominuído como material agregado ao concreto. 2002. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia: Energia, Ambiente e Materiais) - Universidade Luterana do Brasil, 2002.

BARBOZA, A. S. R.; BARBIRATO, J. C. C.; SILVA, M. M. C. P. Avaliação do uso de bambu como material alternativo para execução de habitação de interesse social. **Ambiente Construído**, v.8, p. 115- 129, 2008. Disponível em: [https://ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgec/artigos\\_periodicos](https://ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgec/artigos_periodicos). Acesso em: 13 jun 2022.

BARBOZA, C. S.; SARTI, G.; OMIDO, A. R. Revisão de parâmetros para agregados oriundos do processamento de vidros reciclados para aplicação em concretos. Artigo (1º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade). Gramado, RS. Jun. 2018.

BARROSO, L. B.; MOHAMAD, G.; LOPES, M. I. P.; MACIEL, A. V. Viabilidade Tecnológica para o Uso do Vidro Moído em Argamassa e Concreto. **Anais do 52º Concreto Brasileiro do Concreto**. Fortaleza, IBRACON 2010. Acesso em 28 outubro 2021.

BLANC, R. L.; RUBIN, D. The decomposition of waste in landfills. **A Story of Time and Materials**. 2021. Disponível em: <https://www.thebalancesmb.com/how-long-does-it-take-garbage-to-decompose-2878033>. Acesso em: 15 maio 2022.

BOGGIO, Aldo J.: Estudo comparativo de métodos de dosagem de concretos de cimento Portland. Porto Alegre: Dissertação URGS, 2000. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/12575/000628682.pdf?sequence=1>. Acesso em: 22 nov 2021.

BOSTANCI, S. C. Use of waste marble dust and recycled glass for sustainable concrete production. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 251, p. 119785, abr. 2020. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119785>. Acesso em: 27 maio 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução no 307, de 05 de julho de 2002. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, Distrito Federal, nº 136, 17 de julho de 2002. Seção 1,

p. 95-96. Disponível em:  
<https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=17/07/2002&jornal=1&pagina=96&totalArquivos=104>. Acesso em 02 dezembro 2021.

CA.gov. Just the Facts. CAWeb Publishing Service. **California State Portal**, USA, 2022. Disponível em: <https://calrecycle.ca.gov/bevcontainer/consumers/facts/>. Acesso em: 15 maio 2022.

CADERNOS DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL – RESÍDUOS SÓLIDOS – Governo do Estado de São Paulo – Secretaria do Meio Ambiente – São Paulo - 2ª edição. 2014. Disponível em: <http://arquivos.ambiente.sp.gov.br/cea/2014/11/6-RES%C3%8DDUOS-S%C3%93LIDOS.pdf>. Acesso em 01 novembro 2021.

CAMARATE, D. J. de B. L. Incorporação de vidro reciclado em betões : análise da influência do processo de amassadura no agregado reciclado de vidro. 2016. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia, Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10437/7794>. Acesso em: 20 maio 2022.

CASTRO, S. de; BRITO, J. de. Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates, **J. Clean. Product**. 41 (2013) 7–14, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.021>. Acesso em: 19 maio 2022.

CARMO, M. E. R. do; FERNANDES, F. A. da S; LOPES, S. C.; MOREIRA, K. C. B.; VERONESE, R. B. A. Caracterização da resistência à compressão uniaxial de concreto com substituição parcial de cimento Portland por vidro sodo-cálcico moído. Artigo (73º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração) DOI:10.5151/1516-392X-31392. São Paulo, São Paulo, Brasil. 2018.

CARPENTER, A. J.; CRAMER, C. M. Mitigation of ASR in pavement patch concrete that incorporates highly reactive fine aggregate. *Transportation Research Record* 1668, Paper No. 99-1087, pp. 60- 67, jan.1999. Disponível em: <https://doi.org/10.3141%2F1668-09>. Acesso em: 25 maio 2022.

CEBRACE. 2014 – Definição do Vidro. Disponível em: <https://www.cebrace.com.br/#!/enciclopedia/interna/a-historia-do-vidro>. Acesso em 08 abril 2021.

CEMPRE. 2019: Compromisso Empresarial para Reciclagem. Disponível em: <http://cempre.org.br/upload/CEMPRE-Review2019.pdf>. Acesso em 12 de março 2020.

CORDEIRO, R. dos S.; MONTEL, A. L. B. Estudo da viabilidade para a produção de concretos com adição de resíduos de vidro em substituição ao agregado miúdo na cidade de Palmas - TO. DESAFIOS, 2 (2015): 104-123. Disponível em: <https://doi.org/10.20873/uft.2359-3652.2015v2nespp104>. Acesso em 05 jun 2022.

CRENTSIL, K. S; BROWN, T.; TAYLOR, A. Recycled glass as sand replacement in premix concrete, Ed. Eco-Recycled Australia and CSIRO, v. 44. 2001.

DIAS, G. G; CRUZ, T. M. de SÁ. Plano De Gerenciamento Integrado De Resíduos Vítreos. Fundação Estadual do Meio Ambiente : Fundação Israel Pinheiro, 24p.; il. Esplanada, Belo Horizonte, 2009. CDU – 628.4:661.683 Disponível em: [http://www.feam.br/images/stories/minas\\_sem\\_lixoes/2010/vidros.pdf](http://www.feam.br/images/stories/minas_sem_lixoes/2010/vidros.pdf). Acesso em 24 março 2022.

GAUTAM, S. P.; SRIVASTAVA, V.; AGARWAL, V. C. Use of glass wastes as fine aggregate in Concrete. **J. Acad. Indus. Res** , vol. 1 (6), pág. 320-322, nov. 2012. Civil Engg. Dept., SHIATS (formerly AAI-DU), Allahabad-211007, UP, India. ISSN: 2278-5213. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Vikas-Srivastava-8/publication/278299013\\_Use\\_of\\_glass\\_wastes\\_as\\_fine\\_aggregate\\_in\\_Concrete/links/557e826c08aeea18b777c97b/Use-of-glass-wastes-as-fine-aggregate-in-Concrete.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Vikas-Srivastava-8/publication/278299013_Use_of_glass_wastes_as_fine_aggregate_in_Concrete/links/557e826c08aeea18b777c97b/Use-of-glass-wastes-as-fine-aggregate-in-Concrete.pdf). Acesso em: 23 maio 2022.

GUO, P.; MENG, W.; NASSIF, H.; GOU, H.; BAO, Y. New perspectives on recycling waste glass in manufacturing concrete for sustainable civil infrastructure. **Construction And Building Materials**, [S.L.], 384 v. 257, p. 119579, out. 2020. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119579>. Acesso em: 14 maio 2022.

GUIGNONE, G. C. Desempenho de concretos com a utilização de resíduos da lapidação do vidro como substitutos parciais ao cimento. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, Vitória, 2017.

HARRISON, E.; BERENJIAN, A.; SEIFAN, M. Recycling of waste glass as aggregate in cement-based materials. **Environmental Science and Ecotechnology**, v. 4, p. 100064, out. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ese.2020.100064>. Acesso em: 24 maio 2022.

IAN, T. **Key figures on glass recycling worldwide as of 2018**. Published in Aug 10, 2020. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/1055604/key-figures-glass-recycling-globally/>. Acesso em: 15 maio 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Portal do Governo Brasileiro**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rs/pelotas.html>. Acesso em: 01 dez. 2021.

ISMAIL, Z. Z.; AL-HASHMI, E. A. Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete, **Waste Manage**. 29 (2) (2009) 655–659, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.08.012>. Acesso em: 18 maio 2022.

JAIN, K. L.; SANCHETI, G.; GUPTA, L. K. Durability performance of waste granite and glass powder added concrete. **Construção e Materiais de Construção**, v. 252, p. 119075, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119075>. Acesso em: 27 maio 2022.

JARDIM, P. I. L. G.; LOPES, R. K.; PIOVESAN, J. C.; JARDIM, L. C. J. G. (2022). Análise da utilização do resíduo de vidro em concretos e argamassas de cimento portland. **Revista de engenharia e tecnologia**, 14(1). Disponível em: <https://www.revistas.uepg.br/index.php/ret/article/download/19870/209209216413/>. Acesso em: 13 maio 2022.

JURAS, I. da A. G. M. Legislação sobre resíduos sólidos: Exemplos da Europa, Estados Unidos e Canadá. Nota Técnica (Consultoria Legislativa da Área XI - Meio

Ambiente e Direito Ambiental, Organização Territorial, Desenvolvimento Urbano e Regional), p. 3-9, 2005. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4059908/mod\\_resource/content/1/AULA%204%20-%20RECOMENDADA%20legislacao\\_residuos\\_juras.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4059908/mod_resource/content/1/AULA%204%20-%20RECOMENDADA%20legislacao_residuos_juras.pdf). Acesso em: 13 jun 2022.

LAMBERTS, R.; TRIANA, M. A.; FOSSATI, M.; BATISTA, J. O. Sustentabilidade nas edificações: contexto internacional e algumas referências brasileiras na área. 2007. Disponível em: [http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/documents/sustentabilidade\\_nas\\_edificacoes\\_contexto\\_internacional\\_e\\_algumas\\_referencias\\_brasileiras\\_na\\_areasustentabilidade\\_nas\\_edificacoes\\_contexto\\_internacional\\_e\\_algumas\\_referencias\\_brasileiras\\_na\\_area.pdf](http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/documents/sustentabilidade_nas_edificacoes_contexto_internacional_e_algumas_referencias_brasileiras_na_areasustentabilidade_nas_edificacoes_contexto_internacional_e_algumas_referencias_brasileiras_na_area.pdf). Acesso em: 13 jun 2022.

LEI Nº 12.305 DE 02 DE AGOSTO DE 2010. D.O.U. de 03/08/2010, pág. nº 3. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm). Acesso em 14 março 2022.

LIMA, S. A.; ROSSIGNOLO, J. A. Estudo das características químicas e físicas da cinza da casca de castanha de caju para uso em materiais cimentícios. **Acta Scientiarum Technology**, v.32, p. 383-389, 2010. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciTechnol/article/download/7434/7434>. Acesso em: 20 out 2021.

LIMBACHIYA, M. C. Bulk engineering and durability properties of washed glass sand concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 1078-1083, fev 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.05.022>. Acesso em: 14 jun 2022.

LOPES, R. K. Utilização de resíduo moído de vidro industrial na confecção de argamassa de cimento Portland em Porto Velho/RO. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas. 2017, 107 f. Disponível em: [https://tede.ufam.edu.br/bitstream/tede/6214/5/Disserta%C3%A7%C3%A3o\\_Raduan%20K.%20Lopes.pdf](https://tede.ufam.edu.br/bitstream/tede/6214/5/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Raduan%20K.%20Lopes.pdf). Acesso em: 27 maio 2022.

LÓPEZ, D. A. R.; AZEVEDO, C. A. P. de; BARBOSA NETO, E. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com vidro cominuído como agregado fino. **Cerâmica**, v. 51, p. 318-324, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132005000400003>. Acesso em 23 maio 2022.

MALIK, M. I.; BASHIR, M; AHMAD, S; TARIQ, T.; CHOWDHARY, U. Study of Concrete Involving Use of Waste Glass as Partial Replacement of Fine Aggregates. **IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)**. e-ISSN: 2250-3021, p-ISSN: 2278-8719, vol. 3 (7), pág. 8-13, jul 2013. Disponível em: [http://www.iosrjen.org/Papers/vol3\\_issue7\\_%20\(part-6\)/B03760813.pdf](http://www.iosrjen.org/Papers/vol3_issue7_%20(part-6)/B03760813.pdf). Acesso em: 23 maio 2022.

MATIAS, D.; de BRITO, J. Incorporação de adjuvantes em betões produzidos com agregados grossos reciclados de betão. **Construção**, 2004, pp. 339 e 344. FEUP, Porto, Portugal. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Jorge-Brito-13/publication/283516555\\_Incorporacao\\_de\\_Adjuvantes\\_em\\_Betoes\\_Produzidos\\_cc\\_o\\_Agregados\\_Grossos\\_Reciclados\\_de\\_Betao/links/563d092d08ae34e98c4ad186/Incorporaca-de-Adjuvantes-em-Betoes-Produzidos-com-Agregados-Grossos-Reciclados-de-Betao.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Jorge-Brito-13/publication/283516555_Incorporacao_de_Adjuvantes_em_Betoes_Produzidos_cc_o_Agregados_Grossos_Reciclados_de_Betao/links/563d092d08ae34e98c4ad186/Incorporaca-de-Adjuvantes-em-Betoes-Produzidos-com-Agregados-Grossos-Reciclados-de-Betao.pdf). Acesso em: 15 jun 2022.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto. Microestrutura, Propriedades e Materiais. 3ª ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, p. 674, 2008. Disponível em: [https://scholar.google.com.br/scholar?start=10&q=MEHTA,+P.+K.%3B+MONTEIRO,+P.+J.+M.&hl=pt-BR&as\\_sdt=0,5](https://scholar.google.com.br/scholar?start=10&q=MEHTA,+P.+K.%3B+MONTEIRO,+P.+J.+M.&hl=pt-BR&as_sdt=0,5). Acesso em: 27 jun 2022.

MIRANDA JÚNIOR., E. J. P.; BEZERRA, H.D.J.C.L.; POLITI, F.S.; PAIVA, A. E. M. Increasing the compressive strength of Portland cement concrete using flat glass powder. **Materials Research**, v. 17, p. 45-50, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/mr/a/LRKrfQtXxq5Cq5GT9tTxf4z/abstract/?lang=en>. Acesso em: 28 jun 2022.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. **Anuário Estatístico do Setor Transformação de Não**

**Metálicos.** 15<sup>a</sup> ed. Brasília, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/publicacoes-1/anuario-estatistico-do-setor-metalurgico-e-do-setor-de-transformacao-de-nao-metalicos/anuario-estatistico-do-setor-de-transformacao-de-nao-metalicos-2020-ano-base-2019.doc/view>. Acesso em: 22 março 2022.

MONTIBELLER FILHO, G. O mito do desenvolvimento sustentável: Meio ambiente e custos sociais no moderno sistema produtor de mercadorias. 3. ed. rev. e atual. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2008.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. Tecnologia do concreto. 2. ed. Porto Alegre. Bookman, 448 p. 2010. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=cqY5AgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR4&dq=NEVILLE,+A.+M.%3B+BROOKS,+J.+J.+Tecnologia+do+concreto.+2.+ed.+Porto+Alegre.+Bookman,+448+p.+2010.&ots=RXsJzDsQY&sig=fliaRmrGNIHENivZIQiO4Neo0Qg>. Acesso em: 27 jun 2022.

OLIVEIRA, L.; GOMES, J.; SANTOS, P. Avaliação de Desempenho da Substituição da Areia Natural por Areia de Resíduos de Vidro em Betões Estruturais. ENCONTRO NACIONAL BETÃO ESTRUTURAL, Guimarães, 5,6 e 7 de novembro de 2008. Disponível em: <http://www.hms.civil.uminho.pt/events/be2008/305.pdf>. Acesso em: 31 maio 2022.

PARK, S. B.; LEE, B. C.; KIM, J. H. Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 12, pág. 2181-2189, dez. 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.006>. Acesso em: 30 maio 2022.

PORTAL RESÍDUOS SÓLIDOS. Disponível em: <https://portalresiduossolidos.com/reciclagem-de-vidro/>. Acesso em 01 nov. 2021.

QUAGLIO, V. Vidro: história e reciclagem. Disponível em: <http://www.setorreciclagem.com.br/reciclagem-de-vidro/vidro-historia-reciclagem/>. Acesso em 28 out. 2021.

QUITETE, E.B. Dureza Knoop em rochas para revestimento: metodologia e correlação com desgaste abrasivo. 2002. Dissertação (Mestrado) – Escola

Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001244949>. Acesso em: 27 jun 2022.

RIGHI, D.; KÖHLER, L.; TABARELLI, A.; KIRCHHOFF, L.; LIMA, R. Efeitos da Substituição de Areia por Vidro Moído no Comportamento de Concretos em Elevadas Temperaturas. **Engenharia Estudo e Pesquisa**, v. 11, n. 2, p. 28-35, 2011. Disponível em: [http://www.abperevista.com.br/imagens/volume11\\_02/cap03.pdf](http://www.abperevista.com.br/imagens/volume11_02/cap03.pdf). Acesso em: 30 maio 2022.

RODRIGUES, P. P. F. Parâmetros de Dosagem de concreto. ET - 67. 3 ed. São Paulo: IBRACON – Associação Brasileira de Cimento Portland, 1998.

SANTOS, A. Uso de vidro moído como agregado limita o concreto. 29 dez 2015. Disponível em: < [http:// www.cimentoitambe.com.br/vidro-moido-como-agregado/](http://www.cimentoitambe.com.br/vidro-moido-como-agregado/) >. Acesso em 31 jan 2022.

SHAO, Y.; LEFORT, T.; MORAS, S.; RODRIGUEZ, D. Studies on concrete containing ground waste glass. **Cement and concrete research**, v. 30, n. 1, p. 91-100, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00213-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00213-6). Acesso em: 03 jun 2022.

SCHUNCK, J. Ano Internacional do Vidro. **Correio do Cidadão**, fev. 2022. Disponível em: <https://www.correiodocidadao.com.br/ultimas-noticias/2022-ano-internacional-do-vidro/>. Acesso em: 16 maio 2022.

SERVIÇO AUTÔNOMO DE SANEAMENTO DE PELOTAS – SANEP. Declaração em 13/07/2020 do coordenador do departamento responsável na autarquia, Edson Plá Monterosso. Disponível em: <https://portal.sanep.com.br/noticia/coleta-de-residuos-percorre-60-mil-km-por-mes-e-alcanca-100-da-zona-urbana>. Acesso em 01 dez. 2021.

SHARIFI, Y.; HOUSHIAR, M.; AGHEBATI, B. Recycled glass replacement as fine aggregate in self-compacting concrete, *Front. Struct. Civil Eng.* 7 (4) (2013) 419–428. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11709-013-0224-8>. Acesso em: 17 maio 2022.

SHI, C.; ZHENG, K. A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. 2007. *Resources, Conservation and Recycling* 52 (2), 234-247. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.01.013>. Acesso em: 19 maio 2022.

SIMÕES, L. J. Estudo da aplicação de resíduo de vidro laminado na produção de concreto. Vitória. p. 25. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2013. Disponível em: [http://repositorio.ufes.br/bitstream/10/3968/1/tese\\_7343\\_Lorena%20Jodoni%20Sim%C3%B5es.pdf](http://repositorio.ufes.br/bitstream/10/3968/1/tese_7343_Lorena%20Jodoni%20Sim%C3%B5es.pdf). Acesso em: 13 jun 2022.

SICHERI, E. P.; CARAM, R.; dos SANTOS, J. C. P. Vidros na construção civil. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. v. 2. 1 ed. São Paulo, IBRACON, 2007. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001709972>. Acesso em: 27 jun 2022.

SU, N.; CHEN, J. S. Engineering properties of asphalt concrete made with recycled glass. **Resources, Conservation and Recycling**. Volume 35, issue 4, June 2002, pages 259-274. Elsevier. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(02\)00007-1](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(02)00007-1). Acesso em: 06 jun 2022.

TAHA, B.; NOUNU, G. Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 5, pages 713-720, maio 2008. Elsevier. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.019>. Acesso em: 21 jun 2022.

TAN, K. H.; DU, H. Use of waste glass as sand in mortar: Part I – Fresh, mechanical and durability properties. **Cement and Concrete Composites**, v. 35, n. 1, pág. 109-117, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.028>. Acesso em: 27 maio 2022.

TAMANNA, N.; TULADHAR, R.; SIVAKUGAN, N. Performance of recycled waste glass sand as partial replacement of sand in concrete. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 239, p. 117804, abr 2020. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117804>. Acesso em: 27 maio 2022.

TOPÇU, I. B.; CANBAZ M. - Properties of concrete containing waste glass. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 2, pág. 267-274, fev 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.07.003>. Acesso em: 31 maio 2022.

VERDE GHAIA RESÍDUOS. Como a reciclagem de embalagens de vidro pode ampliar seu negócio. 2018. Disponível em: <https://www.vgresiduos.com.br/blog/como-a-reciclagem-de-embalagens-de-vidro-pode-ampliar-seu-negocio/>. Acesso em: 09 março 2022.