

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

LETICIA DE SOUZA CASSIMIRO LIMA

**AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA E DO DESEMPENHO DO RESÍDUO
DE VIDRO MOÍDO COMO SUBSTITUTO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND EM
CONCRETO ESTRUTURAL**

**Alegrete
2022**

LETICIA DE SOUZA CASSIMIRO LIMA

**AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA E DO DESEMPENHO DO RESÍDUO
DE VIDRO MOÍDO COMO SUBSTITUTO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND EM
CONCRETO ESTRUTURAL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof.^a Dr.^a Chiara Valsecchi

**Alegrete
2022**

LETICIA DE SOUZA CASSIMIRO LIMA

AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA E DO DESEMPENHO DO RESÍDUO DE VIDRO
MOÍDO COMO SUBSTITUTO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND EM CONCRETO
ESTRUTURAL

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de
Engenharia Civil da Universidade
Federal do Pampa, como requisito
parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 13 de fevereiro de 2023.

Banca examinadora:

Profa. Dra. CHIARA VALSECCHI - UNIPAMPA - Orientadora

Profa. Dra. FERNANDA BIANCHI PEREIRA DA COSTA - UNIPAMPA

Prof. Me. MAURICIO SILVEIRA DOS SANTOS - UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **CHIARA VALSECCHI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 28/02/2023, às 08:49, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **FERNANDA BIANCHI PEREIRA DA COSTA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 28/02/2023, às 10:30, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MAURICIO SILVEIRA DOS SANTOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 28/02/2023, às 18:28, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site
https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador
1065732 e o código CRC **D1CD9F46**.

RESUMO

A construção civil é e sempre será necessária para sociedade e relevante para o desenvolvimento econômico. Por outro lado, este setor é responsável por gerar muitos resíduos e consumir recursos naturais não renováveis. Em vista disso, a preocupação com a sustentabilidade e a criação de metas para reduzir os impactos ambientais é legítima e de suma importância para construção civil. Nesta linha, o presente trabalho tem como foco buscar a diminuição do uso do cimento Portland (principal matéria-prima do concreto), que é o material mais empregado neste setor e dar um destino mais sustentável ao resíduo de vidro proveniente da produção anual de mais de um milhão de toneladas de embalagens vítreas. Para tal, o objetivo foi a produção de concreto estrutural com substituição parcial do cimento em diferentes porcentagens por resíduo de vidro moído sujo (impurezas oriundas do processo de logística reversa do vidro até a etapa de triagem). Para verificar a viabilidade deste emprego do resíduo de vidro, o procedimento experimental se dividiu em cinco etapas: coleta, preparo (trituração, moagem e peneiramento do resíduo), avaliação da atividade pozolânica, moldagem dos corpos de prova de concreto (traço de referência, com 8% e 16% de substituição), e por fim, os ensaios de controle (resistência à compressão e à tração e absorção de água por capilaridade). O resíduo de vidro moído não apresentou atividade pozolânica, e não resultou em melhorias nas propriedades analisadas, contudo, em relação a resistência à compressão e à tração, os decréscimos não são significativos. Deste modo, um estudo a respeito da constituição mais detalhada do resíduo e suas impurezas deveria ser realizado para o melhor entendimento dos resultados obtidos.

Palavras-Chave: vidro, atividade pozolânica, concreto estrutural.

ABSTRACT

Civil construction is and always will be necessary for society and relevant for economic development. On the other hand, this sector is responsible for generating a lot of waste and for consuming non-renewable natural resources. Therefore, the concern with sustainability and the creation of goals to reduce environmental impacts is legitimate, and of utmost importance for civil construction. In this line, this work focuses on reducing the use of Portland cement (the main raw material of concrete), which is the most used material in this sector and to give a more sustainable destination for glass waste from the annual production of more than one million tons of glass containers. To this end, the objective was the production of structural concrete with partial replacement of cement in different percentages by dirty ground glass waste (impurities from the glass reverse logistics process up to the sorting stage). To verify the feasibility of this use for glass waste, the experimental procedure was divided into five stages: collection, preparation (crushing, grinding and sieving of the waste), evaluation of pozzolanic activity, molding of concrete specimens (reference mix, with 8% and 16% substitution), and finally, the control tests (compressive and tensile strength and water absorption by capillarity). The ground glass residue did not show pozzolanic activity, and did not result in improvements in the analyzed properties, however, in relation to compressive and tensile strength, the decreases are not significant. Thus, a study regarding the more detailed constitution of the residue and its impurities should be carried out for a better understanding of the results obtained.

Keywords: Glass, pozzolanic activity, structural concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo da logística reversa do vidro.....	17
Figura 2 – Materiais utilizados.....	25
Figura 3 – Gráfico da distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	27
Figura 4 – Gráfico da distribuição granulométrica do agregado graúdo	27
Figura 5 – Resíduo de vidro triturado	28
Figura 6 – Fluxograma do procedimento experimental.....	29
Figura 7 – Britador de mandíbula MOD.: BB 200 Retsch®.....	32
Figura 8 – Resíduo de vidro após separação por peneiramento	33
Figura 9 – Agitador de peneiras:	33
Figura 10 – Moinho de bolas com motor de indução.....	34
Figura 11 – Ensaio de compressão CP 50 x 100 mm.....	35
Figura 12 – Medida do abatimento do tronco de cone.....	37
Figura 13 – Ensaio de compressão CP 100 x 200 mm.....	39
Figura 14 – Ensaio de absorção de água.....	40
Figura 15 – Ensaio de tração CP 100 x 200 mm.	41
Figura 16 – Resultados médios do ensaio de resistência à compressão.....	44
Figura 17 – Absorção média de água durante o ensaio de 3h a 72h.....	46
Figura 18 – Resultados médios do ensaio de absorção de água por capilaridade após 72h.	46
Figura 19 – Resultados médios do ensaio de resistência à tração.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química de vidros sodo-cálcicos comerciais	16
Tabela 2 – Resultados médios de ensaios de resistência de concretos	22
Tabela 3 – Traços do concreto com substituição do cimento por RVM e consumo real do cimento (C).	30
Tabela 4 – Nomenclatura das composições do concreto	31
Tabela 5 – Quantidades em massa dos materiais.....	34
Tabela 6 – Quantitativo de CPs para cada traço confeccionado	37
Tabela 7 – Resultados de Resistência à Compressão e DRM	42
Tabela 8 – Resultados de Resistência à Compressão: Média, Desvio e CV_e	43
Tabela 9 – Valor-p para comparação das resistências à compressão em 7 e 28 dias	45
Tabela 10 – Resultados de Absorção de água por capilaridade.....	45
Tabela 11 - Valor-p para comparação da absorção de água por capilaridade em 72h	47
Tabela 12 – Resultados de Resistência à Tração: Média, Desvio e CV_e	47
Tabela 13 - Valor-p para comparação das resistências à tração em 32 dias.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

% – Porcentagem

" – Polegada

± – mais ou menos

° – grau

°C – Grau Celsius

Ø – Diâmetro

µm – Micrômetro

a/c – Relação água/cimento

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AC – Absorção de água por capilaridade

AS – Aditivo superplastificante

C – Consumo real do cimento.

CP – Corpo de prova

CP V-ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial

CPs – Corpos de prova

CV_e – Coeficiente de variação

DRM – Desvio relativo máximo

g – Grama

GOMNDI – Grupo de Óptica Micro e Nanofabricação de Dispositivos

h – Hora/Horas

Hz – Hertz

kg – Quilograma

kWh – Quilowatt-hora

l. – Litro/litros

I_{cimento} – Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias

LEMAC – Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção

LMCC – Laboratório de Materiais de Construção Civil

MCS – Materiais cimentícios suplementares

min – Minuto/minutos

mm – Milímetro

MPa - Mega Pascal

MPa/s – Mega Pascal por segundo

m_s – Massa seca

m_{sat} – Massa saturada

NBR – Norma Brasileira

NM – Norma Mercosul

RAA – Reação álcali-agregado

RAS – Reação álcali-sílica

REF – Traço de concreto referencial sem substituição

REF-AP – Traço de argamassa referencial sem substituição

RPM – Rotações por minuto

RV – Resíduo de vidro

RVM – Resíduo de vidro moído

RVM-08 – Traço com substituição parcial do cimento Portland por 8% de RVM

RVM-16 – Traço com substituição parcial do cimento Portland por 16% de RVM

RVM-25 – Traço de argamassa com substituição parcial do cimento Portland por 25% de RVM

s – Segundo

UFMS – Universidade Federal de Santa Maria

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos.....	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos específicos.....	15
2	CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1	Vidro	16
2.1.1	Reciclagem do vidro	17
2.1.2	Resíduo de vidro	18
2.2	Cimento de alta resistência inicial	18
2.3	Concreto estrutural utilizando CP V-ARI	19
2.4	Substituição parcial do cimento por vidro moído em compósitos cimentícios	19
2.4.1	Propriedades relacionadas ao comportamento pozolânico.....	20
2.4.2	Propriedades relacionadas ao desempenho mecânico.....	21
2.4.3	Propriedades relacionadas a absorção de água	23
3	METODOLOGIA	25
3.1	Local de execução.....	25
3.2	Materiais.....	25
3.3	Caracterização dos materiais	26
3.3.1	Agregado miúdo	26
3.3.2	Agregado graúdo.....	27
3.3.3	Resíduo de vidro moído.....	28
3.4	Procedimento experimental.....	29
3.4.1	Definição dos traços do concreto	30
3.4.2	Preparação do resíduo de vidro	31

3.4.2.1	Trituração.....	31
3.4.2.2	Peneiração e moagem.....	32
3.4.3	Determinação da atividade pozolânica	34
3.4.4	Preparação dos agregados.....	35
3.4.5	Concretagem	36
3.4.5.1	Determinação da consistência	36
3.4.5.2	Moldagem e desmoldagem dos corpos de prova	37
3.4.6	Determinação da resistência à compressão axial.....	38
3.4.7	Determinação da absorção de água por capilaridade	39
3.4.8	Determinação da resistência à tração por compressão diametral.....	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1	Atividade pozolânica.....	42
4.2	Resistência à compressão axial	43
4.3	Absorção de água por capilaridade	45
4.4	Resistência à tração por compressão diametral.....	47
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	50
	REFERÊNCIAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a preocupação e discussão sobre a sustentabilidade ambiental vêm crescendo, evidenciando a importância de se atingir certas metas como: gestão sustentável e o uso eficiente de recursos naturais, redução do impacto ambiental negativo à qualidade do ar, e diminuição substancial da geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso mitigando significativamente a liberação destes para o ar, água e solo. Essas metas são parte dos 17 objetivos listados na Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), que é um acordo global em busca de um desenvolvimento sustentável com o intuito de atender as necessidades de todos os povos e nações do presente, sem afetar a viabilidade de gerações futuras de realizarem o mesmo; as metas são baseadas em três elementos fundamentais: proteção ao meio ambiente, crescimento econômico e inclusão social (STF, 2020).

A indústria da construção civil vem crescendo consideravelmente nas últimas décadas e possui uma posição significativa na economia, tendo em vista que é uma das mais relevantes atividades para o desenvolvimento socioeconômico. Neste contexto, levando em consideração que o concreto é o material mais empregado nesse setor e o segundo produto mais consumido na economia global, o cimento Portland (principal matéria-prima do concreto) se torna um dos materiais base no desenvolvimento da economia (MEHTA; MONTEIRO, 2008), resultando em uma produção de cimento Portland de larga escala, que em 2019 no Brasil e no mundo alcançou 56,6 mil e 4,1 milhões de toneladas, respectivamente (SNIC, 2020).

No entanto, esta produção consome grandes quantidades de recursos naturais não renováveis e energia. Estima-se que 40% dos insumos naturais extraídos são utilizados na construção civil (GHAVAMI, 2009), sendo que a produção de 1 tonelada de cimento Portland consome em média 1,6 tonelada de recursos naturais (JENNINGS; BULLARD, 2011) e perto de 100 kWh de fontes de energia incluindo a produção e transporte (KHONGPROM; SUWANMANEE, 2017). Além disso, o cimento Portland é responsável pela emissão de vários gases deletérios ao meio ambiente em escalas: local, afetando a qualidade do ar; regional, emitindo dióxido de enxofre (SO₂) e óxidos de nitrogênio (NO_x), principalmente o dióxido de nitrogênio (NO₂), que estão diretamente ligados à chuva ácida; e global emitindo dióxido de carbono de (CO₂), o principal gás responsável pelo aquecimento global

(HUNTZINGER; EATMON, 2009). Diante deste contexto, evidencia-se dados preocupantes: a pegada de carbono da indústria cimentícia em nível mundial é estimada em aproximadamente 5% do total das emissões antrópicas de carbono (WBCSD, 2010), sendo que para cada tonelada de cimento Portland produzido no Brasil 670 quilogramas (kg) de CO₂ são lançados na atmosfera (SÁ *et al.*, 2011) e no ano de 2016 a produção de cimento foi responsável por 24,9% das emissões de CO₂ de todos os processos industriais brasileiros (BRASIL, 2020).

Posto que o cimento é o material fundamental para a fabricação do concreto, a indústria da construção civil reconhece que é essencial a implantação de materiais e técnicas afim de mitigar os seus impactos no meio ambiente (ROCHA; CHERIAF, 2003).

Segundo Bernstein *et al.* (2007) e Hutzinger e Eatmon (2009) existem diversas soluções potencialmente redutoras destes impactos causados pela indústria cimentícia: o aperfeiçoamento da eficiência energética das fábricas, empregando o uso de combustíveis de biomassa, biogás ou incineração de resíduos sólidos municipais; o aproveitamento do pó dos fornos e o sequestro de emissões de CO₂ durante o processo de queima; e a substituição parcial do cimento Portland por materiais cimentícios suplementares (MCS), comumente pozolanas, sendo esta última o processo mais eficiente pois seu impacto ambiental é três quartos menor que o gerado pelas outras soluções citadas e o do processo de fabricação do cimento Portland básico.

As adições de MCS podem ser encontradas em forma de resíduos de outras indústrias, evitando o descarte desses materiais em aterros municipais (MEHTA; MONTEIRO, 2014) e sendo mais vantajoso quando os MCS usuais não estão à disposição na região ou o transporte inviabiliza seu uso economicamente (OMRAN *et al.*, 2018). Contudo, é de suma importância que o desempenho ambiental e econômico se mantenha simultaneamente alinhado com o desempenho técnico e funcional tradicional (LIPPIATT; AHMAN, 2004). De fato, quando estes materiais possuem potencial pozolânico, tendem a ter efeitos benéficos para o concreto, como a melhoria da microestrutura, aumentando a sua resistência e a durabilidade (VISHWAKARMA; RAMACHANDRAN, 2018). Um material com grande potencial para fonte de MCS é o resíduo de vidro (RV).

Mais de 200 fábricas de vidro estão espalhadas pelo Brasil, onde atendem a necessidade do mercado interno e externo. A indústria do vidro vem se mantendo

em patamares estáveis e com grande crescente produção de todos os seus segmentos (embalagem, doméstico, vidros técnicos e vidros planos), em 2007 o país alcançou a marca de 2,9 milhões de toneladas de vidros produzidos, sendo 1,3 milhões de toneladas do setor de embalagens. Por ano, cada brasileiro utiliza 12 kg de embalagens vítreas, no entanto, em mais países como a França esse número chega a 65 kg (ABIVIDRO, 2009 e PINTO-COELHO, 2009).

Por um lado, o destino dos resíduos desta indústria não seria preocupante, tendo em vista que este material possui potencial ilimitado de reciclagem, podendo ser fabricado 1 kg de vidro a partir de 1 kg de caco de vidro. Contudo, esse processo de reciclagem acarreta custos elevados, seja pela alta e intensiva necessidade de mão de obra ou ainda pelo emprego de grande quantidade de água ou energia; além do fato, de que a coleta no Brasil deste resíduo é ainda muito rudimentar e possui pouco envolvimento da comunidade (ABIVIDRO, 2009 e PINTO-COELHO, 2009). No ano de 2018, apenas 25,8% de todo o vidro utilizado foi reciclado, evidenciando o baixo índice de reaproveitamento deste material. (ABIVIDRO 2019). Sendo assim, o restante deste RV não reutilizado é destinado aos aterros sanitários, assim como, os resíduos que passaram pelo ciclo de logística reversa do vidro que foram descartados durante a triagem do material.

Uma solução a este problema pode ser a incorporação do RV no concreto em substituição parcial do cimento Portland, visto que esse material apresenta composição química e reatividade desejadas para um MCS (SOLIMAN; TAGNIT-HAMOU, 2017), quando moídos finamente, pois acelera suas reações químicas benéficas no concreto (NASSAR; SOROUSHIAN, 2012).

Desse modo, o presente trabalho se propõe a determinar a atividade pozolânica do resíduo de vidro moído (RVM) não limpo e avaliar seu desempenho como material cimentício suplementar alternativo em concretos estruturais. A opção por trabalhar com o RMV sujo, é pelo fato do resíduo utilizado possuir impurezas em pequenas partículas, dificultando a separação das impurezas do resíduo de vidro puro, e também para avaliação do resíduo vindo direto da fábrica, sem alteração, a não ser da granulometria. Sendo estudados dois teores de substituição do cimento Portland por RVM. Diante disso este estudo poderá colaborar para uma construção civil mais sustentável, visto que promove a fabricação de um cimento de menor impacto ambiental e ademais oferece um destino mais ecologicamente correto a um resíduo habitualmente descartado em aterros sanitários.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Estudar a viabilidade da utilização do resíduo de vidro moído sujo como material cimentício suplementar alternativo em concretos estruturais.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliação da atividade pozolânica do RVM por meio de método indireto de quantificação da capacidade reativa;
- Comparação da resistência à compressão axial do concreto contendo 8% e 16% de substituição do cimento Portland por RVM com a do concreto padrão.
- Comparação da absorção de água por capilaridade do concreto contendo 8% e 16% de substituição do cimento Portland por RVM com a do concreto padrão.
- Comparação da resistência à tração por compressão diametral do concreto contendo 8% e 16% de substituição do cimento Portland por RVM com a do concreto padrão.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

Neste tópico serão abordados os conceitos gerais e fundamentação teórica dos assuntos pertinentes a este trabalho.

2.1 Vidro

O vidro é um produto fisicamente homogêneo, enrijecido sem cristalizar, resultante do resfriamento controlado da mistura de diversos óxidos inorgânicos, sendo a sílica (óxido de silício) seu componente fundamental (SICHERI; CARAM; SANTOS, 2007).

As principais famílias dos vidros são: Sílica vítrea; Silicatos alcalinos; Vidros sodo-cálcicos; Vidros ao chumbo; Vidros borossilicatos; Vidros alumino-borossilicato, as quais variam de acordo com a composição, processo de fabricação, utilização e matérias-primas do vidro (AKERMAN, 2000). Se destaca a mais antiga das famílias, a de vidros sodo-cálcicos, representante de cerca de 90% da produção de vidros mundial (CRQ-IV, 2011), sendo responsável pela fabricação da maior parte de garrafas, frascos, potes, janelas, bulbos e tubos de lâmpadas (AKERMAN, 2000). Callister (2012) explica que a sílica pode formar um sólido com a ausência de estrutura periódica e ordenada, ou seja, com disposição irregular similar à de um líquido. Neste contexto, para Fragata *et al.* (2007) o vidro em estado amorfo é composto primordialmente por sílica (SiO_2) e menores porcentagens de sódio (Na_2O) e cálcio (CaO). Na Tabela 1 pode-se visualizar a composição química básica de embalagens vítreas sodo-cálcicas comerciais.

Tabela 1 – Composição química de vidros sodo-cálcicos comerciais

Componentes	SiO_2	Na_2O	CaO	MgO	Al_2O_3	K_2O
%	72,0	12,5	11,0	1,5	2,0	1,0

Fonte: Adaptado de Akerman (2000).

2.1.1 Reciclagem do vidro

O vidro é um material estático que é possível ser reciclado e reutilizado diversas vezes sem que haja alteração em sua propriedade química (ABIVIDRO, 2022). É apresentado na Figura 1 o ciclo da logística reversa do vidro para reciclagem.

Figura 1 – Ciclo da logística reversa do vidro



Fonte: ABRABE 2016.

Apesar da facilidade e diversidade de sua reutilização, de acordo com a Associação Brasileira da Indústria do Vidro - ABIVIDRO (2019) somente 25,8% de todo o vidro utilizado no ano de 2018 foi reciclado. E ainda assim, partes que não têm utilidade neste processo de reciclagem, são descartadas em aterros sanitários ABIVIDRO (2021). Isto se dá, pois, os cacos não podem estar misturados com terra, cerâmicas, louças e/ou pedras, ou seja, materiais contaminantes que de acordo com o Compromisso Empresarial para Reciclagem - CEMPRE (2011), quando misturado com o vidro acabam gerando micropartículas que afetam no resultado da embalagem, resultando em menor resistência do produto. Na Europa e nos Estados Unidos já existem fábricas de produção de embalagens de vidros que utilizam até 94% de material reciclados, porém, isso surge do fato que a coleta seletiva de todos os materiais de descarte é muito mais aprimorada e eficiente (BEERKENS; SANTEN, 2006). Deixando muito espaço para que o Brasil evolua neste sentido.

2.1.2 Resíduo de vidro

O resíduo de vidro é um material não biodegradável composto por partículas de vidros originados durante os processos de produção, utilização e descartes destes, conforme analisado por Sales (2014), ainda segundo este, a maior parte do RV no setor vidreiro vem de segmentos de utensílios domésticos, vidros planos, embalagens e vidros especiais, sendo assim, os resíduos mostram-se principalmente na forma de embalagens e garrafas com tamanhos e cores variadas além de pós finos e cacos. De acordo com as ABNT NBR 10004:2004, 10005:2004 e 10006:2004, este resíduo é classificado como inerte e não perigoso, classe IIA.

Conforme os dados do CEMPRE (2022), no Brasil, em torno de 3% dos resíduos urbanos produzidos são provenientes de resíduos de vidro, sendo 1% destes de origem de embalagens, e 2% resultantes de falhas e quebras ao longo do processo de fabricação, tratamento, furação, corte, transporte e manuseio destas peças de vidros.

Como o vidro é um material que tem diversos papéis em nossa sociedade, a geração de RV aumenta gradualmente e a questão de seu descarte vem ganhando cada vez mais proporção, tendo em vista que, apesar de seus resíduos serem considerados materiais que não poluem o meio ambiente, pois eles não interagem com o solo, o tempo de decomposição deste material é longo, o que impacta de forma negativa quando a questão é a preservação do meio ambiente (PRUDHVI *et al.*, 2016).

2.2 Cimento de alta resistência inicial

De acordo com a ABNT NBR 16697:2018 o cimento Portland é um ligante hidráulico composto por clínquer Portland moído com adições durante sua confecção de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições minerais, devidamente normatizadas. Os tipos de cimento Portland recebem uma nomenclatura conforme suas adições e propriedades especiais, como o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI), composto por 90 - 100% de clínquer e sulfatos de cálcio e de 0 a 10% de material carbonático, devendo apresentar resistência à compressão aos 7 dias ≥ 34 MPa (NBR 16697, 2018). A elevada resistência inicial do CP V-ARI é em razão do seu processo de fabricação, pois suas partículas são finamente moídas, de

modo que o cimento tenha alta reatividade nas horas iniciais de hidratação, dada a grande área superficial das partículas (TORRICO, 2010). As aplicações de concretos com cimento CP V-ARI geralmente são em empresas de pré-moldados, que necessitam da movimentação de peças com poucas idades, obras que precisam de desforma rápida etc.

2.3 Concreto estrutural utilizando CP V-ARI

Concretos produzidos com CP V-ARI desenvolvem resistências mais elevadas em idades iniciais, devido a composição química do cimento e de sua finura. Porém a resistência do concreto vai além do cimento empregado, que dependerá da dosagem do traço (cimento; areia; brita água; adições etc.).

2.4 Substituição parcial do cimento por vidro moído em compósitos cimentícios

Diversos estudos avançaram na investigação da utilização do RV a fim de agregar a ele algum valor econômico, como na substituição parcial do cimento Portland na confecção de concreto. Logo, esta utilização do RV torna-se uma alternativa sustentável ao invés do descarte em aterros, portanto, um processo economicamente viável (PRUDHVI *et al.*, 2016). Para Vijayakumar, Vishaliny e Govindarajulu (2013) este destaque se deu pelo fato de o vidro possuir em sua composição um alto teor de sílica, que instigou pesquisadores a estudarem a viabilidade deste como matéria-prima na fabricação de cimento.

Porém Vijayakumar, Vishaliny e Govindarajulu (2013) também abordaram a importância de se tomar precauções para minimizar os efeitos prejudiciais para a estabilidade do concreto, da reação álcali-agregado (RAA), sendo a mais comum a reação álcali-sílica (RAS), visto que o vidro, trata-se de um material constituído essencialmente por sílica amorfa. A reação RAS é o processo químico no qual a sílica em estado amorfo reage com os hidróxidos alcalinos, que estão presentes nos poros da solução do concreto. Mehta e Monteiro (1994) explicam que a RAA é maléfica, pois causa expansão e fissuração no concreto, ocasionando perda de resistência, elasticidade e durabilidade. Deste modo, para os autores Patil e Sangle (2013), quando a RAS potencialmente deletéria é uma preocupação, a substituição

parcial do cimento por RV finamente moído, é uma solução que inclusive beneficia a estabilidade dos materiais cimentícios. Em concordância Mageswari e Vidivelli (2010) complementam que o efeito da RAS é nulo e se obtém um acréscimo na durabilidade da argamassa quando se emprega vidro residual moído, passante na peneira de 75 micrômetro (μm), em substituição parcial ao cimento. Dyer e Dhir (2001) explicam que tais fatores ocorrem devido à grande área de superfície das pequenas partículas de vidro introduzidas na mistura, pois quanto maior a área superficial de contato dos materiais envolvidos, maior é o índice de progressão da reação pozolânica, o resíduo de vidro pode assim consumir o hidróxido de cálcio presente, ocasionando em uma maior resistência mecânica e mitigando os efeitos da RAS, visto que ambas possuem o mesmo processo químico, porém diferem na cinética química, ou seja, a RAS se desenvolve em uma velocidade reduzida, comparado a reação pozolânica.

Vijayakumar, Vishaliny e Govindarajulu (2013) constataram que a substituição parcial do cimento pelo RVM pode ser de até 30%, sem apresentar efeitos prejudiciais a longo prazo.

2.4.1 Propriedades relacionadas ao comportamento pozolânico

Massazza (1998) esclarece que o material pozolânico, denominado pozolana, toma como base os materiais inorgânicos naturais e artificiais, que enrijecem em uma mistura hidratada quando reagem com o óxido de cálcio, ou materiais capazes de liberar hidróxido de cálcio.

Bem como, conforme Gobbi (2014), a reação pozolânica é a interação entre compostos amorfos, como a sílica, e o hidróxido de cálcio, que geram silicatos de cálcio hidratado, assim dizendo, esta reação forma compostos cimentantes na presença de água consumindo o hidróxido de cálcio presente na microestrutura do concreto, o hidróxido de cálcio, diferentemente da sílica, pouco contribui para resistência do concreto, logo sua absorção pela pozolana é vantajoso em vista dos pontos de resistência mecânica e durabilidade de compósitos cimentícios.

Coutinho (1997) e Metha e Monteiro (2008) complementam que a incorporação de pozolanas é benéfica ao concreto, pois resulta na moderação do calor de hidratação e reprime o desenvolvimento de sulfoaluminatos expansivos, passíveis à ação de sulfatos, este ataque é um dos mais agressivos mecanismos de

degradação, contra o qual as pozolanas combatem provocando redução na porosidade e propiciam o refinamento dos grãos na estrutura do concreto.

O vidro apresenta alto teor de sílica, tornando-o um material amorfo e potencialmente pozolânico, desde que moído até que suas partículas sejam menores que 100 μm , quanto menor a partícula maior é a reação pozolânica e atividade com cal, resultando em maior resistência à compressão da mistura de concreto (PRUDHVI *et al.*, 2016). Entretanto, Rodrigues *et al.* (2010) ressalta em seu estudo que quanto mais fina for a adição, maior será a quantidade de água necessária para hidratação da mistura, aumentando a relação água/cimento (a/c). Contudo esta interferência pode ser resolvida com a incorporação de um aditivo superplastificante, que possui a função de reduzir a relação a/c, mantendo a trabalhabilidade requerida ou, aumentar a trabalhabilidade, mantendo a relação a/c inalterada (NEVILLE, 1997).

2.4.2 Propriedades relacionadas ao desempenho mecânico

A fim de entender as limitações e propriedades do concreto com a inserção de vidro em sua composição, diversas pesquisas públicas e privadas foram realizadas. Tais estudos obtiveram resultados promissores, devido os ensaios de resistência apresentarem que misturas de concreto contendo vidro obtiveram resistência de moderada a alta, evidenciando a possibilidade da aplicação do concreto com resíduo de vidro em diversos serviços, inclusive em projetos estruturais (PRUDHVI *et al.*, 2016).

Patil e Sangle (2013) relataram em seu estudo que à medida que se diminuí o tamanho das partículas de RVM utilizadas em substituição ao cimento em concretos, a resistência do concreto aumenta, visto que seus resultados apontaram que a utilização de partículas de até 90 μm no concreto alcançaram maior resistência que o concreto com partículas de 90 a 150 μm . Khatib *et al.* (2012) declararam a partir de sua pesquisa que a substituição de 10% do cimento por resíduo moído tem efeito benéfico, pois aumenta consideravelmente a resistência à compressão. Bem como Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2008) observaram o aumento de 25% e 35% aos 7 e 28 dias respectivamente da resistência à compressão do concreto com substituição do cimento de 30% por resíduo de vidro de granulometria de 75 μm , com a adição de cinza volante. Em concordância Aliabdo, Elmoaty e Aboshama

(2016) mencionaram em seu estudo que 10% de substituição do cimento por RVM resulta em benefícios para as propriedades como resistência à compressão e à tração, absorção de água, índice de vazios e densidade do concreto.

A Tabela 2 apresenta resultados médios encontrados na literatura de ensaios de resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral de concretos com diferentes teores de substituição do cimento por RVM, para as idades de 7 e 28 dias.

Tabela 2 – Resultados médios de ensaios de resistência de concretos

(continua)

Fonte	Substituição parcial do cimento por RVM (%)	Resistência à compressão axial (Mpa)		Resistência à tração por compressão diametral (Mpa)	
		7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
Aliabdo, Elmoaty e Aboshama (2016) - Grau de concreto 33 MPa	0	28,7	32,2	2,68	3,2
	5	30,1	33,84	3,1	3,73
	10	27,38	30,75	3,15	3,82
	15	26,89	29,18	2,92	3,39
	20	26,09	28,1	2,56	2,88
	25	25,38	27,24	2,26	2,76
Aliabdo, Elmoaty e Aboshama (2016) - Grau de concreto 45 MPa	0	36,49	44,32	3,58	3,86
	5	26,42	45,42	3,93	4,31
	10	38,51	46,45	3,97	4,36
	15	36,23	40,14	4,29	4,56
	20	34,09	39,39	3,46	3,82
	25	32,6	38,08	3,39	3,77
Antônio (2012)	0	28	36,2	3	3,6
	5	26,4	34	2,9	3,5
	10	24,8	34,7	3	3,8
	15	25,4	35,2	3	3,7
	20	23,7	33,4	2,7	3,8
	30	22,74	26,75	-	-
Carmo <i>et al.</i> (2018)	10	20,27	26,81	-	-
	20	13,73	19,48	-	-
	30	12,64	17,51	-	-
	40	9,2	15,1	-	-
	50	7,2	12,1	-	-
Patil e Sangle (2013)	0	21,98	32,74	-	-
	10	17,94	32,43	-	-
	20	19,28	34,33	-	-
	30	16,64	31,52	-	-
	40	14,52	28,81	-	-

(continuação)

Fonte	Substituição parcial do cimento por RVM (%)	Resistência à compressão axial (Mpa)		Resistência à tração por compressão diametral (Mpa)	
		7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
Prudhvi <i>et al.</i> (2016)	0	21,9	28,5	-	-
	2	23,55	31	-	-
	4	24,22	32	-	-
	8	23,61	35,4	-	-
	16	25,8	35,5	-	-
	20	19	27	-	-
Simões (2013)	0	35,9	41,8	2,85	3,05
	5	33,7	39,6	3	3
	10	31,9	39,4	2,6	3,2
	15	31,1	31,1	2,4	3,1

Nota. Em negrito estão destacados os maiores valores de resistência alcançados por cada autor, desconsiderando as amostras sem substituição de cimento, aos 7 e 28 dias.

- Os autores não avaliaram a resistência à tração por compressão diametral.

Fonte: Elaboração própria.

2.4.3 Propriedades relacionadas a absorção de água

Santana e Aleixo (2017) explicam o efeito da capilaridade que ocorre quando a superfície do corpo de prova (CP) entra em contato com a água, sendo este a formação de interfaces curvas de contato entre a água e o gás presentes nos poros do concreto, que ocasionam a pressão capilar, deste modo, a água é absorvida pelos poros em função dessa pressão de sucção, formando então uma curva de sucção. Consequentemente, seguindo o método exposto na ABNT NBR 9779:2012 pode-se simular a forma de ascensão capilar da água em concretos endurecidos.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), valores baixos de absorção estão relacionados à índice de vazios baixos, visto que a quantidade de vazio e o tamanho dos poros permeáveis são diretamente relacionados com a permeabilidade do material.

Patil e Sangle (2013) esclarecem que uma estrutura menos porosa, ou seja, com baixo índice de vazios, beneficia a resistência à absorção de umidade resultando em uma maior durabilidade dos materiais cimentícios. Neste contexto, em seus estudos, os autores Shayan e Xu (2006), Vijayakumar, Vishaliny e Govindarajulu (2013), Patil e Sangle (2013), Shekhawat e Aggarwal (2014) e Sombir

e Berwal (2017) mencionam que o vidro finamente moído é um excelente preenchimento de vazios no concreto, assegurando uma diminuição significativa no índice de absorção, quando utilizado em substituição parcial ao cimento.

Um exemplo da importância da avaliação do índice de absorção capilar é exposto por Santana e Aleixo (2017) em sua pesquisa, onde discorrem que a umidade de um solo úmido passa para fundações, baldrame e alvenarias de edificações realizados com um material que possui falta de obstáculos que impeçam está progressão.

3 METODOLOGIA

3.1 Local de execução

O estudo foi desenvolvido nos Laboratórios de Estruturas e Materiais de Construção (LEMAC) e do Grupo de Óptica Micro e Nanofabricação de Dispositivos (GOMNDI) da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA) Campus Alegrete-RS.

3.2 Materiais

Para a execução do trabalho foram empregados os seguintes materiais:

- Aditivo superplastificante (AS): Silicon ns High 200, amostra disponibilizada pela empresa Tecnosil Industria E Comercio De Materiais De Construção Ltda. localizada em Itupeva-SP;
- Água: Proveniente da rede pública de abastecimento de água do município de Alegrete-RS;
- Areia fina;
- Brita 1;
- Cimento Portland: CP V-ARI RS, de alta resistência inicial;
- Resíduo de vidro moído (RVM): Pó passante na peneira de diâmetro 75 μm , produzido a partir do resíduo de vidro cedido pela empresa Marcon Embalagens E Beneficiamento Ltda. do município de Ipê-RS.

Na figura 2 estão apresentados os materiais utilizados, exceto o AS e a água.

Figura 2 – Materiais utilizados



(a) Areia



(b) Brita

Figura 2 – Materiais utilizados



(c) Cimento Portland



(d) RVM

Fonte: Elaboração própria.

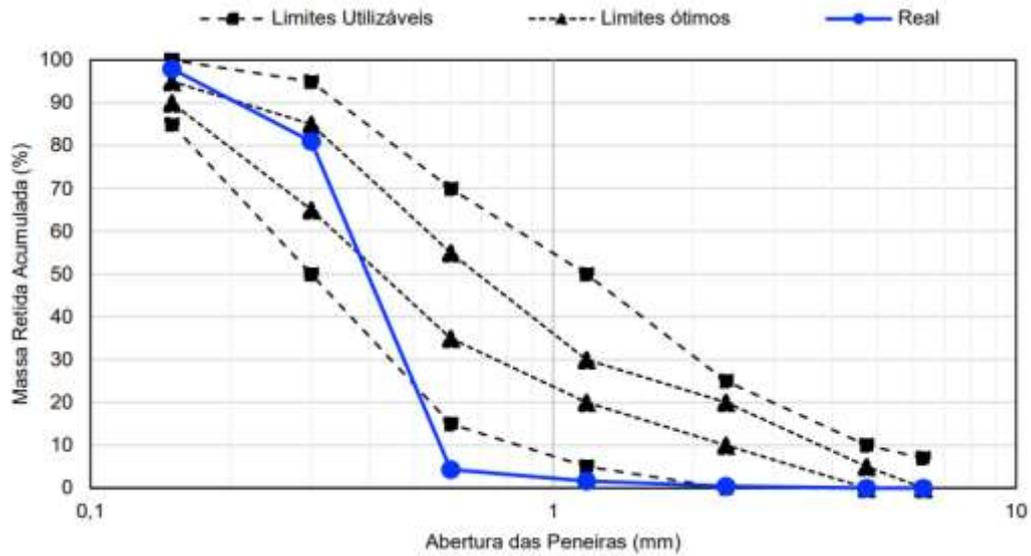
3.3 Caracterização dos materiais

Neste item serão descritos a caracterização dos agregados miúdo e graúdo e do resíduo de vidro moído.

3.3.1 Agregado miúdo

Neste trabalho foi utilizado uma areia natural, sendo a mesma utilizada pelo autor Oliveira (2022), que á caracterizou de acordo com a ABNT NBR NM 248:2001, assim obtendo-se a curva granulométrica apresentada na Figura 3. Ainda segundo Oliveira (2022) a areia é fina, possuindo um módulo de finura de 1,854 e massa específica de 2,667 g/cm³ obtidos de acordo com a ABNT NBR 9776:2003.

Figura 3 – Gráfico da distribuição granulométrica do agregado miúdo

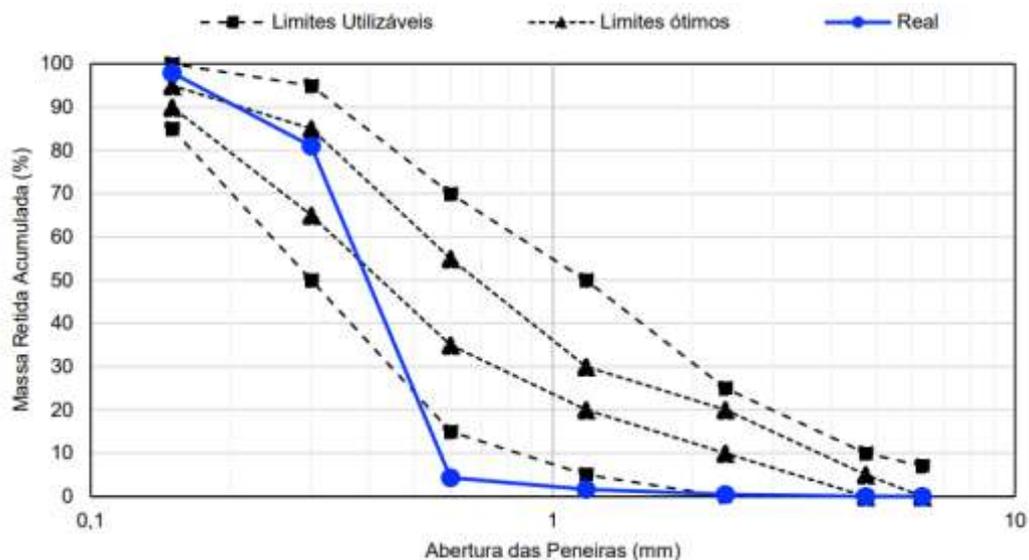


Fonte: OLIVEIRA 2022.

3.3.2 Agregado graúdo

A brita 1 de origem basáltica foi o agregado graúdo utilizado neste trabalho, sendo o mesmo utilizado pelo autor Oliveira (2022), que o caracterizou de acordo com a ABNT NBR NM 248:2001, assim obtendo-se a curva granulométrica apresentada na Figura 4. Ainda segundo Oliveira (2022) a brita possui um módulo de finura de 6,854 e massa específica de 2,667 g/cm³, obtidos de acordo com a ABNT NBR 53:2009.

Figura 4 – Gráfico da distribuição granulométrica do agregado graúdo



Fonte: OLIVEIRA 2022.

3.3.3 Resíduo de vidro moído

O resíduo de vidro foi proveniente do resíduo de uma fábrica de reciclagem de embalagens vítreas, que são vidros sodo-cálcicos, de diferentes colorações (transparente, âmbar e verde) como exposto na Figura 5 (as partículas maiores já haviam sido trituradas). Sua composição química básica comercial exposta anteriormente na Tabela 1, mostra que 72% de sua composição média é sílica, sendo assim um possível candidato a possuir atividade pozolânica. Contudo, este resíduo vem em diferentes tamanhos e misturado com partículas finas oriundas de outra natureza, como poeira e restos de embalagens finamente triturados.

Figura 5 – Resíduo de vidro triturado



Fonte: Elaboração própria.

O resíduo de vidro moído (partículas passantes na peneira de 75 μm) foi ensaio conforme estabelece a ABNT NBR NM 23:2000, para determinação de sua massa específica. De acordo com a norma sua massa específica foi calculada a partir da Equação 1 abaixo. Obtendo um valor igual à 2,43 g/cm^3 .

$$\rho = m/V \quad (1)$$

Onde:

ρ , é a massa específica do material ensaiado, em gramas por centímetro cúbico;

m , é a massa do material ensaiado, em gramas;

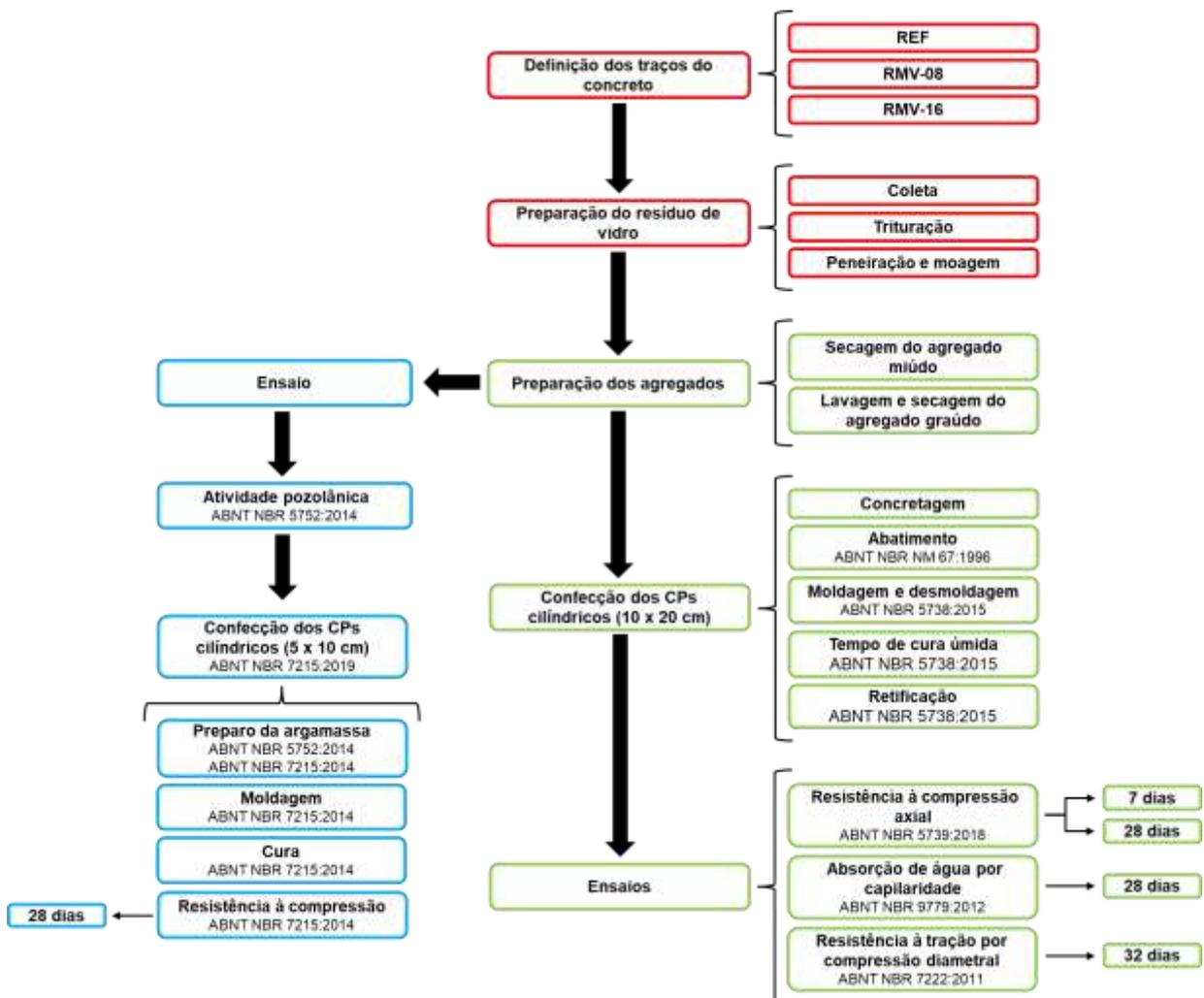
V , é o volume deslocado pela massa do material ensaiado ($V_2' - V_1'$), em centímetros cúbicos;

V_1' e V_2' , são os valores corrigidos de V_1 e V_2 , respectivamente, a partir da calibração da escala do frasco volumétrico, em centímetros cúbicos.

3.4 Procedimento experimental

A prática experimental para realização deste trabalho, seguiu o fluxograma estruturado na Figura 6, no qual estão descritas as subdivisões do procedimento experimental de forma resumida.

Figura 6 – Fluxograma do procedimento experimental



Fonte: Elaboração própria.

3.4.1 Definição dos traços do concreto

O cimento utilizado foi o CP V-ARI, sendo escolhido, por ser um cimento puro com poucas adições minerais, permitindo visualizar de forma mais clara a ação da pozolanicidade do vidro na matriz cimentícia.

Os traços adotados para confecção do concreto com substituição parcial do cimento Portland por RVM de 8% (RVM-08) e 16% (RVM-16) estão descritos na Tabela 3, juntamente ao traço referencial sem substituição (REF), as nomenclaturas estão dispostas na Tabela 4 de acordo com o teor de substituição. As porcentagens de substituição parcial, foram definidas levando em consideração os teores de substituição de estudos relacionados ao tema deste trabalho, encontrados na literatura. Sendo estes estudos expressos na Tabela 2, tópico 2.4.2, como pode-se visualizar na Tabela 2 os teores de substituição de 8% e 16% foram encontrados por esta autora, apenas em um trabalho que avaliou a resistência à compressão e em nenhum que avaliou a resistência à tração. E entre os autores citados que não estudaram resistência à tração, o trabalho de Prudhvi *et al.* (2016), foi o que atingiu maior resistência à compressão, coincidentemente para o valor de 16%.

Para o desenvolvimento deste trabalho foi escolhido um traço de concreto estrutural (consumo de cimento em kg/m³, expresso na Tabela 3, considerando a substituição do cimento por RMV) previamente testado em laboratório. A trabalhabilidade do concreto foi estabelecida pelo ensaio do Abatimento do Tronco de Cone em 80±20mm.

Tabela 3 – Traços do concreto com substituição do cimento por RVM e consumo real do cimento (C).

Concreto	Traço unitário em massa					AS (g)	C Kg/m ³
	Cimento:	RVM:	areia:	brita:	água:		
REF	1	0	1,64	2,86	0,36	13,30	423,91
RVM-08	0,92	0,08	1,64	2,86	0,36	19,90 ^a	388,45
RVM-16	0,84	0,16	1,64	2,86	0,36	29,00 ^a	362,47

^a A massa do AS em relação à massa de cimento pode aumentar de acordo com a consistência do concreto fresco.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 4 – Nomenclatura das composições do concreto

Nomenclatura	Teor de substituição (em massa)
REF	0%
RVM-08	8%
RVM-16	16%

Fonte: Elaboração própria.

3.4.2 Preparação do resíduo de vidro

Neste item está descrito as etapas do processo para obtenção do pó de vidro com granulometria inferior a 75 μm , a partir do resíduo de vidro sem qualquer tratamento de limpeza.

O resíduo de vidro utilizado neste estudo foi cedido pela empresa Marcon Embalagens e Beneficiamento Ltda. do município de Ipê-RS, onde é gerado a partir da reutilização de embalagens de vidro na produção de novas. As embalagens vítreas são destinadas a empresa sem qualquer separação ou limpeza, e quando recebidas são colocadas em um montante no chão da fábrica; em seguida, passam pelo processo de triagem manual, separando o vidro que será reciclado dos cacos de vidros indesejáveis e impurezas como etiquetas, areia e pedras, que posteriormente são descartados em aterros sanitários. Sendo assim, foi optado por utilizar 20 kg deste RV com impurezas que seria descartado, na confecção de concretos, para além de tornarmos a construção mais econômica, também se realizar um processo mais ecológico, apoiando a reutilização deste material e a preservação do meio ambiente.

O resíduo coletado, passou por um processo de trituração primária, peneiramento e por um segundo processo de moagem. As descrições das etapas de moagem do RV são apresentadas nos tópicos 3.4.2.1 a 3.4.2.2.

3.4.2.1 Trituração

Inicialmente o material foi fragmentado em um britador de mandíbula MOD.: BB 200 Retsch® apresentado na Figura 7, no laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

Figura 7 – Britador de mandíbula MOD.: BB 200 Retsch®



Fonte: Elaboração própria.

3.4.2.2 Peneiração e moagem

O material foi separado por granulometria como exposto na Figura 8, de acordo com as quantidades retidas nas peneiras N°: 8, N°: 16, N°: 30, N°: 50 e N°: 100, assim como o depositado no fundo (passante na peneira N°:100), com o auxílio do agitador de peneiras quadradas REF.: 3.203.220 SÉRIE: 11/07 SOLOTEST®. Posteriormente, o resíduo passante na peneira N°: 100 foi levado de forma fracionada ao agitador elétrico de peneiras granulométricas redondas de diâmetro (\emptyset) 8 x 2", com chave liga/desliga Brasil Solos®, disposto da peneira N°: 200 de abertura igual a 75 μ m, durante três minutos (min) cada façção, sendo coletado o pó do RVM passante e pesado na balança de precisão LD1050 LÍDER® com capacidade máxima de 3 kg e sucessivamente armazenado em embalagem fechada. Em seguida, o material retido na peneira N°: 100 foi submetido à moagem em moinho de bolas com motor de indução, após a moagem, este material foi dividido em frações e peneirado novamente no agitador elétrico, durante três minutos, utilizando a peneira N°: 200. Os processos de peneiramento foram repetidos até que se alcançasse a quantidade de 3 kg do pó de resíduo de vidro necessários para realização dos ensaios empregados neste trabalho. Na Figura 9 está apresentado os equipamentos agitador de peneiras quadradas (a) e redondas (b) e na Figura 10 o moinho de bolas, utilizados nesta etapa.

Figura 8 – Resíduo de vidro após separação por peneiramento



(a) Retido na peneira N°: 8



(b) Retido na peneira N°: 16



(c) Retido peneira na N°: 30



(d) Retido peneira na N°: 50



(e) Retido peneira na N°: 100



(c) Passante peneira na N°: 100

Fonte: Elaboração própria.

Figura 9 – Agitador de peneiras:



(a) SOLOTEST®;



(b) Brasil Solos®

Fonte: Elaboração própria.

Figura 10 – Moinho de bolas com motor de indução



Fonte: Elaboração própria.

3.4.3 Determinação da atividade pozolânica

A determinação da atividade pozolânica foi realizada através do ensaio da NBR 5752:2014. Inicialmente foi separado a quantidade de material, em massa, para moldagem de 4 corpos de prova cilíndricos de 50 x 100 mm, para o preparo das argamassas com duas dosagens diferentes. A argamassa A nomeada no trabalho como REF-AP e a argamassa B com substituição de 25% (RVM-25) do cimento pelo material a ser analisado a atividade pozolânica, sendo este o RVM. A Tabela 5, apresenta a quantidade de material e instruções que foram seguidas durante o ensaio.

Tabela 5 – Quantidades em massa dos materiais

Material	Massa g	
	Argamassa A	Argamassa B ^a
Cimento CP II-F-32	624 ± 0,4	468 ± 0,4
Material pozolânico	-	156 ± 0,2
Areia normal ^b	1872,0	1872,0
Água	300 ± 0,2	300 ± 0,2
Aditivo superplastificante	-	c

^a O material pozolânico e o cimento CP II-F-32 devem ser previamente misturados e homogeneizados em recipiente fechado, durante 2 min, aproximadamente.

^b Quatro frações de (468,0 ± 0,3) g.

^c Quantidade de aditivo superplastificante necessária para manter o índice de consistência normal da Argamassa B em ± 10 mm do obtido com a argamassa A, determinado conforme ABNT NBR 7215:1997, Anexo B. O aditivo deve ser adicionado na água de amassamento diretamente na cuba. O uso de aditivo é dispensável quando o índice de consistência da argamassa B for igual (± 10 mm) ou maior que o da argamassa A

Fonte: ABNT NBR 5752 (2014).

Em seguida foi realizado a mistura dos materiais, moldagem dos CPs, cura em ambiente climatizado, e ruptura à compressão dos CPs aos 28 dias de acordo com a NBR 7215:2014. O ensaio requerido é apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Ensaio de compressão CP 50 x 100 mm.



Fonte: Elaboração própria.

3.4.4 Preparação dos agregados

A areia utilizada estava previamente seca em estufa de secagem e esterilização digital de alta precisão MOD.: S600SD N.: 4060 Biopar® à temperatura de $(105^{\circ} \pm 5)$ °C, durante o período de 24 horas (h), para que não houvesse influência da umidade natural na mistura do concreto.

Inicialmente a brita passou pelo processo de lavagem retirando outros possíveis resíduos e em seguida distribuída em uma superfície plana para secagem ao ar.

3.4.5 Concretagem

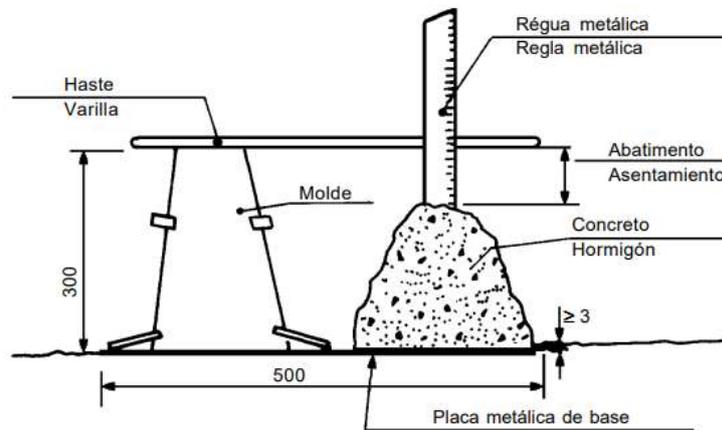
A pesagem dos materiais empregados aconteceu com o auxílio das balanças de plataforma comercial digital Amira® de capacidade máxima de 100 kg, e de precisão LD1050 LÍDER® com capacidade máxima de 3 kg. Posteriormente à pesagem, o RVM passou a ser misturado ao cimento até que obtivesse uma homogeneização visual, apenas para os traços RVM-08 e RVM-16. Para confecção do concreto de alta resistência inicial utilizou-se uma betoneira monofásica Motomil® MB-150 I de eixo inclinado.

A ordem de inserção dos materiais na betoneira foi efetuada de acordo com as recomendações literárias (brita, uma parte de água, todo o cimento + vidro, o restante da água, aditivo e a areia). Após a fusão de todos os elementos, a trabalhabilidade do concreto foi realizada através do ensaio de abatimento do tronco de cone (Slump Test), como apresentado no tópico 3.4.5.1.

3.4.5.1 Determinação da consistência

A determinação da consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone realizou-se conforme orienta a ABNT NBR NM 67:1996 e exemplifica a Figura 12. Para execução deste ensaio, a extração e preparação da amostra de concreto fresco seguiu os procedimentos estabelecidos na ABNT NBR NM 33:1994.

Figura 12 – Medida do abatimento do tronco de cone



Dimensões em mm
Dimensiones en mm

Fonte: ABNT NBR NM 67:1998.

3.4.5.2 Moldagem e desmoldagem dos corpos de prova

Para os ensaios destrutivos de resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral, foram confeccionados corpos de prova (CPs) em triplicata para cada traço realizados neste trabalho, conforme apresenta a Tabela 6, sendo que os CPs rompidos por tração foram anteriormente ensaiados para determinação da absorção de água por capilaridade.

Tabela 6 – Quantitativo de CPs para cada traço confeccionado

Ensaio	Idade	Quantidade de CPs		
		REF	RVM-08	RVM-16
Compressão	7 dias	3	3	3
	28 dias	3	3	3
Absorção / Tração	28 dias / 32 dias	3	3	3
Total de CPs		9	9	9

Fonte: Elaboração própria.

A moldagem dos CPs ocorreu conforme o processo prescrito na ABNT NBR 5738:2015. Inicialmente, os moldes cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, respeitando a norma, tiveram sua parte interna revestida por uma fina camada de lubrificante não reagente com o cimento. Em seguida, o concreto passou

a ser disposto dentro dos moldes com o auxílio de uma concha de seção U, em duas camadas: a primeira com aproximadamente metade do volume do molde, que foi adensada posteriormente utilizando uma haste com 12 golpes manuais distribuídos uniformemente por toda a seção transversal do molde, de modo em que a haste atravessou toda sua espessura, sem entrar em contato com a base do molde. A segunda camada foi preenchida em excesso de concreto e adensada igualmente com 12 golpes. Logo após a face externa do molde recebeu leves batidas, a fim de preencher possíveis vazios. Por fim realizou-se o rasamento nas superfícies dos CPs, utilizando uma colher de pedreiro.

Confeccionados os CPs, estes foram dispostos em uma superfície horizontal rígida e cobertos com lona, durante o período de 24 h até sua desmoldagem para serem levados à cura.

Posteriormente os CPs foram submetidos à cura submersa em uma solução de hidróxido de cálcio a (23 ± 2) °C até a idade de ensaio, como estabelecido na ABNT NBR 5738:2015.

Em seguida de acordo com a ABNT NBR 5738:2015 os CPs passaram pelo processo de retificação, de modo que suas superfícies se tornem lisas e livres de ondulações e abaulamentos, utilizando uma retificadora automática de corpos-de-prova MOD.: RCP-Automática N°:018/14 SEC MIX®.

3.4.6 Determinação da resistência à compressão axial

A compressão dos CPs cilíndricos transcorreu seguindo a prescrição da ABNT NBR 5739:2018. O equipamento utilizado para realização deste ensaio foi uma máquina universal de ensaios EMIC® DL 1500. O ensaio procedeu-se de acordo com as seguintes instruções da norma: o CP em condição saturada após a cura submersa e retificação teve suas faces limpas e secas, posteriormente, o mesmo foi posicionado de modo que ficasse centralizado no prato inferior do equipamento. Em seguida aplicou-se o carregamento de ensaio de forma contínua e sem choques, com velocidade de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s, sendo finalizado o ensaio quando houve uma queda de força que indique a ruptura do CP. A resistência à compressão axial se deu pela média de três CPs ensaiados de cada traço nas idades de 7 e 28 dias. O ensaio requerido é apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Ensaio de compressão CP 100 x 200 mm.



Fonte: Elaboração própria.

3.4.7 Determinação da absorção de água por capilaridade

A absorção de água através da ascensão capilar do concreto no estado endurecido determinou-se de acordo com o método estabelecido pela ABNT NBR 9779:2012. Inicialmente, foi verificado com o auxílio de uma balança de precisão WLC 10/A2 RADWAG® com capacidade máxima de 10 kg a massa dos CPs ao ar logo após retirados da cura submersa, em seguida, os CPs foram secos em estufa de secagem e esterilização digital de alta precisão MOD.: S600SD N.: 4060 Biopar® à temperatura de (105 ± 5) °C, até que atingissem constância de massa (quando a variação de massa entre duas pesagens consecutivas em intervalo de tempo de 2 h de permanência na estufa não for superior a 0,5 % do menor valor medido). Posteriormente, os CPs passaram a serem resfriados em estufa desligada até atingirem temperatura de (23 ± 2) °C e se obteve a massa seca (m_s). Em um ambiente com temperatura frequente de (23 ± 2) °C, posicionou-se os CPs sobre o recipiente de banho maria SL - 150 SOLAR® preenchido com água em nível constante de (5 ± 1) mm acima da base do CP. Durante o ensaio foi determinado a massa saturada (m_{sat}) dos CPs nos intervalos de tempo de 3 h, 6 h, 24 h, 48 h e 72

h, a partir da inserção destes em contato com a água, sendo previamente enxugados com pano úmido para a pesagem e posteriormente devolvidos ao recipiente de ensaio. Após a última etapa para averiguar a distribuição de água no interior dos CPs, estes foram rompidos por compressão diametral.

Na Figura 14 pode-se visualizar a realização do ensaio, no período em que os CPs estavam em banho maria para absorção de água.

Figura 14 – Ensaio de absorção de água.



Fonte: Elaboração própria.

3.4.8 Determinação da resistência à tração por compressão diametral

Os CPs cilíndricos passaram a ser submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral de acordo com a ABNT NBR 7222:2011. Para realização do ensaio, o CP foi posicionado na máquina universal de ensaios EMIC® DL 1500 com o suporte de duas tiras padronizadas de madeira ou aglomerado, ajustando a compressão do equipamento até que o CP se manteve estável na posição. Em seguida, aplicou-se o carregamento de ensaio de forma contínua e sem choques, com acréscimo da tensão de tração, com velocidade de $(0,05 \pm 0,02)$ MPa/s, até que o CP se rompeu.

Os CPs foram ensaiados a 32 dias pois após os 28 dias de cura, passaram pelo ensaio de absorção que durou 4 dias. Na Figura 15 é mostrado a realização do ensaio.

Figura 15 – Ensaio de tração CP 100 x 200 mm.



Fonte: Elaboração própria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico são apresentados e discutidos os resultados de desempenho obtidos nos ensaios realizados durante o presente trabalho, para o resíduo de vidro moído e para os corpos de prova de concreto estrutural de referência e com substituição parcial do cimento portland por resíduo de vidro moído.

4.1 Atividade pozolânica

Os resultados obtidos de resistência à compressão para cada argamassa estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados de Resistência à Compressão e DRM

Resistência à compressão aos 28 dias							
REF-AP	CP - 01	25,38	MPa	RVM-25	CP - 01	13,28	MPa
	CP - 02	21,46	MPa		CP - 02	12,86	MPa
	CP - 03	24,01	MPa		CP - 03	14,22	MPa
	CP - 04	25,52	MPa		CP - 04	14,35	MPa
	MÉDIA	24,09	MPa		MÉDIA	13,68	MPa
	DRM	5,93%		DRM	5,98%		

Fonte: Elaboração própria.

Os desvios relativos máximos (DRM) obtidos foram de 5,93% e 5,98% para os traços REF-AP e RVM-25 respectivamente, estando dentro da margem determinada pela NBR 5752:2014 de até 6%, para resultados de resistência à compressão média aos 28 dias aceitáveis.

O índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (I_{cimento}) foi calculado seguindo a Equação 2 abaixo, sendo igual a 57%. Estando abaixo das exigências estabelecidas na NBR 12653:1992, que determina um I_{cimento} mínimo de 75% para um material com atividade pozolânica.

$$I_{\text{cimento}} = (f_{cB} / f_{cA}) \cdot 100 \quad (2)$$

Onde:

f_{cB} é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados com cimento CP II-F-32 e 25% de material pozolânico (argamassa B), aproximada ao décimo e expressa em megapascals (MPa)

f_{cA} é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados apenas com cimento CP II-F-32 (argamassa A), aproximada ao décimo e expressa em megapascals (MPa)

Os fatores que podem ter ocasionado esse baixo índice, são as impurezas contidas no resíduo de vidro moído, pois como destacado na metodologia, o vidro não passou por um processo de limpeza em seu preparo para utilização no trabalho, pois o objetivo foi testar a viabilidade desde resíduo vindo direto da fábrica com todos seus componentes sem alteração a não ser de sua granulometria, pois entrou como substituto ao cimento e necessitava ter uma finura equivalente para substituição. Sendo possível que estas impurezas sem atividade pozolânica, sejam a cauda da redução do índice de desempenho do RMV, contudo, estudo mais aprofundados sobre essas impurezas devem ser realizados para o melhor entendimento deste resultado.

4.2 Resistência à compressão axial

Os resultados obtidos de resistência à compressão média, desvio padrão e coeficiente de variação (CV_e) para cada traço de concreto executado estão apresentados na Tabela 8.

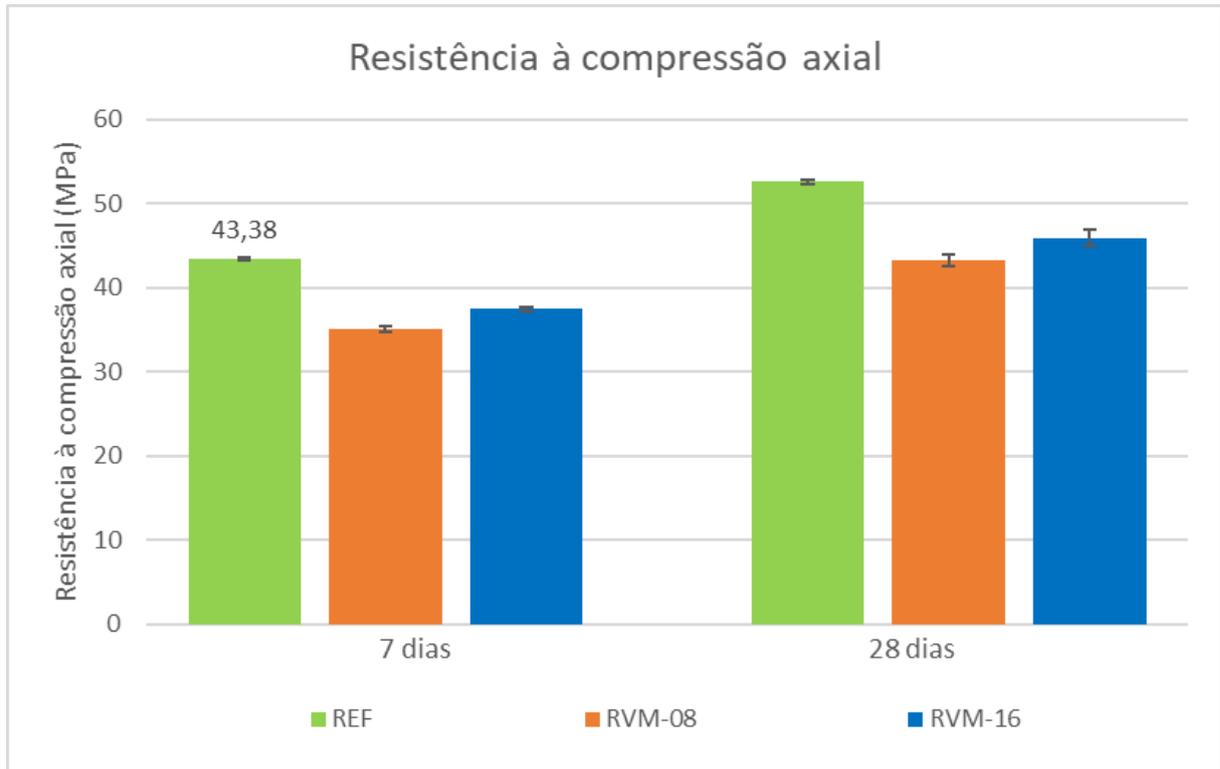
Tabela 8 – Resultados de Resistência à Compressão: Média, Desvio e CV_e

Traço	Resistência à compressão aos 7 e 28 dias					
	Tensão (MPa)		Desvio Padrão		Coef. de Variação (%)	
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
REF	43,38	52,53	0,21	0,21	0,49	0,39
RVM-08	35,13	43,24	0,37	0,74	1,04	1,71
RVM-16	37,49	45,87	0,25	0,98	0,68	2,14

Fonte: Elaboração própria.

Segundo a NBR 5739:2018 ensaios com coeficientes de variação menores ou igual à 3,00 possuem eficiência das operações de ensaio excelentes. Na Figura 16 são apresentados graficamente os resultados médios do ensaio de resistência à compressão, com seus respectivos desvios padrão.

Figura 16 – Resultados médios do ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Elaboração própria.

O concreto com 16% de substituição em relação ao referênciã, resultou em um decréscimo de 13,58% e 12,68% de resistência aos 7 e 28 dias respectivamente. Como o RVM não apresentou atividade pozolânica (característica que é também ligada a resistência), a diminuição da porcentagem de cimento substituído por material não pozolânico, pode ter ocasionado essa queda de resistência.

Para uma melhor comparação dos resultados foi realizado o Teste t de Student, com nível de significância de 0,05, sendo assim valores de valor-p maiores que 0,05 conclui-se que não se teve diferença significativa entre as médias analisadas. Logo, como expresso na Tabela 9, mesmo com o decréscimo de resistência aos 28 dias do RVM-08 e RVM-16, quando comparado a resistência do concreto de referênciã, não é significativo.

Tabela 9 – Valor-p para comparação das resistências à compressão em 7 e 28 dias

Teste t de Student (valor-p)						
Resistência à compressão - 7 dias	REF	RVM-08	REF	RVM-16	RVM-08	RVM-16
	0,0017		0,0002		0,0136	
Resistência à compressão - 28 dias	REF	RVM-08	REF	RVM-16	RVM-08	RVM-16
	0,0507		0,0507		0,9656	

Fonte: Elaboração própria.

4.3 Absorção de água por capilaridade

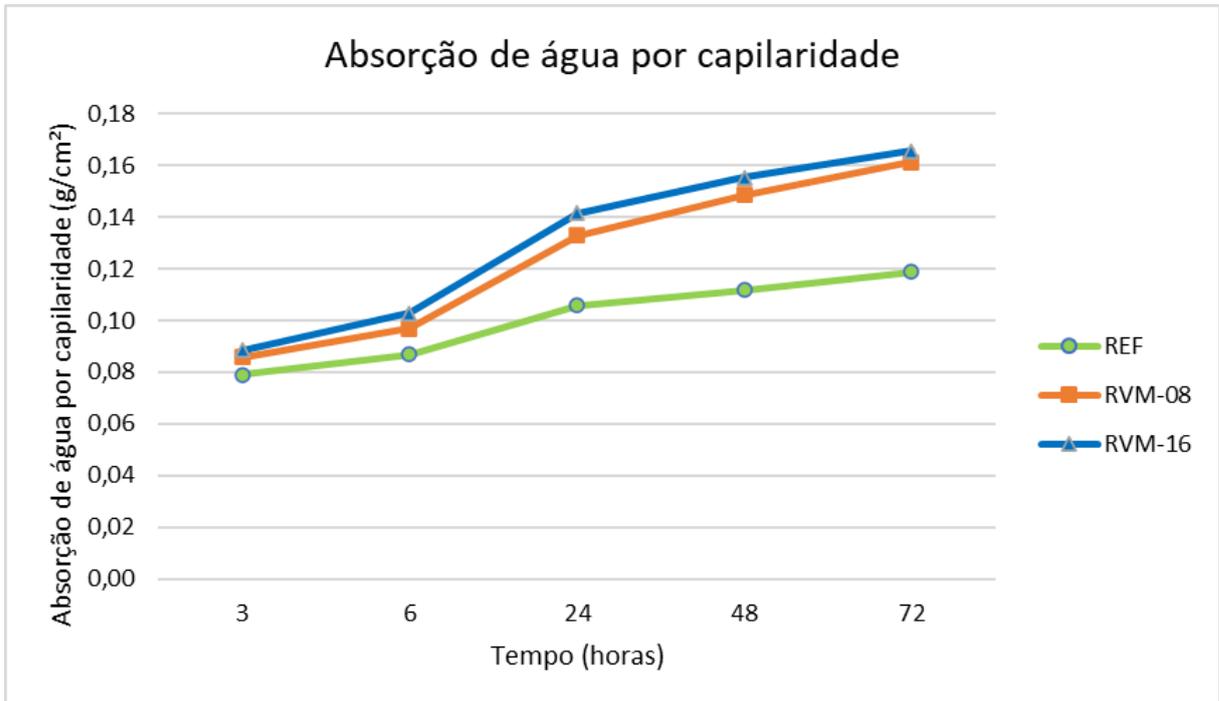
Como descrito no item 3.4.7 se obteve as massas secas e saturadas, e a partir delas foi calculado a absorção de água por capilaridade (AC) média utilizando a massa saturada de 72h, esses dados estão expressos na Tabela 10. E graficamente ilustrados nas Figura 17 e 18.

Tabela 10 – Resultados de Absorção de água por capilaridade

Absorção de água por capilaridade					
Traço	Massa Seca (g)	Massa Sat. (g) 72h	AC média (g/cm ²)	Desvio Padrão	Coef. de Variação (%)
REF	3719,93	3757,28	0,12	0,0023	1,93
RVM-08	3623,47	3674,16	0,16	0,0005	0,32
RVM-16	3689,6	3741,68	0,17	0,0048	2,88

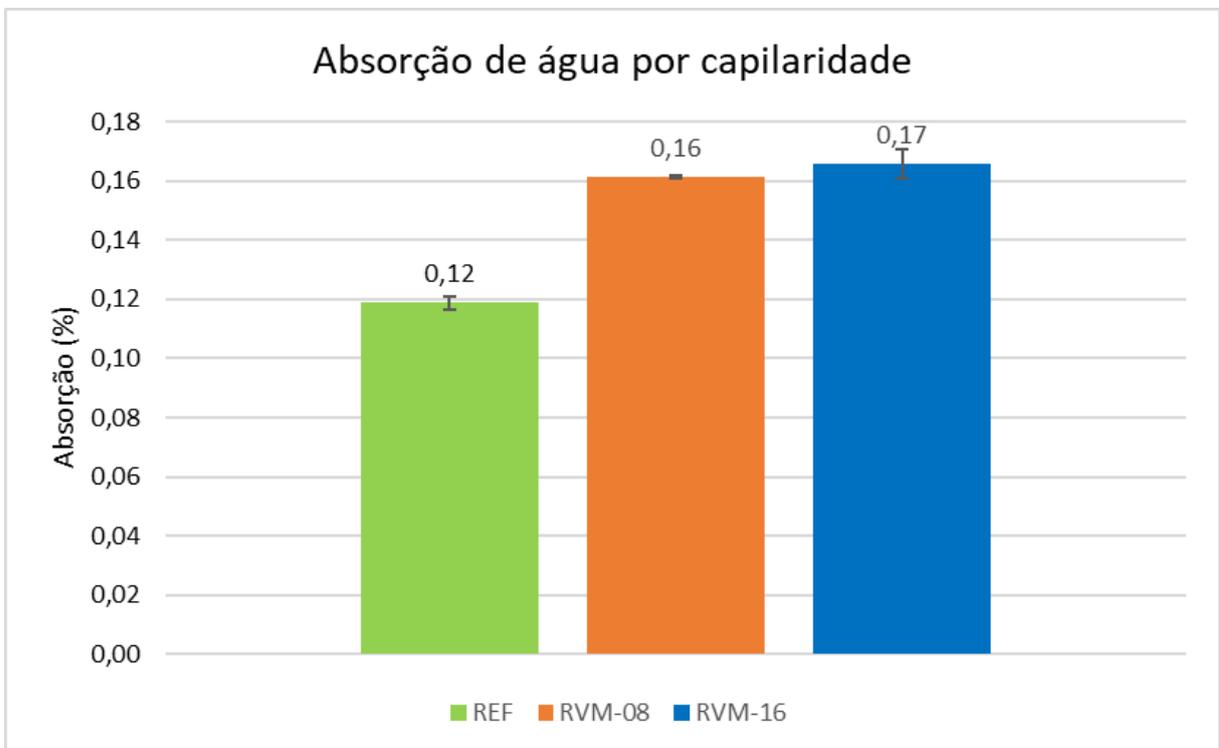
Fonte: Elaboração própria.

Figura 17 – Absorção média de água durante o ensaio de 3h a 72h.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 18 – Resultados médios do ensaio de absorção de água por capilaridade após 72h.



Fonte: Elaboração própria.

Para uma melhor comparação dos resultados foi realizado o Teste t de Student, com nível de significância de 0,05, sendo assim valores de valor-p maiores que 0,05 conclui-se que não se teve diferença significativa entre as médias analisadas. Logo, com base nos resultados apresentados na Figura 18, e a comparação de significância de diferença expressos na Tabela 11, é possível analisar que à medida que se acrescenta RVM na mistura do traço do concreto a absorção aumenta, com diferença significativa entre o REF e RVM-08 em que a absorção aumentou 35,76% e REF e RVM-16 em que a absorção aumentou 39,45% e diferença não significativa entre o RVM-08 e RVM-16.

Como apresentado no item 4.1, o RVM não apresentou atividade pozolânica, em vista disso, a inserção de um material não pozolânico no concreto, diminui os produtos de hidratação que preenchem os poros ao longo do processo, assim resultando em um concreto com maior absorção de água.

Tabela 11 - Valor-p para comparação da absorção de água por capilaridade em 72h

Absorção de água por capilaridade em 72h	Teste t de Student (valor-p)					
	REF	RVM-08	REF	RVM-16	RVM-08	RVM-16
		0,0062		0,0375		0,6398

Fonte: Elaboração própria.

4.4 Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados obtidos de resistência à compressão média, desvio padrão e coeficiente de variação (CV_e) para cada traço de concreto executado estão apresentados na Tabela 12.

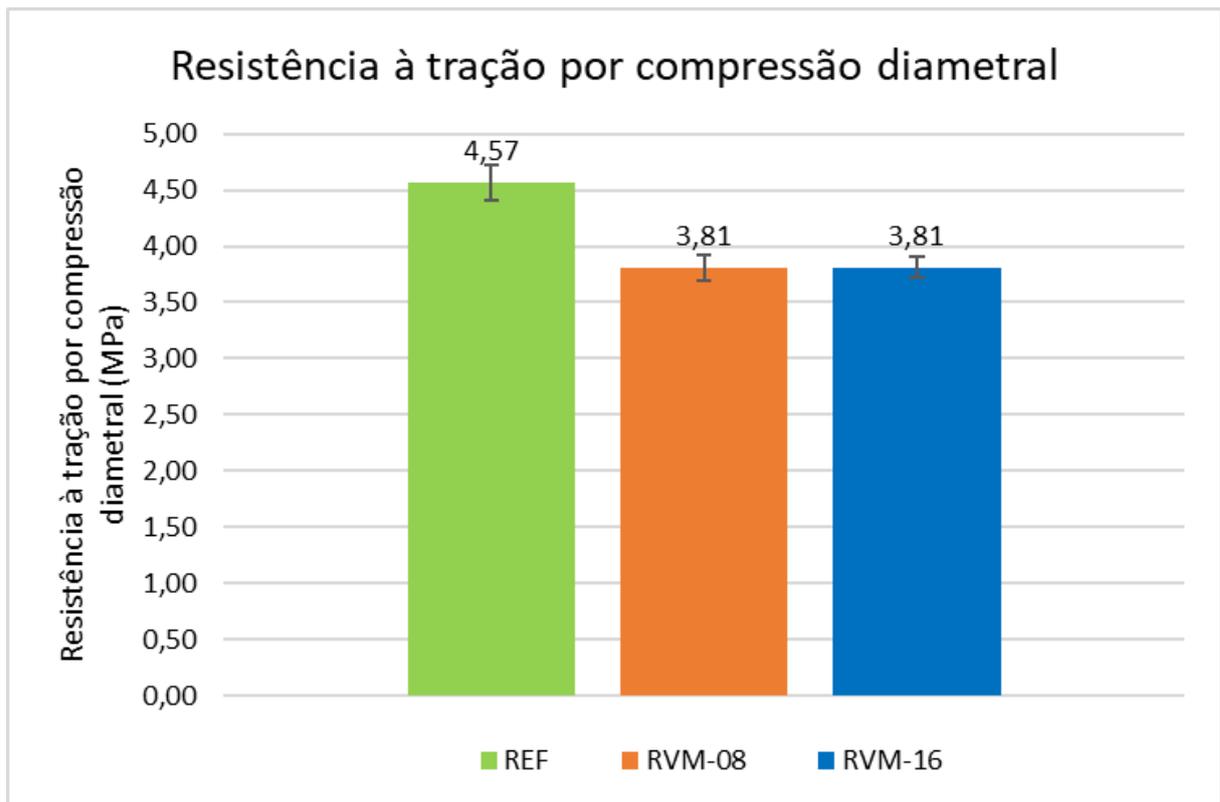
Tabela 12 – Resultados de Resistência à Tração: Média, Desvio e CV_e

Traço	Resistência à tração aos 32 dias		
	Tensão (MPa) 32 dias	Desvio Padrão 32 dias	Coef. de Variação (%) 32 dias
REF	4,57	0,16	3,44
RVM-08	3,81	0,12	3,04
RVM-16	3,81	0,09	2,49

Fonte: Elaboração própria.

O desvio padrão e o coeficiente de variação foram calculados segundo a NBR 5739:2018, que determina que coeficientes de variação menores ou igual à 3,00 possuem eficiência das operações de ensaio excelentes e de 3,00 a 4,00 muito bom. Na Figura 19 são apresentados graficamente os resultados médios do ensaio de resistência à tração.

Figura 19 – Resultados médios do ensaio de resistência à tração.



Fonte: Elaboração própria.

Para uma melhor comparação dos resultados foi realizado o Teste t de Student, com nível de significância de 0,05, sendo assim valores de valor-p maiores que 0,05 conclui-se que não se teve diferença significativa entre as médias analisadas. Logo, com base nos resultados apresentados na Figura 19, e a comparação de significância de diferença expressos na Tabela 13, é possível analisar que não houve diferença de resistência entre RVM-08 e RVM-16 e que ambos resultaram em um decréscimo de 16,63% quando comparados ao REF, porém diferença está, não significativa segundo o Teste t de Student.

Tabela 13 - Valor-p para comparação das resistências à tração em 32 dias

Resistência à tração - 32 dias	Teste t de Student (valor-p)					
	REF	RVM-08	REF	RVM-16	RVM-08	RVM-16
	0,1999		0,1833		0,9070	

Fonte: Elaboração própria.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo geral verificar a viabilidade da utilização do resíduo de vidro moído sujo como substituto parcial do cimento Portland, em concreto estrutural. São pontuadas as seguintes considerações, baseadas nos resultados obtidos das análises executadas durante a pesquisa:

- O resíduo de vidro moído apresentou um I_{cimento} de 57%, sendo assim considerado um material não pozolânico.
- Para a resistência à compressão aos 28 dias, o RVM-16 apresentou decréscimo de 12,68% em relação ao REF, contudo a diferença de resistência não foi significativa de acordo com o Teste t de Student aplicado nos resultados.
- Os traços RVM-08 e RVM-16 absorveram 35,76% e 39,45% mais água em relação ao referencial, respectivamente.
- Ambas as substituições de 8% e 16% apresentaram 16,63% de decréscimo de resistência à tração, contudo a diferença de resistência não foi significativa de acordo com o Teste t de Student aplicado nos resultados.
- Em relação a sustentabilidade:
 - A substituição de 8% reduziria a utilização de 35,46 toneladas de cimento, sendo também a quantidade de RVM que teria um destino sustentável, a cada 1000 m³ de concreto produzido.
 - A substituição de 16% reduziria a utilização de 61,44 toneladas de cimento, sendo também a quantidade de RVM que teria um destino sustentável, a cada 1000 m³ de concreto produzido.
 - Vale ressaltar que é necessário um estudo do gasto de energia no processo para utilização do RVM como substituto parcial ao cimento, para saber a real viabilidade em relação a sustentabilidade.

Concluindo, o material não apresentou melhoras nos quesitos analisados, contudo, em relação a resistência à compressão e à tração, os decréscimos não são significativos. Desde modo, ainda são necessários estudos com o RVM previamente limpo, eliminando as impurezas que possivelmente interferiram negativamente na análise pozolânica, além do estudo do gasto de energia desde processo para

utilização do RVM como substituto, para avaliar se seu impacto em grande escala é realmente menor que o uso convencional de 100% de cimento.

REFERÊNCIAS

- ABIVIDRO. **Vidro**. [S. l.]: Associação Brasileira das Indústrias de Vidro, 2009. Disponível em: <http://www.abividro.org.br/noticias.php/120>. Acesso em 30 jul. 2022.
- ABIVIDRO. **Reciclagem do Vidro**. [S. l.]: Associação Brasileira das Indústrias de Vidro, 2019. Disponível em: www.abividro.org.br/. Acesso em 30 jun. 2022.
- ABIVIDRO. **Porque o vidro é a melhor opção para reciclar: É PURO É VIDRO**. Associação Brasileira das Indústrias de Vidro: [s. n.], 17/05/2021. 26 p. *E-book* (26p.).
- ABIVIDRO. **Benefícios da Reciclagem do Vidro**. [S. l.]: Associação Brasileira das Indústrias de Vidro, 2022. Disponível em: <https://abividro.org.br/beneficios-da-reciclagem-do-vidro/>. Acesso em 30 jun. 2022.
- ABRABE. **Glass is Good**. [S. l.]: Associação Brasileira de Bebidas, 2016. Disponível em: <https://www.abrabe.org.br/glass-is-good/gig1/>. Acesso em 30 jun. 2022.
- AKERMAN, M. **Natureza, Estrutura e Propriedades do Vidro**. CETEV – Centro Técnico de Elaboração do Vidro. Saint-Gobain Vidros do Brasil, 2000.
- ALIABDO, A. A.; ELMOATY, A. E. M. A.; ABOSHAMA, A. Y. Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete. **Construction and Building Materials**. v. 124, p. 866 - 877, out. 2016.
- ANTÔNIO, A. P. Potencialidades do aproveitamento do resíduo de estação de tratamento de efluentes do processo de lapidação do vidro sodo-cálcico na produção de concretos. Prof. Dr. Ing. João Luiz Calmon Nogueira da Gama. 2012. 162 p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória (ES), 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro (RJ), ABNT, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 33**: Concreto – Amostragem de concreto fresco. Rio de Janeiro (RJ), ABNT, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro (RJ), ABNT, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro (RJ), ABNT, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro (RJ), ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776**: Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapmann. Rio de Janeiro (RJ), ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro (RJ), ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005**: Procedimentos para obtenção do extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro (RJ), ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006**: Procedimentos para obtenção do extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro (RJ), ABNT, 2004.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro (RJ), ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro (RJ), ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro (RJ), ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro (RJ), ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214**: Areia normal para ensaio de cimento – Especificação. Rio de Janeiro (RJ), ABNT, 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro (RJ), ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro (RJ), ABNT, 2019.

BEERKENS, Ruud GC; SANTEN, Engelbert van. Recycling in container glass production: present problems in European glass industry. In: **A Collection of Papers Presented at the 66th Conference on Glass Problems: Ceramic Engineering and Science Proceedings**. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2006. p. 181-202.

BERNSTEIN, L.; ROY, J.; DELHOTAL, K. C.; HARNISCH, J.; MATSUHASHI, R.; PRICE, L.; TANAKA, K.; WORRELL, E.; YAMBA, F.; FENGQI, Z. Industry. In: **IPCC Fourth Assessment Report**, 2007. Working Group III. Mitigation of Climate Change. Metz B., Davidson O. R., Bosch P. R., Dave R., Meyer L. A. (editors). Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 5. ed. Brasília, 2020.

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8ª edição, LTC editora, Rio de Janeiro (RJ), 2012.

CARMO, M. E. R. D.; FERNANDES, F. A. D. 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. 73º Congresso Anual da ABM – Internacional. São Paulo (SP), 2-4 out. 2018.

CEMPRE. **Vidro – O mercado para reciclagem**. [S. l.]: Compromisso empresarial para reciclagem, 2011. Disponível em: http://www.cempre.org.br/ft_vidros.php. Acesso em 30 jun. 2022.

CEMPRE. **Resíduos de vidro**. [S. l.]: Compromisso empresarial para reciclagem, 2022. Disponível em: www.cempre.org.br. Acesso em 30 jun. 2022.

COUTINHO, A.S. **Fabrico e propriedades do betão**. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, v. 1, Lisboa, 1997. 401 p.

CRQ-IV. **Vidro**. [S. l.]: Conselho Regional de Química – IV Região, 13 abr. 2011. Disponível em:

<https://www.crq4.org.br/vidroquimicaviva#:~:text=Sodo%2Dc%C3%A1lcico%3A%20%C3%A9%20o%20vidro,ind%C3%BAstria%20automobil%C3%ADstica%20e%20em%20eletrodom%C3%A9sticos>. Acesso em: 20 jun. 2022.

DYER, D. T.; DHIR, K. R. Chemical Reactions of Glass Cullet Used as Cement Component. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 13, p. 412-417, 2001.

FRAGATA, A.; VEIGA, M. R.; VELOSA, A. L.; FERREIRA, V.M. **Incorporação de Resíduos de Vidro em argamassas de revestimento – Avaliação da sua influência nas características da argamassa**. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção. Parque das Nações – Lisboa, 2007.

GHAVAMI, K. Non-conventional material and technologies: applications and future tendencies. In: **The 11th International Conference on Non-conventional materials technologies**. (NOCMAT), Bath, UK, 2009.

GOBBI, A. Atividade pozolânica de adições minerais pelas NBR 5751/2012 e NBR 5752/2012: Uma análise crítica a partir de métodos complementares. Prof. Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros. 2014. 143 p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba (PR), 2014.

HUNTZINGER, D. N.; EATMON, T. D. A life-cycle assessment of cement manufacturing: comparing traditional process with alternative technologies. **Journal of Cleaner Production**. v. 17, p. 668 - 675, 2009.

HUNTZINGER, D. N.; EATMON, T. D. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. **Journal of cleaner production**, v. 17, n. 7, p. 668-675, 2009.

JENNINGS, H. M.; BULLARD, J. W. From electrons to infrastructure: Engineering concrete from the bottom up. **Cement and Concrete Composites**, v. 41, p. 727-735, 2011.

KHATIB, J. M.; NEGIM E. M.; SOHL, H. S.; CHILESHE, N. Glass powder utilization in concrete production. **European Journal of Applied Sciences**. v. 4, n. 4, p. 173-176, 2012.

KHONGPROM, P.; SUWANMANEE, U. Environmental benefits of the integrated alternative technologies of the Portland cement production: A case study in Thailand. **Engineering Journal**, v. 21, n. 7, p. 15-27, 2017.

LIPPIATT, B.; AHMAD, S. Measuring the life-cycle environmental and economic performance of concrete: the BEES approach. In: **Proceedings of the International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology**. Pequim, p. 213-230, 2004.

MAGESWARI, M.; VIDIVELLI, B. The Use of Sheet Glass Powder as Fine Aggregate Replacement in Concrete. **The Open Civil Engineering Journal**, ano 2009, v. 4, p. 65-71, 2010.

MASSAZZA, F. In: **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**, Hewlett, P.C. (ed), 4th ed, New Yourk: J.Wiley. p.471-63, 1988.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto**: Estrutura, Propriedades e Materiais. 1 ed. São Paulo (SP): PINI, 1994. 581 p.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto**: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 3 ed. São Paulo (SP): IBRACON, 2008.

NASSAR, R. U. D.; SOROUSHIAN, P. Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 368-377, 2012.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2 ed. rev. atual. São Paulo (SP): PINI, 1997. 828 p.

OLIVEIRA, L. A. P. D.; CASTRO-GOMES, J. P.; SANTOS, P. **Mechanical and Durability Properties of concrete with Ground waste Glass Sand**. International conference on durability of Building Materials and componentes. Istanbul – Turkey, 11-14 may. 2008.

OLIVEIRA, J. D. O.; Previsão da resistência à compressão de concretos pelo método da maturidade: influência do tipo de cimento e cura.

OLIVEIRA, J. D. O. Previsão da resistência à compressão de concretos pelo método da maturidade: influência do tipo de cimento e cura. Prof^a . Dr^a . Fernanda B. Pereira da Costa. 2022. 67 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pampa, Alegrete (RS), 2022.

OMRAN, A.; SOLIMAN, N.; ZIDOL, A.; TAGNIT-HAMOU, A. Performance of ground-glass pozzolan as a cementitious material - A review. **Advances in Civil Engineering Materials**, v. 7, n. 1, p. 237-270, 2018.

PATIL, D. M.; SANGLE, K. K. Experimental investigation of waste glass powder as partial replacement of cement in concrete. **International Journal of Advanced Technology in Civil Engineering**, v. 2, n. 1, p. 2231-5721, jan. 2013.

PINTO-COELHO, R. M. Produção, consumo e reciclagem de vidro no Brasil. **Reciclagem e Desenvolvimento sustentável no Brasil**, p. 173-194, 2009.

PRUDHVI, K.; SAIPRASAD, K.; SRIKANTH, K. R.; MANOJ, K. K.; VINAY D. Laboratory study on “compressive strength of concrete with glass powder as partial replacement of cement. **Journal of Emerging Technologies and Innovative Research**. v. 3, n. 5, p. 272-277, maio 2016.

ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. Aproveitamento de resíduos da construção na construção. In: ROCHA, Janaíde Costa; JHON, Vanderley M. (Ed.) **Utilização de resíduos na construção habitacional**. Porto Alegre, Coleção Habitare, v. 4, 2003.

RODRIGUES, M. S.; MONZÓ, J. M. B.; BORRACHERO, M. V.; PAYA, J. B.; BERALDO, A. L.; SAVASTANO JÚNIOR, H. **Characterization and pozzolanic evaluation of sugar cane bagasse ashes**. In: 12 th international Conference on Non-Conventional Materials and Technologies. Cairo, Egypt: HRBC, 2010. v. 1. p. 1-9.

SÁ, J. S.; CASTRO JÚNIOR, E.; OLIVEIRA, S. L.; BARBOSA, A. H. Cinza do bagaço de cana-de-açúcar para utilização em concretos: aplicação experimental. In: IBRACON - CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 53, Florianópolis (SC). 2011. **Anais...**, 2011.

SALES, F. A. Estudo da atividade pozolânica de micropartículas de vidro soda-cal, incolor e âmbar, e sua influência no desempenho de compostos de cimento portland. Prof^a . Dr^a . Maria Teresa Paulino de Aguiar. 2014. 139 p. Tese (Pós-Graduação em

Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais (MG), 2014.

SANTANA, B. V. D.; ALEIXO, I. V. **Avaliação da absorção por capilaridade de argamassas para revestimento com diferentes aditivos impermeabilizantes.** Orientador: Irene de Azevedo Lima Joffily. 2017. 62 p. Relatório (Pesquisa de Iniciação Científica) - Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, Brasília (DF), 2017.

SHAYAN, A.; XU, A. Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 3, p. 457-468, 2006.

SHEKHAWAT, B. S.; AGGARWAL, V. Utilisation of waste glass powder in concrete – a literature review. **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**, v. 3, n. 7, p. 14822-14826, 2014.

SICHERI, E. P.; CARAM, R.; SANTOS, J. C. P. D. Vidros na construção civil. ISAIA, G. C. (ed). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** v. 2, n. 1. São Paulo (SP), IBRACON, 2007.

SIMÕES, L. J. **Estudo da aplicação de resíduo de vidro laminado na produção de concreto.** Prof. Dr. Fernando Avancini Tristão. 2013. 142 p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória (ES), 2013.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE CIMENTO. **Relatório anual 2020.** Rio de Janeiro (RJ), SNIC, 2020.

SOLIMAN, N. A.; TAGNIT-HAMOU, A. Partial substitution of silica fume with fine glass powder in UHPC: Filling the micro gap. **Construction and Building Materials**, v. 139, p. 374-383, 2017.

SOMBIR; BERWAL, P. A laboratory study on use of waste glass powder as partial replacement of cement in concrete production. **International Journal of Advanced Research, Ideas and Innovations in Technology**, v. 3, n. 1, p. 143-151, 2017.

SUPERIOR TRIBUNAL DE JUSTIÇA. **Agenda 2030.** STJ, 2020. Disponível em: <https://portal.stf.jus.br/hotsites/agenda-2030/#:~:text=A%20Agenda%202030%20da%20ONU,17%20objetivos%20de%20de%20senvolvimento%20sustent%C3%A1veis>. Acesso em 20 jul. 2022.

TECNOSIL IND. E COM. DE MATERIAIS DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO LTDA. **Ficha Técnica:** Silicon ns high 200. Itupeva (SP), v. 04/18, n. 148, TECNOSIL, 2018.

TORRICO, F. A. **Análise teórica e experimental do comportamento de pilares esbeltos de concreto de alta resistência, considerando a ductilidade.** Orientador: José Samuel Giongo. 2010. 311 p. Tese (Doutorado em Engenharia de

Estruturas) - Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos (SP), 2010.

VIJAYAKUMAR, G.; VISHALINY, H.; GOVINDARAJULU, D. Studies on glass powder as partial replacement of cement in concrete production. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 3, n. 2, p. 153-157, 2 fev. 2013.

VISHWAKARMA, V.; RAMACHANDRAN, D. Green Concrete mix using solid waste and nanoparticles as alternatives - A review. **Construction and Building Materials**, v. 162, p. 96-103, 2018.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Cement Sustainability Initiative**. Cement technology roadmap 2009: Carbon emissions reductions up to 2050. Paris, WBCSD, 2010.