



CARINA LOANE COSTA DE OLIVEIRA
MARIA GABRIELA GONZAGA BAIM

AVALIAÇÃO DE ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND UTILIZANDO
RESÍDUO DE VIDRO MOÍDO

Porto Velho
2021

CARINA LOANE COSTA DE OLIVEIRA
MARIA GABRIELA GONZAGA BAIM

**AVALIAÇÃO DE ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND UTILIZANDO
RESÍDUO DE VIDRO MOÍDO**

Monografia apresentada à Banca Examinadora do Curso Engenharia Civil do Centro Universitário São Lucas, como requisito de aprovação para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Raduan Krause Lopes.

Porto Velho
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação - CIP

O48a Oliveira, Carina Loane Costa de.

Avaliação de argamassas de cimento Portland utilizando resíduo de vidro moído. / Carina Loane Costa de Oliveira, Maria Gabriela Gonzaga Baim. – Porto Velho, 2021.
69 f. ; 30 cm.

Monografia (Graduação) – Centro Universitário São Lucas Porto Velho, 2021.

Orientação Prof. Me. Raduan Krause Lopes, Coordenação de Engenharia Civil.

1. Engenharia Civil. 2. Resíduo de Vidro. 2. Cimento. 3. Atividade Pozolânica. 4. Reação Álcali – Sílica. 5. Argamassa. I. Título. II. Baim, Maria Gabriela Gonzaga. III. Lopes, Raduan Krause.

CDU 666.971.4

CARINA LOANE COSTA DE OLIVEIRA

MARIA GABRIELA GONZAGA BAIM

Monografia apresentada à Banca Examinadora do Curso Engenharia Civil do Centro Universitário São Lucas, como requisito de aprovação para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Raduan Krause Lopes.

Porto Velho, 01 de dezembro de 2021.

Nota: 8,67

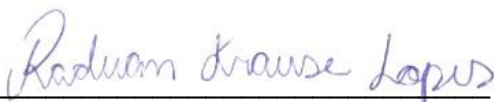
BANCA EXAMINADORA


Prof.^a Dra. Bárbara Jordani

Uniftec Centro Universitário


Prof.^a Ma. Jayne Carlos Piovesan

Centro Universitário São Lucas


Prof. Me. Raduan Krause Lopes

Centro Universitário São Lucas

DEDICATÓRIA

A Deus, o grande autor de nossas vidas e de nosso destino, pois sem sua ajuda e sem sua vontade divina, essa conquista jamais seria possível. A nossa família, pelo incentivo e pela confiança ao longo de nossos estudos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por iluminar e guiar todos os nossos passos, nos mostrando o caminho certo a ser seguido.

Ao nosso orientador, professor Me. Raduan Krause Lopes, por todo o conhecimento repassado, pela paciência, suporte, incentivo e principalmente pela confiança e amizade que pudemos construir nessa jornada.

A todos nossos professores do departamento de Engenharia Civil, que através dos seus ensinamentos permitiram que pudéssemos hoje estar concluindo este curso e enfim nos formando como engenheiras.

Aos nossos verdadeiros amigos, que também nos acompanharam nessa caminhada, torcendo por nós e tornando-a mais divertida.

Carina:

Aos melhores pais do mundo, Mário e Eugênia, por todo amor e dedicação, por sempre me apoiaram incondicionalmente e incentivaram a nunca desistir, me servindo de alicerce para as minhas realizações.

Em memória ao meu querido pai Mário Alves, ao qual seu sonho era ver sua caçula formada, e hoje lá no céu me assiste e abençoa essa conquista.

Ao meu amado Henrique, que não mediu esforços para me ajudar na reta final dessa caminhada, pelos desabafos e surtos não serem maiores que seu amor e compreensão.

Maria Gabriela:

À minha família, especialmente minha amada mãe Luciana, que fez de tudo para tornar os momentos de dificuldade mais suaves.

Aos meus avós por ter me mantido no caminho certo durante todo o curso e principalmente neste projeto de pesquisa e ter me dado forças para chegar até o final.

Ao meu irmão Lucas, que sempre esteve disposto a me ajudar.

Em memória ao meu pai Joel, por ter me ensinado valores que conduziram meus passos até aqui e sempre foi meu maior exemplo de luta e determinação.

*“O único lugar onde o sucesso vem antes
de trabalho é no dicionário.”
(Albert Einstein)*

RESUMO

O crescimento industrial, bem como as indústrias da construção civil, traz como consequência a desenfreada geração de resíduos, somado às enormes emissões de gases poluentes na atmosfera. Com o constante esforço de tentar conter esses impactos causados ao meio ambiente, busca-se alternativas de reutilização de resíduos incorporados como material suplementar em compósitos cimentícios. Deste modo, o vidro quando finamente moído, tem apresentado grande potencial pozolânico, entretanto, a sílica amorfa contida em sua composição requer cuidados uma vez que pode manifestar expansões devido à reação álcali-sílica, vindo a comprometer a propriedade dos compostos. Nesta presente pesquisa, foram analisados a substituição parcial do cimento Portland por resíduo de vidro moído nos teores de 10%, 20% e 30%. Para isso, os constituintes da argamassa foram caracterizados física e quimicamente, e posteriormente, efetuados ensaios a partir de suas propriedades no estado fresco, conforme o espalhamento, e no estado endurecido, de acordo com a resistência à compressão axial. Os resultados alcançados mostraram que os traços com teores de 20% e 30% de substituição exibiram os maiores ganhos de desempenho mecânico entre a idade inicial e final de 28 dias. Sendo assim, o resíduo de vidro finamente moído apresenta potencial uso como adição mineral na confecção de argamassas.

Palavras-chave: Resíduo de vidro; Cimento Portland; Atividade pozolânica; Reação álcali-sílica; Argamassa.

ABSTRACT

The industrial growth, as well as the civil construction industries, bring as a consequence the unrestrained generation of waste, added to the enormous emissions of polluting gases into the atmosphere. With the constant effort to try to contain these impacts caused to the environment, alternatives are sought for the reuse of waste incorporated as supplementary material in cementitious composites. Thus, when finely ground glass, has shown great pozzolanic potential, however, the amorphous silica contained in its composition requires care since it can show expansions due to the alkali-silica reaction, compromising the properties of the compounds. In this present research, the partial replacement of Portland cement by ground glass residue in the contents of 10%, 20% and 30% was analyzed. For this, the constituents of the mortar were characterized physically and chemically, and later, tests were carried out based on their properties in the fresh state, according to spreading, and in the hardened state, according to the resistance to axial compression. The results achieved showed that the mixes with 20% and 30% replacement contents exhibited the greatest gains in mechanical performance between the initial and final age of 28 days. Therefore, the glass residue has potential use as a mineral addition in the manufacture of mortars.

Keywords: Waste glass; Portland cement; Pozzolanic activity; Alkali-silica reaction; Mortar.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização das fábricas por região do Brasil.....	20
Figura 2 - Processo de Produção do Vidro.	32
Figura 3 - Fabricação do vidro plano pelo processo <i>Float</i>	33
Figura 4 - (a) e (b) Mesas de corte das chapas de vidro plano; (c) e (d) Processo de desbastamento do vidro.	43
Figura 5 - Etapa de desbastamento dos vidros planos: (a), (b) e (c) Processo de recolhimento e despejo das máquinas desbastamento; (d) Câmara de tratamento de floculação da água e do resíduo de vidro; (e) e (f) Descarte do resíduo de vidro sedimentado.....	44
Figura 6 - Etapa de preparação do resíduo de vidro: (a) Secagem do resíduo de vidro na estufa; (b) Resíduo de vidro destorroadado.	45
Figura 7 - Ensaio de espalhamento das argamassas na mesa de consistência.	48
Figura 8 - Elaboração dos corpos de prova de argamassa.	48
Figura 9 - Equipamentos para ensaios de resistência: (a) Máquina.....	49
de retificação; (b) Prensa hidráulica.	49
Figura 10 - distribuição granulométrica do cimento CP II-F-32	50
Figura 11 - Termogravimetria do cimento	51
Figura 12 - Difração de raios-X do cimento.....	51
Figura 13 - Curva granulométrica da areia.....	52
Figura 14 - Distribuição granulométrica do vidro.	53
Figura 15 - Difração raio-X do resíduo de vidro.....	55
Figura 16 - Gráfico dos valores de resistência à compressão das argamassas por teor de substituição.	56
Figura 17 - Corpos de prova das argamassas rompidas à compressão: (a) Traço de referência; (b), (c), (d) Traços com teor de substituição de 10%, 20%, 30% de resíduo de vidro, respectivamente.	57

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação e exemplo de adições minerais.	24
Quadro 2 - Métodos de ensaios de caracterização do agregado miúdo utilizado.	42
Quadro 3 - Nomenclatura dos traços confeccionados de acordo com o teor de substituição.	47
Quadro 4 - Compostos do cimento em porcentual.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa). ..	25
Tabela 2 - Composição Geral do Vidro	31
Tabela 3 - Composição química do cimento.	40
Tabela 4 - Parâmetros físicos do cimento.	41
Tabela 5 - Resultado dos ensaios de caracterizações físicas do agregado miúdo ...	52
Tabela 6 - Valores de resistência à compressão e medidas de espalhamento das argamassas.....	55
Tabela 7 - Ganhos de resistência à compressão entre a idade inicial e final.	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
μ	Micro
a.C.	Antes de Cristo
ABCP	Associação Brasileira do Cimento Portland
ABIVIDRO	Associação Brasileira das Indústrias de Vidro
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRABE	Associação Brasileira de Bebidas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio
C ₂ S	Silicato Dicálcico
C ₃ A	Aluminato Tricálcico
C ₃ S	Silicato Tricálcico
C ₄ AF	Ferro Aluminato Tetracálcico
Ca(OH) ₂	Hidróxido de Cálcio
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CO ₂	Dióxido de Carbono
CRO	Conselho Regional de Química
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
d.C.	Depois de Cristo
DRX	Difração de Raios X
Fe ₂ O ₃	Óxido de Ferro
FRX	Fluorescência de Raios X

IFAM	Instituto Federal do Amazonas
LCVMAT	Laboratório de Caracterização e Valoração dos Materiais
LSCN	Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomateriais
LTDA	Limitada
m	Metros
m ²	Metros Quadrados
min	Minuto
mm	Milímetros
MPa	Mega Pascal
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
PET	Polietileno Tereftalato
RAA	Reação Álcali-Agregado
RAS	Reação Álcali-Sílica
RMV	Resíduo Moído de Vidro
s	Segundo(s)
SiO ₂	Dióxido de Silício
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
SO ₂	Dióxido de Enxofre
T10	Traço com Teor de Substituição de 10%
T20	Traço com Teor de Substituição de 20%
T30	Traço com Teor de Substituição de 30%
TR	Traço de Referência
UFAM	Universidade Federal do Amazonas
UNFCCC	Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima

UNISINOS	Universidade do Vale do Rio Sinos
UNISL	Centro Universitário São Lucas
VCR	Vidro de Cristal
VFTB	Vidro do Funil de Tubos de Raios Catódicos
VLMT	Vidro de Lâmpadas Fluorescentes
VSDC	Vidro Sodo-cálcico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	17
1.1.1 Objetivo Geral	17
1.1.2 Objetivos Específicos	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
2.1 CIMENTO.....	19
2.1.1 Composição e produção do cimento Portland	19
2.1.2 Impacto ambiental do cimento	20
2.2 ADIÇÕES MINERAIS EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS	21
2.3 ARGAMASSAS.....	28
2.3.1 Argamassas hidráulicas e suas propriedades	28
2.4 VIDRO	29
2.4.1 Histórico.....	29
2.4.2 Caracterização técnica do vidro.....	30
2.4.3 Vidros sodo-cálcicos	32
2.4.4 Resíduo de vidro	34
2.5 VIDRO E SUA UTILIZAÇÃO EM MATRIZ CIMENTÍCIA	35
3 MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1 ÁGUA	40
3.2 CIMENTO.....	40
3.2.1 Caracterização do cimento Portland CP II-F-32	41
3.2.1.1 Granulometria à laser do cimento.....	41
3.2.1.2 Termogravimetria do cimento	41
3.2.1.3 Difração de raios X - DRX - Cimento	42
3.3 AGREGADO MIÚDO	42
3.3.1 Métodos de ensaios de caracterização do agregado miúdo	42
3.4 RESÍDUO DE VIDRO	43
3.4.1 Coleta e método de preparação do resíduo de vidro.....	43
3.4.1.1 Coleta do resíduo de vidro	43
3.4.1.2 Método de preparação e moagem do resíduo de vidro	45
3.4.2 Métodos de caracterização do resíduo de vidro.....	46
3.4.2.1 Granulometria à laser do resíduo de vidro moído.....	46
3.4.2.2 Composição química do resíduo de vidro	46
3.4.2.3 Análise de difração de raios X - DRX - resíduo de vidro	46

3.5 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS	47
3.5.1 Dosagem das argamassas	47
3.5.2 Ensaio de resistência mecânica	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS	50
4.1.1 Cimento	50
4.1.1.1 Granulometria à laser do cimento.....	50
4.1.1.2 Termogravimetria do cimento	50
4.1.1.3 Difração de raios X - DRX - Cimento.....	51
4.1.2 Agregado Miúdo	52
4.1.3 Resíduo de vidro	53
4.1.3.1 Granulometria à laser do resíduo de vidro moído.....	53
4.1.3.2 Composição química do resíduo de vidro	54
4.1.3.3 Análise de difração de raio X – DRX – Resíduo de vidro	54
4.1.4 Caracterização das Argamassas com resíduo de vidro moído	55
4.1.4.1 Resistência à compressão.....	55
5 CONCLUSÃO	58
REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

O intenso desenvolvimento industrial adjunto com o exacerbado crescimento populacional e necessidade do consumo de bens e serviços, sobretudo a superprodução de bens descartáveis, trouxe como consequência a geração e o descarte desproporcional de quantidades gigantescas de resíduos sólidos, em sua maioria sem nenhuma destinação adequada em lixões e aterros sanitários, acarretando problemas de responsabilidade social, tal como impactos ambientais e à saúde humana (EFING; PAIVA, 2016).

No que se refere às áreas industriais da engenharia civil, a do cimento é a que mais acarreta consequências danosas para o meio ambiente. Esse problema é observado durante toda a sua linha de produção, desde a obtenção de suas matérias primas até o produto final (MAURY; BLUMENSCHIN, 2012). Na sua fase extrativa, causa erosões e desmoronamentos com contaminação dos cursos d'água. Consecutivamente, durante a clínquerização, é gerado dióxido de carbono (CO_2) e dióxido de enxofre (SO_2) (HUMPHREYS; MAHASANAN, 2002). De acordo com Lehne e Preston (2018), em torno de 7% das emissões de gases do efeito estufa é ocasionado pelos óxidos químicos e pelo processo de decarbonatação na fabricação do clínquer, componente base do cimento.

De acordo com a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC, 2011), a ideia de que a produção do cimento possa ser sustentável é uma busca constante, e esse impacto gerado pode ser reduzido utilizando métodos e materiais alternativos, na tentativa de tornar a construção ecologicamente correta.

Com o progresso de novas tecnologias e pesquisas advindas da área da construção civil, segundo Neville (2016), diferentes tipos de resíduos apresentam grande potencial ao serem substituídos ou adicionados durante a produção de cimentos, pastas, concretos e argamassas, a fim de auxiliar no desempenho estrutural, econômico e principalmente ambiental, dado que, esse desenvolvimento sustentável diminui a porcentagem de materiais poluentes e agressivos ao meio ambiente. Levando em consideração essa adequação do uso de subprodutos, pode-se destacar as misturas de materiais pozolânicos (LOTHENBACH et al., 2011), escórias (MASUERO, 2001), cinzas de materiais orgânicos (PAULA et al., 2009), entre outros.

A trajetória industrial do vidro no Brasil, tornou-o a partir de 2002, o maior produtor e exportador da América Latina. Os resíduos provenientes do processo de produção do vidro representam cerca de 3% do volume total dos resíduos sólidos urbanos em 2018 (ABRELPE, 2019). Apesar de ser um material não biodegradável e levar milhares de anos para se decompor, é 100% reciclável e pode ser reciclado infinitas vezes, porém, apenas 47% do total do volume gerado é reaproveitado (ABIVIDRO, 2019).

Neste contexto, diversos estudos confirmam que o vidro, na granulometria adequada a fim de reduzir a ocorrência da reação álcali-agregado (RAA), quando inserido em misturas à base de cimento, apresenta ganhos nas propriedades mecânicas, estabilidade química e na durabilidade (NASSAR; SOROUSHIAN, 2012), uma vez que, sua composição química apresenta níveis superiores a 70% de dióxido de silício ou sílica (SiO_2) (LEITE, 2010), concedendo altas propriedades pozolânicas na confecção sustentável de concretos e argamassas (SHI et. al, 2004).

Perante o exposto, este estudo tem o propósito de investigar a eficiência do aproveitamento do resíduo moído de vidro (RMV), proveniente das vidraçarias da cidade de Porto Velho/RO, como substituto parcial do cimento Portland com diferentes tipos de concentração na confecção de argamassas, de acordo com a avaliação de sua resistência a compressão com intuito de analisar seu potencial pozolânico, preconizando assim, uma solução sustentável minimizando os impactos ambientais causados pelo descarte imprudente.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar propriedades físico-mecânicas de argamassas de cimento Portland produzidas com resíduos de vidro em pó, provenientes de vidros planos sodo-cálcicos.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- a) Analisar a influência dos percentuais de substituição do cimento por resíduo de vidro na resistência mecânica das argamassas;
- b) Verificar o potencial pozolânico do resíduo de vidro;
- c) Discutir o ganho ambiental com a substituição do cimento pelo resíduo de vidro.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CIMENTO

2.1.1 Composição e produção do cimento Portland

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 16697:2018), o cimento Portland é um ligante hidráulico cuja composição utiliza clínquer, gesso, escória, calcário, e conforme as quantidades adicionais de outros materiais na mistura, formam diversos tipos de cimento. A utilização do cimento é fundamental para o desenvolvimento da infraestrutura de um país e é considerado o segundo material mais utilizado nas construções civis, sendo o principal insumo para confecção de corpos cimentícios (SNIC, 2019).

De acordo com Petrucci (1995), os principais constituintes do cimento são basicamente quatro compostos, sendo estes:

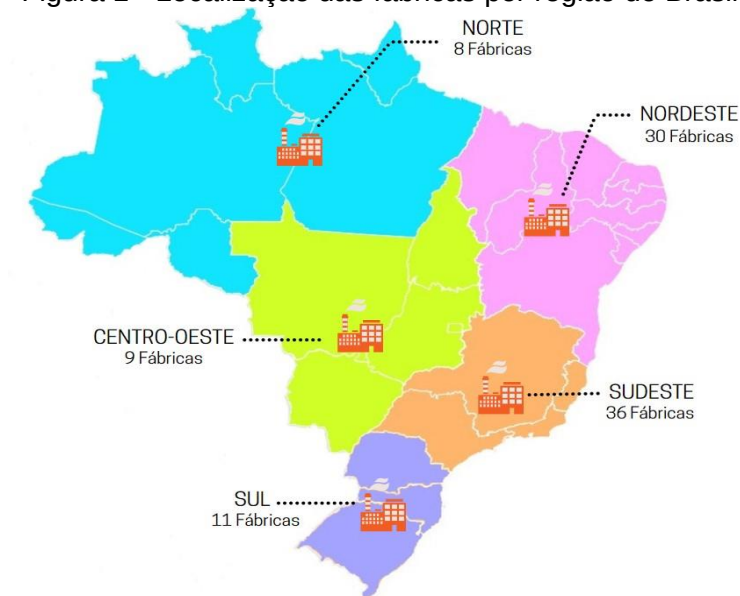
- Silicato Dicálcico (C_2S): encarregado do desempenho da resistência em idades mais avançadas do concreto, liberando calor lentamente;
- Silicato Tricálcico (C_3S): determina a resistência em todas as idades do concreto, principalmente nas iniciais, liberando calor imediato;
- Ferro Aluminato Tetracálcico (C_4AF): não interfere na resistência;
- Aluminato Tricálcico (C_3A): nas primeiras horas libera calor excessivo e forma a etringita através da reação com a água.

Os compostos secundários apresentam uma porcentagem muito pequena em comparação à massa do cimento, porém os principais álcalis do cimento se encontram nessa margem e deve ser considerada uma importância especial aos óxidos de sódio e potássio (PAIVA, 2009).

No Brasil, existem 23 grupos industriais que realizam a gestão de 94 fábricas produtoras de cimento, podendo alcançar a capacidade de produção de 94 milhões de toneladas por ano. As regiões nordeste e sudeste possuem a maior quantidade de indústrias produtoras, demonstrado na Figura 1. Até 2014, 100 plantas fabris produziam clínquer e cimento, no entanto, devido à crise do setor desde 2015 até o

final de 2018, foram fechadas 20 fábricas, que 12 eram integradas e 8 moagens (SNIC, 2021).

Figura 1 - Localização das fábricas por região do Brasil



Fonte: Adaptado de Santos (2011).

Desde 2014, a produção de cimento diminuiu consideravelmente devido à crise do setor gerada pelo corte de verbas, principalmente nas obras de infraestrutura. No entanto, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) afirma que a construção civil vem se estabelecendo lentamente, avançando cerca 1,6% em 2019 após 5 anos em queda, onde o setor de edificações imobiliárias é o maior responsável pelo aumento. Conforme o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), a produção de cimento no Brasil alcançou 44,6 milhões de toneladas em 2020, uma queda significativa quanto ao ano de 2019 atingindo 56,6 milhões de toneladas de produção e o consumo aparente de 54,8 milhões de toneladas.

2.1.2 Impacto ambiental do cimento

O Brasil nos últimos anos vem vivenciando um crescimento da demanda habitacional, devido ao desenvolvimento econômico e consequentemente o aumento de poder aquisitivo. Em consequência desta necessidade, propiciou sérios impactos ao meio ambiente, em decorrência a fatores como emissões associadas à execução de obras e produção de materiais de construção. Novas tecnologias construtivas são essenciais para que se possa minimizar uma grande parcela dos impactos ambientais

e econômicos que são relacionados à fase de construção. A melhoria da gestão dos materiais de construção resultaria no desenvolvimento da pegada ecológica, da diminuição do carbono no setor da construção civil e reduzir a exploração dos recursos naturais e dos efeitos associados à produção dos materiais (PASSUELLO et al, 2014).

As indústrias cimenteiras são responsáveis por aproximadamente 7% de toda emissão de gás carbônico no mundo, contribuindo no desequilíbrio climático em gases de efeito estufa. Apesar disso, atualmente, as indústrias brasileiras emitem menor quantidade de CO₂/ton em suas produções. Entre 1990 a 2014, a produção de cimento aumentou 273% e emitiu apenas 223% no mesmo período em razão da redução de 18% de 700 kg de CO₂/ton cimento para 564 kg de CO₂/ton de cimento, responsável ainda por 2,3% de toda emissão mundial (SNIC, 2019).

A Associação Brasileira do Cimento Portland (ABCP) ressalta que o uso de adições como escórias siderúrgicas, cinzas de termelétricas e pó de calcário como matérias-primas alternativas para o clínquer, combustíveis alternativos e medidas de eficiência energética são os principais fatores que auxiliam no esforço de redução das emissões no setor.

O Roadmap Tecnológico do Cimento é um roteiro onde apresenta soluções realísticas para a capacidade de redução das emissões de carbono das cimenteiras até 2050. Foi elaborado pelo SNIC a partir das diretrizes estabelecidas pelo acordo de Paris, negociado em 2015 na 21ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC). Baseado no mapeamento de todo o processamento do cimento se concentraram em quatro pilares: combustíveis alternativos; medidas de eficiência energética; tecnologias inovadoras e emergentes; e adições e substituições de clínquer (SNIC, 2019).

2.2 ADIÇÕES MINERAIS EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

Segundo Mehta e Monteiro (2008), aditivo/adição são definidos como qualquer material - além do cimento, água e agregados - adicionado como ingrediente de imediato antes ou durante a mistura de concretos e argamassas.

A NBR 11768-1 (ABNT, 2019) define os aditivos como produtos químicos adicionados e misturados, usualmente em quantidades não superiores a 5% da massa de ligante total, em pastas, concretos e argamassas, com intuito de modificar suas propriedades no estado fresco e/ou no endurecido. Em contrapartida, as adições

minerais (ou aditivos minerais) são produtos de origem mineral, advindos geralmente de origens naturais ou de subprodutos industriais, finamente moídos e incluídos aos compósitos cimentícios, podendo alcançar melhorias nas propriedades físico-mecânicas, na trabalhabilidade, estrutura dos poros, permeabilidade, inibir a expansão acarretada pela reação álcali-agregado e resistir a degradação a sulfatos, sendo capaz de diminuir o seu custo e a porcentagem de cimento utilizado, fomentando essa substituição em uma alternativa sustentável (MEHTA; MONTEIRO, 2008; CAVALCANTI, 2006; ÇAKIR; AKOZ, 2008; SILVA, 2007).

As adições minerais podem ser classificadas, conforme seu efeito físico-químico, como: os materiais inertes, também conhecidos como fileres que não possuem atividade química, se resumindo em ações físicas nos compósitos; e os materiais reativos, que possuem características cimentantes ou pozolânicas através de reações químicas (DAL MOLIN, 2011).

Os fileres são materiais tão finos quanto as partículas do cimento Portland e de propriedades uniformes. Uma vez que são predominantemente inertes, não possuem atividade química e suas ações se dão como um efeito físico de empacotamento dos grãos, agindo como pontos de nucleação, intensificando a hidratação do cimento. Os fileres podem ser de origem natural ou de materiais inorgânicos processados, e atuam de maneiras favoráveis graças às finuras de suas partículas, preenchendo os vazios dos poros e elevando a compacidade dos concretos e argamassas, além de melhorar a densidade, exsudação, capilaridade, absorção, permeabilidade, durabilidade e a resistência (DAL MOLIN, 2011; NEVILLE, 2016; MORAES, 2001).

Os materiais cimentantes são aqueles que não requerem a presença de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), formado pelo processo de hidratação do cimento, para gerar o C-S-H (reação química que constituem os Silicatos de Cálcio Hidratados ao decorrer da fase ligante). Todavia, a sua auto-hidratação ocorre de maneira demorada e a quantidade dessas propriedades cimentantes é insatisfatória para seu uso em materiais com propósitos estruturais. Para acelerar essa hidratação é necessário a influência do Ca(OH)_2 e gipsita. (DAL MOLIN, 2011).

Os materiais pozolânicos, de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014), são definidos como materiais silicosos ou sílico-aluminosos que quando isolados possuem pequena ou nenhuma propriedade ligante, porém, quando segmentados finamente e em contato com água, fazem reação com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) à

temperatura ambiente provocando a reatividade com propriedades ligantes para os compostos. Esses materiais podem ser pozolanas naturais, ou pozolanas artificiais.

Conforme a mesma NBR, a determinação dos materiais pozolânicos naturais e artificiais se dão como classe N, devido a sua origem, requisitos químicos e físicos, como materiais vulcânicos de rochas ácidas, rochas silicosas (*cherts*), diatomito e argilas calcinadas. As pozolanas de classe C são as cinzas volantes obtidas em usinas termelétricas através da queima de carvão mineral. A classe E representa outros tipos de pozolana que possuem diferentes exigências das anteriores.

As pozolanas naturais são materiais ricos em sílica provindos de rochas magmáticas ou sedimentares, como as argilas, siltes e areia. As rochas pumicita e calcário são as mais comuns na adição em cimentos. Já as pozolanas artificiais são materiais adquiridos por meio da calcinação de argilas ou resíduos industriais a temperaturas de 700 °C a 850 °C, seguido da moagem (MENDES, 2009).

As pozolanas artificiais podem ser divididas principalmente em argilas calcinadas, cinzas volantes e outros materiais (NETTO, 2006). As argilas calcinadas de acordo com NBR 12653 (ABNT, 2018), são definidas como pozolana artificial e independentemente das classificações, sua procedência basicamente se dá pelo material resultante da calcinação de algumas argilas sujeitas a altas temperaturas, de forma que garanta a reação com o Ca(OH)_2 (NETTO, 2006).

As cinzas volantes são materiais finamente separados derivado da combustão de carvão fragmentado com atividade pozolânica. As pozolanas classificadas como classe E, não são as convencionais, chamadas também como pozolanas alternativas. As cinzas de determinados vegetais, escórias siderúrgicas e sílica ativa são exemplos de materiais que possuem atividade pozolânica (PCZIECZEK, 2017).

A propriedade fundamental de uma pozolana é a capacidade de reatividade quando combinada com Ca(OH)_2 , gerando compostos estáveis com propriedade aglomerante como os silicatos e aluminatos de cálcio hidratados (PCZIECZEK, 2017).

Segundo Netto (2006), a reatividade da pozolana acontece devido ao teor de vidro apontado em fases cristalinas, gerando a reação entre cal e os óxidos da pozolana, responsáveis pela qualidade das propriedades técnicas das matrizes cimentícias. A principal reação pozolânica é a formação de silicatos de cálcio hidratado, semelhante ao produzido também pela hidratação dos silicatos presentes no cimento Portland.

Os exemplos de adições minerais mais usuais de cada classificação de material estão presentes no Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação e exemplo de adições minerais.

Classificação	Exemplo de adições
Cimentantes	Escória granulada de alto-forno
Cimentantes e Pozolânicas	Cinzas volantes com alto teor de cálcio
Superpozolanas	Sílica ativa
	Metacaulim
	Cinzas de casca de arroz
Pozolanas comuns	Cinzas volantes com baixo teor de cálcio
	Argilas calcinadas
	Materiais naturais (origem vulcânica e sedimentar)
Pozolanas pouco reativas	Escória de alto-forno resfriada lentamente
	Cinzas de forno
	Escória de caldeira
	Palha de arroz queimada em campo
Adições inertes (fíler)	Calcário, pó de quartzo e pó de pedra
	Pó de quartzo
	Pó de pedra

Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2008).

Inicialmente, conforme Santos (1997), as adições e substituições do cimento por resíduos de origem natural e industrial tenderão a estar cada vez mais presentes na produção de materiais na construção civil. O desenvolvimento e utilização desses novos métodos idealizam uma nova alternativa de produção, influenciando no meio de esferas políticas, econômicas, ambientais e sociais. Tendo em vista a possibilidade desta viabilização, mantém-se atualmente, o interesse por parte da indústria e da ciência por otimização de materiais, técnicas e processos que pretendem não só

reduzir as consequências à natureza, mas reduzir economicamente os gastos de produção.

Atualmente, diversas adições regulamentadas fazem parte da composição de alguns tipos de cimento, como exposto na Tabela 2. Como citado anteriormente, a sílica ativa, referida na NBR 13956-1 (ABNT, 2012), cinzas volantes na NBR 12653 (ABNT, 2014) e o metacaulino estabelecido na NBR 15894-1 (ABNT, 2010), atuam como materiais pozzolânicos e podem ser empregados em concretos, argamassas e pastas. As escórias de alto forno, por exemplo, fazem parte da composição do cimento CP II-E citado na NBR 16697 (ABNT, 2018), em que estabelece as exigências para o cimento Portland.

Tabela 1 - Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa).

Tabela 2 – Limites de composição do cimento Portland (porcentagem da massa).						
Nome técnico do cimento Portland	Sigla	Conteúdo dos componentes (%)				
		Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória	Pozolana	Fíler	
Comum	CPI	95-100	0-5			
Comum com adição	CPI-S	90-94	0	0	6-10	
Composto com escória	CPII-E	51-94	6-34	0	0-15	
Composto com pozolana	CPII-Z	71-94	0	6-14	0-15	
Composto com fíler	CPII-F	75-89	0	0	11-25	
Alto forno	CPIII	25-65	35-75	0	0-10	
Alta resistência inicial	CPV-ARI	90-100	0	0	0-10	
Branco	CPB	Estrutural	75-100	-	-	0-25
		Não estrutural	50-74	-	-	26-50

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16697:2018.

Witzke et al. (2019) demonstram que o uso de adições minerais e resíduos industriais na maioria das vezes apresentam propriedades pozolânicas, como na utilização de cinza de biomassa de óleo de planta (dendê) (DE OLIVEIRA, 2021); na utilização de resíduo moído de vidro (LOPES, 2017); e até na utilização por dejetos suínos (MARTELLO, 2002), contudo, por meio dos resultados, mesmo quando não há atividade pozolânica, existe a possibilidade do uso como material inerte (fíler).

Para De Oliveira (2004) a predisposição dos estudos publicados na busca de novas matérias-primas procedentes de meios renováveis e menos poluentes, impulsiona novas pesquisas direcionadas na elaboração de novos métodos alternativos na necessidade de melhorar e colaborar aos métodos convencionais de produção.

A indústria do Polietileno Tereftalato (PET) vem produzindo grandes quantidades de produtos a partir do material, conseqüentemente, o descarte inadequado vem ocasionando inúmeros problemas ao meio ambiente, principalmente nos aterros devido ao seu excesso. Pretendendo uma utilização para a reutilização do resíduo, MENDONÇA et al. (2021), investigaram o uso do PET triturado incorporado a argamassas, substituindo parcialmente o cimento. Para os valores de resistência à compressão, constatou-se perda para todos os teores de substituição, não sendo indicado para a utilização em argamassas.

A grande demanda de utilização de placas cerâmicas no Brasil como revestimento, fez com que a produção acelerasse chegando a produzir mais de 1.000.000 m² em 2015. Um dos principais produtos da cerâmica é o esmalte. Neste estudo, investigou-se a influência do resíduo de esmalte cerâmico quando misturada ao concreto, avaliando possíveis propriedades pozolânicas. Com base nas conclusões alcançadas em laboratório, o traço com substituição de 5% atingiu o melhor resultado em comparação ao traço de referência, porém não é recomendada a sua utilização em concretos por não atender às exigências da norma NBR 12653 (ABNT 2015) (CARRADORE, 2018).

Na fabricação do aço são geradas grandes quantidades de resíduos de escórias de aciaria elétrica. Por apresentar uma natureza expansível, existem poucas aplicações desta sobra devido a possibilidade de afetar a durabilidade do material na qual irá ser incorporado, em consequência disto são depositadas em áreas abertas. No entanto, a pavimentação de rodovias é uma das poucas utilizações da escória. Para este estudo foi utilizada a escória em seu estado normal e a escória estabilizada,

a estabilização foi feita com o resfriamento brusco onde transformou sua estrutura cristalina para amorfa, que proporcionou o surgimento de características hidráulicas. A adição da escória estabilizada mostrou um comportamento igual ou superior na comparação da argamassa sem escória, em relação a durabilidade não houve resultados discrepantes entre as duas análises (MASUERO, 2001).

A areia de resíduo de isolador de porcelana é uma alternativa de substituição no cimento e na areia utilizada para confecção de argamassas, pois o resíduo é gerado em grandes quantidades. Deste modo, o objetivo dos autores Camarini e Soares (2018), foi avaliar a performance de pastas e argamassas em seu estado fresco e endurecido. Os efeitos observados indicaram o aumento de tempo de pega e perda de fluidez. Porém as argamassas apresentaram resistência com o aumento da idade, fazendo com que seja capaz de ser utilizado em argamassas.

A indústria de rochas ornamentais produz um volume considerável de rejeitos resultante dos desperdícios gerados durante todo o processo de melhoria de suas peças. No estudo de Oliveira et al. (2011), a análise das propriedades pozolânicas e a resistência à compressão uniaxial do resíduo de ativado e *in-natura* na substituição do cimento Portland por lama de granito, não mostraram resultados positivos em ambas as análises. O resíduo não apresentou atividade pozolânica e a resistência mecânica foi afetada negativamente.

A avaliação do pó de serra de madeira como adição de suas fibras vegetais no concreto é uma alternativa interessante para se observar seus parâmetros de elasticidade, resistência, impacto e dissipação de energia. Levando em consideração a mistura do pó de serra correspondeu a um volume significativo no traço. Porém, a diminuição da sua proporção pode trazer a possibilidade do seu uso em concretos estruturais (SANTOS, 2019).

A utilização de argilas calcinadas na forma de metacaulinita, apresentam potencial pozolânico para argamassas e concretos. O caulim calcinado mostrou desempenho na resistência, porém os grãos do caulim são mais porosos que os do cimento. Contudo, o caulim calcinado apresenta capacidade para substituição do cimento (DE OLIVEIRA, 2004).

No uso das cinzas da casca do arroz, Santos (1997) utilizou não só em argamassas, mas em concretos, em substituição parcial do cimento. Verificou-se que as cinzas da casca do arroz é uma pozolana altamente reativa sendo viável o seu uso,

onde o teor de substituição em 15% apresentou resistência mecânica maior que o traço sem adições.

2.3 ARGAMASSAS

2.3.1 Argamassas hidráulicas e suas propriedades

A argamassa segundo a NBR 13281 (ABNT 2005) é uma massa homogênea formada a partir da mistura de aglomerante(s), agregado(s) miúdo(s), água e aditivos ou adições, caso necessário. As propriedades da argamassa dependem essencialmente do padrão de qualidade e quantidade dos insumos utilizados. Dependendo da sua finalidade de utilização, deve apresentar resistência mecânica adequada, porosidade, aderência, consistência, trabalhabilidade, impermeabilidade, durabilidade e constância de volume.

Este material é amplamente utilizado na construção civil, no mercado a argamassa é comercializada para determinada aplicação, podendo ser de assentamento, revestimento, colante ou de rejuntamento, e também há a alternativa de ser dosada em obra. Porém, na fase de produção da argamassa, a quantidade de aglomerantes utilizados determina sua classificação em: simples, quando utiliza de apenas um material aglomerante em sua produção; e composta, quando há mais de um material aglomerante. Existem outros tipos de classificação em relação à dosagem (ricas, cheias ou pobres), tipo de aglomerante (hidráulico, aéreo ou misto) e à sua consistência (fluida, seca ou plástica) (PETRUCCI, 2003).

Santos, Prueter e Sadula (2014), declaram que a trabalhabilidade é uma característica fundamental para a determinação do esforço necessário para manusear a mistura com uma perda pequena de homogeneidade, logo, a importância da trabalhabilidade deve ser tratada com importância para adquirir uma massa que viabilize o adensamento.

Durante o processo de produção da argamassa, a adição de água é necessária para garantir uma boa trabalhabilidade, desta forma, a água inserida é em parte evaporada e associada ao ar incorporado resultando em um corpo cimentício poroso, com ou sem vínculo. Estes poros apresentam tamanhos variados, porém é de grande importância na microestrutura da mistura (NEVILLE, 2016; PETRUCCI, 2003).

Uma das características fundamentais para determinar a aplicação de concretos e argamassas e como irá se comportar em estruturas é a resistência à compressão. Entretanto, não se deve desprezar a resistência à tração, pois este esforço tem uma participação importante nos efeitos resultantes de estudos e nas características de fissuração, deformação, e outros esforços a qual é submetida. Os fatores que influenciam diretamente a resistência do concreto ou da argamassa estão na relação água/cimento, relação agregado/cimento, as formas dos grãos, a granulometria, o tipo de cimento utilizado, aditivos, o formato e a dimensão dos corpos de prova, porosidade, a velocidade e duração da carga aplicada (PAIVA, 2009; PETRUCCI, 2003).

2.4 VIDRO

2.4.1 Histórico

Segundo Akerman (2000), o vidro é um material que sempre esteve presente acompanhando a evolução da humanidade. Os relatos mais plausíveis sobre o conhecimento do vidro datam ao ano de 4000 a.C., após investigações em túmulos daquela época. Historicamente, há dois povos que alegam ter descoberto o vidro, o povo egípcio e o povo fenício. Durante os séculos 23 a 79 d.C., viveu um historiador chamado Plínio, a quem narrou uma explicação ligeiramente lendária do acontecimento. O povo fenício relata que retornavam ao Egito carregando consigo, sacos de carbonato de sódio natural, conhecido como trona naquela época, utilizado para tingir lã. Ao pararem em uma cidade no Líbano chamada Sídön, às margens do rio Belus, colocaram fogo com lenha e inseriram pedaços grandes de trona para escorar os frascos onde cozinhavam seus alimentos. Após sua refeição, adormeceram deixando o fogo aceso. Logo ao amanhecer, avistaram pedras brilhantes e transparentes no lugar das tronas que puseram. Ao se depararem com o que parecia pedras preciosas, rapidamente se ajoelharam imaginando ter sido obra de algum gênio que criasse tal fenômeno, no entanto o chefe da caravana, o sábio Zelu, notou que a areia havia desaparecido onde havia posto a trona. Então decidiram reacender o fogo e após um tempo, um líquido avermelhado e fumegante escoou das cinzas. Antes que o líquido endurecesse, Zelu fincou uma faca e imediatamente notou que ainda de forma indeterminada havia moldado aquele líquido, maravilhados com a

descoberta, os mercadores fenícios exalaram gritos de espanto. Desta forma, o vidro foi descoberto.

Estima-se que na Síria, cerca de 3.500 a.C., foram realizadas as primeiras produções de vidro intencionais do homem e teve o intuito de ser utilizada como acessório. A técnica de sopro foi inventada no século 1, havendo uma revolução na habilidade da produção de itens de vidro, podendo graças a técnica, moldá-lo como um recipiente oco. O método consiste em juntar uma porção de vidro fundido na ponta de um tubo e soprar na outra, com esta prática é feito um recipiente oco, logo o conhecimento foi propagado pelo Império Romano (AKERMAN, 2000).

Atualmente, nossa sociedade emprega o uso do vidro em diversas áreas, principalmente na área de embalagens e construção civil. Ao final do seu uso ou dano, esses objetos a base de vidro são descartados, contudo, a maior parte dos vidros são perfeitamente recicláveis e reutilizáveis e incorporados a outros processos fabris (GODINHO; HOLANDA; DA SILVA, 2005).

2.4.2 Caracterização técnica do vidro

Os minerais não-metálicos são largamente consumidos na indústria do setor vidreiro, acrescidos de pequenas parcelas de outros óxidos que proporcionam a formação de características essenciais para o produto final, como resistência, propriedades mecânicas, térmicas, óticas e acústicas (Confederação Nacional da Indústria - CNI, 2010).

Do ponto de vista físico, o vidro é um material sólido obtido através do resfriamento de um líquido constituído pela mistura de materiais inorgânicos não voláteis. Pelo aspecto químico, o vidro possui uma estrutura anatômica desorganizada, incomum para a maioria dos sólidos, a sua estrutura é mais similar à estrutura de um líquido do que propriamente de um sólido (ROSA; COSENZA; BARROSO, 2007).

Por ser um material amplamente utilizado, o vidro é classificado em quatro grandes áreas: os vidros planos, vidros especiais/técnicos, vidros de embalagem e vidros de uso doméstico. Todos os vidros possuem a mesma base de compostos como demonstrado na Tabela 2, a variação das porcentagens dos óxidos é determinada pela finalidade de seu uso, com o propósito de atender as necessidades de sua aplicação (ALVES, 2001).

Tabela 2 - Composição Geral do Vidro

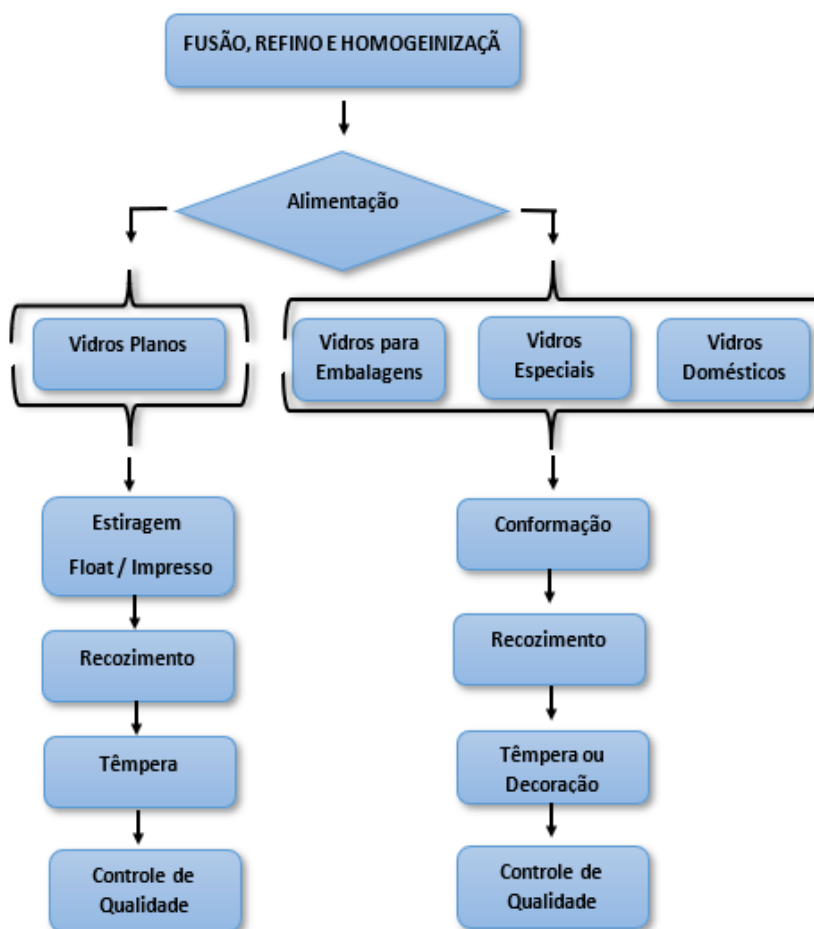
Composição do Vidro		
Areia	SiO ₂	70 a 74%
Barrilha	Na ₂ O	12 a 16%
Calcário	CaO	5 a 11%
Dolomita	MgO	1 a 3%
Feldspato	AlO ₂ O ₃	1 a 3%
Aditivos	Sulfato de sódio, ferro, cobalto, cromo, selênio e outros	

Fonte: Adaptado de Leite; Bajay; Gorla (2010).

A areia, além de ser a matéria-prima básica do vidro, é rica em sílica e possui função vitrificante. A principal função da barrilha na mistura é reduzir o ponto de fusão do silício no processo de fabricação do vidro, já que é necessário para fundição temperaturas próximas a 1.600 °C. O cálcio contido no calcário, proporciona estabilidade ao vidro contra ataques de agentes atmosféricos. A dolomita utilizada garante a resistência ao vidro para suportar transições repentinas de temperatura, e quanto ao aumento da resistência mecânica, a dolomita e a alumina auxiliam nesse quesito. (ROSA; COSENZA; BARROSO, 2007).

O fluxograma apresentado na Figura 2, mostra que as etapas do método de processamento não apresentam grandes variações dos tipos de vidro classificados na indústria (FREIRE, 2016).

Figura 2 - Processo de Produção do Vidro.



Fonte: Adaptado de CNI (2010).

O fluxograma apresentado na Figura 2, mostra que as etapas do método de processamento não apresentam grandes variações dos tipos de vidro classificados na indústria (FREIRE, 2016).

2.4.3 Vidros sodo-cálcicos

Os vidros sodo-cálcicos são o sistema de vidro mais produzido no mundo, correspondendo por mais de 85% da fabricação mundial. O vidro não possui um ponto de fusão ou líquido verdadeiro, apresentando propriedades isotrópicas, ou seja, não dependem da direção, viscosidade, coeficiente de expansão térmica, volume específico e um elevado índice de refração (AKERMAN, 2000).

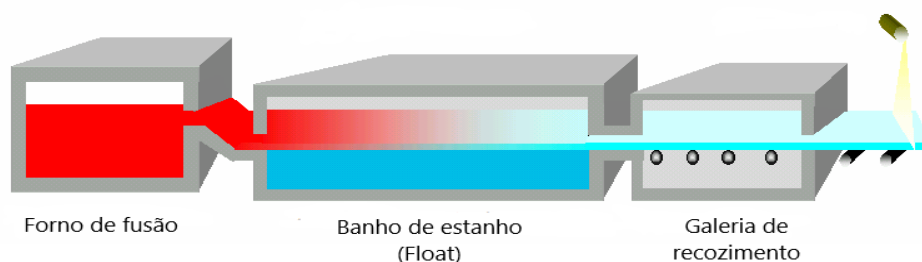
Freire (2016) relata que os vidros sodo-cálcicos podem ser divididos em embalagens, lâmpadas, e vidro plano ou comum. Comercialmente chamado de vidro comum, são em grande parte utilizados na construção civil, pelo fato de possuírem

longa duração, resistência a impactos e choques térmicos e não exigirem manutenções frequentes. A sua característica transparente, possibilita sua instalação em diversos ambientes e se adapta muito bem com outros elementos. Pelo aspecto funcional, o vidro é indicado para ambientes internos, pois proporciona a entrada de luz natural. O mercado mundial de vidro plano movimentou aproximadamente 65 milhões de toneladas no ano de 2014, e corresponde a 51% de toda produção no Brasil.

O vidro plano é um material de baixa resistência ao impacto, que o torna frágil, no entanto, não é fraco, apresentando uma grande resistência à ruptura. A dureza e rigidez também fazem parte das suas características, pois possui resistência à deformação elástica e é difícil de riscar, podendo ser aplicado em pisos, mas não quando é submetido a impactos. O vidro também demonstra uma resistência à passagem de calor, isso porque o calor leva um determinado intervalo para percorrer a espessura do vidro até o outro lado (AKERMAN,2000).

No processo de produção do vidro plano acontece a estiragem, onde a massa do vidro é esticada, e existem dois métodos para este procedimento, o método de impressão e o *float*. O método *float*, traduzido do inglês flutuador, consiste no despejo do vidro ainda líquido em banhos de estanho derretido, de maneira que o vidro flutua no estanho (Figura 3). Já o método de impressão, é produzido com rolos contendo desenhos e relevos a 900 °C transferidos ao vidro (FREIRE, 2016).

Figura 3 - Fabricação do vidro plano pelo processo *Float*.



Fonte: Vieira e De Almeida (2014).

Após o processo *float*, o vidro é considerado comum, mas existem os procedimentos secundários aplicados ao vidro para modificar as propriedades como o espelhamento, a têmpera, e o laminamento. O vidro aramado passa pelos mesmos processos, mas é considerado um vidro de segurança, pois apresenta maior resistência a rupturas do que o vidro recozido (comum) (FREIRE, 2016).

O processo *float* de fabricação do vidro fundido e os refratários existentes no tanque, apresenta uma grande influência na qualidade final do vidro. Devido a esta interação, misturas como pedras, bolhas, cordas e nós são formados. Diante da produção industrial do vidro, dependendo do produto e da qualidade, é estimado que cerca de 10% da produção é rejeitada por conter estas fontes de defeitos (NASCIMENTO, 2014).

2.4.4 Resíduo de vidro

Devido a novos métodos de industrialização e o aumento do consumo, tem estimulado o crescimento da demanda mundial e consequentemente o aumento de resíduos em toda cadeia produtiva, da fabricação até descarte pós-consumo. O aumento da consciência ecológica dos consumidores ao longo dos anos tem-se ampliado. Desta forma, a sociedade tem exigido cada vez mais dos governantes a criação de políticas públicas pela proteção ambiental, reivindicando dados a respeito das atividades que degradam ou impactam de alguma forma. Em razão destes fatores, os fabricantes estão levando em consideração as propriedades ambientais em seus produtos como forma de se destacar no mercado, porém pode acarretar no encarecimento do produto pelo processo de coleta, transporte e reciclagem (PAIVA, 2009; VALT, 2004).

A reciclagem do vidro é um tema extremamente importante, pelo fato de não se decompor na natureza, podendo manter-se sem alteração por milhares de anos. O caco de vidro reutilizado na indústria pode reduzir significativamente a quantidade de matérias-primas e o consumo de energia gerado na produção, pela razão do vidro reciclado possuir ponto de fusão menor, portanto, reduziria consequentemente no custo da produção (CRQ, 2011).

De acordo com a NBR 10004 (ABNT 2004), a classificação do vidro pode ser incluída na classe II B, onde não apresenta periculosidade, não interfere na potabilidade da água, é inerte e de fácil manuseio para separação e reciclagem após a coleta.

Muitas indústrias que utilizam o vidro durante seu processo de fabricação como matéria-prima ou como elemento de outro produto, consequentemente, acabam gerando grandes volumes de resíduos. Esses restos provenientes de retalhos, recortes em peças, quebras ou que se encontram em uma qualidade inadequada para

o mercado, gerou no ano de 2018, cerca de 3% do volume total dos resíduos sólidos, dentre os vidros recicláveis, apenas 10% foram coletados pelas cooperativas, conforme a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE). Segundo a Associação Brasileira de Bebidas (ABRABE), com o avanço da reciclagem na última década foram recicladas mais de 66 mil toneladas de vidro, contribuindo para redução na extração de matéria-prima da natureza em aproximadamente 80 mil toneladas, e também na emissão de CO₂ na atmosfera em 35 mil toneladas.

Em conformidade com o Associação Brasileira das Indústrias de Vidro (ABIVIDRO), por possuírem composição química diferenciada, os cacos procedentes da utilização em automóveis e da construção civil, provocam trincas e defeitos nas embalagens. Contudo, percentuais deste vidro estão sendo aplicados na fabricação de vidros planos em algumas indústrias, todavia, é importante que os cacos não contenham pedaços de cristais, espelhos, lâmpadas e vidro plano temperado. Em relação aos cacos destinados à reciclagem, não devem ser misturados com material orgânico, fragmentos de cerâmicas, plásticos ou metais, pela probabilidade de reduzir a resistência dos novos objetos fabricados.

Conforme Tinoco et al. (2018), apesar de alguns tipos de vidro serem suscetíveis a reciclagem, a sua destinação final não é efetivamente realizada devido à falta de entendimento da população e a politização da coleta seletiva.

2.5 VIDRO E SUA UTILIZAÇÃO EM MATRIZ CIMENTÍCIA

A preocupação por soluções ambientais visando uma melhor destinação ao descarte de rejeitos industriais, a diminuição da emissão de gases poluentes, e diminuição do impacto a erosão do solo e de jazidas, impulsionou diversos estudos utilizando o resíduo de vidro na construção civil em concretos, argamassas e pastas, incorporados como substituição parcial do cimento, do agregado miúdo ou agregado grão, concluindo em sua grande maioria, em melhoras nas suas propriedades tanto no estado fresco quanto no estado endurecido (AFSHINNIA; RANGARAJU, 2015; DU; TAN, 2017; MEYER; XI, 1999; SHAO et al., 2000; SHI et al., 2005).

O vidro por ser um material amorfo e rico em sílica em sua composição básica, apresenta capacidade de propiciar a pozolanicidade, contudo, também pode proporcionar uma reação prejudicial conhecida como reação álcali-agregado, mais

especificamente do tipo álcali-sílica (SHAYAN; XU, 2004). A sílica reativa do vidro reage pela ação dos hidróxidos alcalinos da água dos poros, derivados nos álcalis do cimento, sucedendo na formação de um gel expansivo em seus poros ou em sua superfície. A resposta físico-química de pressão dessas reações provoca dilatações suficientemente para ocasionar fissuras, comprometendo a resistência mecânica e levando a deterioração do compósito (DYER; DHIR, 2001; NEVILLE, 2016).

Diante disso, o tamanho das partículas do vidro desempenha um importante fator para sua incorporação em matrizes cimentícias. Sua ação pozolânica aumenta conforme mais fino são suas partículas, sendo assim, a principal solução para que não ocorra a reação álcali-sílica (RAS), além de oferecer maior desempenho mecânico à compressão, flexão e tração (AFSHINNIA; RANGARAJU, 2015; ALI; AL-TERSAWY, 2012). Dyer e Dhir (2001) explicam que as partículas mais finas possibilitam uma reação pozolânica benéfica e relativamente rápida sobre a RAS mais lenta e deletéria.

Shao et al. (2000) empregaram o vidro sodo-cálcico de lâmpadas fluorescentes, moído em três granulometrias máximas diferentes: 150 μm , 75 μm e 38 μm , substituindo 30% do volume do cimento. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão, apontaram que o vidro com 38 μm apresentou melhor desempenho, obtendo índices de 91, 84, 96 e 108% aos 3, 7, 28 e 90 dias, respectivamente, superando os requisitos mínimos de 75% recomendado pela ASTM C618, já a expansão devido à RAS se reduziu à metade da referência, apresentando alta atividade pozolânica. Os vidros com 75 μm também apresentaram atividade pozolânica em seus ensaios, com resultados satisfatórios na margem do que considera-se admissível. Em contrapartida, o vidro com 150 μm apresentou resistência mecânica abaixo do limite, concluindo os autores, que não pode ser qualificada como pozolanas devido ao tamanho mais grosseiro das partículas.

Corinaldesi et al. (2005) reaproveitaram os resíduos de vidros de contêineres triturados e de demolição de edifícios em substituição de 30% e 70% do agregado miúdo, nas granulometrias de 100 μm , 36 μm , 50 μm , ambas apresentaram-se mecanicamente mais resistentes à compressão e à flexão, independente do tipo e da porcentagem de substituição. Evidenciando, portanto, que nenhum efeito deletério de expansão pode ser identificado a grau macroscópico em resíduos de vidro de finura de até 100 μm .

Idir, Cyr e Tagnit-Hamou (2010) estudaram a substituição parcial de 20% e 40% de resíduo de vidro com combinações de granulometrias mais grosseiras, como agregado miúdo, junto ao pó finamente moído, na finalidade de analisar se as partículas mais finas de vidro são capazes de neutralizar a RAS das mais grossas. Os resultados dos ensaios com teores combinados nas mesmas argamassas, relataram que os finos reduziram a RAS em comparação às partículas mais grossas quando sozinhas, e essa tendência melhora quanto mais se aumenta o teor dos mais finos, independente do tamanho das partículas mais grosseiras. Também foram feitas análises das granulometrias separadamente, concluindo que não foram registradas expansões devido a RAS quando o diâmetro dos grãos de vidro são menores que 1 mm, não havendo a necessidade de usá-los tão finamente moídos assim. Logo, apesar de que a finura seja um parâmetro essencial para a redução da RAS, discutiu-se que é favorável usar teores de 40% na granulometria de 120 μm , ao invés de 20% na granulometria de 8 μm , justificando maior benefício econômico já que mais vidro será utilizado com menor tempo de moagem. Outro ponto observado foi que as argamassas com substituição obtiveram diminuição da permeabilidade e da mobilidade iônica. Essa restrição da mobilidade iônica reduziu a dispersão dos álcalis em direção ao agregado reativo, evitando a RAS.

Ismail e AL-Hashmi (2009) analisaram a substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de vidro em pó nos teores de 10%, 15% e 20%. Quanto aos ensaios de consistência, foi constatado que apesar da diminuição dos abatimentos das amostras de concreto com substituição, ainda apresentou-se uma boa trabalhabilidade. Já quanto à resistência à compressão e à flexão, o teor de 20% apresentou os valores máximos, com o crescimento do efeito pozolânico do vidro aos 28 dias.

Paiva (2009) com o aproveitamento dos resíduos de vidro proveniente do processo de lapidação de vidros planos na substituição de 10%, 15% e 20% do cimento Portland comum, apontou que as argamassas com teor de 20% apresentaram maior resistência mecânica que as de referência, desde os 7 dias de idade, mantendo os resultados satisfatórios até seus 56 dias. Foi constatado que o refinamento dos poros ocorre à medida que se aumenta o teor de substituição por resíduo moído de vidro, apresentando melhoria no seu sistema de distribuição, justificando assim, o crescimento da resistência à compressão e a diminuição da absorção total, capilar e

índice de vazios, permitindo possivelmente, reduzir ataques à matriz como íons cloreto e sulfatos.

Carsana, Frassoni e Bertolin (2014) reaproveitaram garrafas verdes de vidro finamente moídas na substituição de 30% do cimento para fins de comparação com outras adições minerais tradicionais: uma pozolanas natural, sílica de fumo, cinza volante de carvão e areia de quartzo na mesma proporção (com exceção à sílica de fumo que substituiu-se apenas 10%). Os ensaios de resistência à compressão mostraram que as argamassas com resíduo de vidro apresentaram os maiores desempenhos em idades mais avançadas, aos 6 meses até os 7 anos, justificado pela diminuição da porosidade capilar pela reação pozolanas. Enquanto isso, nenhum efeito deletério ou de degradação, provocado pela RAS foi apontado durante os 7 anos de cura por imersão. A incorporação do vidro também melhorou a resistência à penetração de cloretos e ataque de sulfatos das argamassas, confirmando então a teoria de Paiva (2009).

Topçu e Canbaz (2003) confeccionaram concretos com a substituição do agregado graúdo por resíduo de vidro nas proporções de 15%, 30%, 45% e 60%, com granulometrias de 4 a 16 mm. Os concretos em seu estado fresco, não obtiveram grandes mudanças na sua trabalhabilidade, onde também diminuiu-se a consistência e seu peso unitário. Acerca dos ensaios no estado endurecido, a resistência mecânica mostrou-se insuficiente conforme o aumento do teor de resíduo de vidro, especificamente quanto à compressão, onde a diminuição atingiu 49% com teor de 60% de substituição em relação à referência, ressaltando que o resíduo de vidro não pode ser utilizado como agregado graúdo sem levar em consideração suas propriedades afetadas com as RAS em granulometrias maiores.

Bignozzi et. Al (2015) investigaram a comparação de diferentes espécies de vidro reciclado do tipo cristais de decoração (VCR), vidro do funil de tubo de raios catódicos (VFTB), vidro de lâmpadas fluorescentes (VLMP) e vidro sodo-cálcico (VSDC), moídos numa granulometria média de 10 a 20 μm , em substituição parcial de 25% do cimento. O resultado do teste de expansão apontou que a tendência aumentou de forma que $\text{VCR} > \text{VFTB} > \text{VLMP} > \text{VSDC} > \text{argamassa de controle}$. Todos os teores apresentaram ganhos de resistência à compressão no passar das idades com $\text{VFTB} > \text{VSDC} > \text{VCR} > \text{VLMP}$. O VSDC, VCR e o VFTB apresentaram valores aceitáveis no limite de resistência mecânica aos 28 dias de cura, sendo o VFTB o que apresentou maior valor que a de controle aos 90 dias. Por conseguinte,

os autores afirmam que não só a finura média, mas também a composição química do vidro são parâmetros importantes no desempenho das matrizes cimentícias.

Trentin et al. (2020) incorporaram resíduo de vidro de garrafas *long neck* moídas na granulometria máxima de 2,36 mm, substituindo o agregado miúdo natural em 10%, 15%, 25% e 50%, também foi utilizado o cimento do tipo CP IV-32 RS e adição de cal hidratada, na confecção de argamassas nas idades de 7, 28, 63 e 91 dias. As resistências à compressão das amostras de todos os teores de resíduo mostraram-se equivalentes ao traço de referência, em exceção ao teor de 50% que apresentou ganho de 27,38% em relação ao mesmo, aos 63 dias. Nos ensaios de resistência à flexão, o teor de 10% foi equivalente ao de 0%, porém, novamente o teor de 50% apresentou o maior desempenho aos 28 dias, com ganho de 40,4%. Em relação ao ensaio de absorção de água por capilaridade, a proporção do traço escolhido com o resíduo de vidro apresentou alto coeficiente de capilaridade, não sendo viável sua utilização como argamassa de revestimento.

Higuchi (2018) utilizou resíduos provenientes da lapidação de vidros planos finamente moídos como substituto parcial do cimento Portland CP IV-32 RS, nos teores de 10%, 15%, 20% e 25% com tempo de cura de 7, 28 e 56 dias. Apesar dos traços com substituição terem alcançado desempenhos à compressão inferiores ao traço de referência, atenderam aos requisitos da NBR 6118 (ABNT, 2014) com resistências superiores a 40 Mpa em todas as idades, se mostrando adequado, segundo a autora, para maioria dos tipos de finalidade estrutural, sendo o melhor teor o 15% aos 56 dias. Analisou-se que o resíduo de vidro com granulometria menor que a do cimento, além de ter atuado como pozolanas, também atuou como fíler influenciando positivamente o empacotamento das partículas.

Logo, pode-se observar que a incorporação do resíduo de vidro foi comprovado por todos os autores, como um potencial material pozolânico com efeito fíler quando finamente moído, e em sua maioria apresentando resultados satisfatórios nas propriedades das matrizes cimentícias. Foi observado que esses resultados variam de acordo não só com o tipo de vidro utilizado, mas também com o tipo de cimento, e o tempo de cura utilizado para os ensaios.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos utilizados para caracterização e análise de cada um individualmente, bem como para a confecção e caracterização das argamassas de cimento Portland.

3.1 ÁGUA

A água para o amassamento das argamassas e quando necessário para os ensaios de caracterização, foi procedente da rede de abastecimento do Centro Universitário São Lucas (UNISL), cumprindo os requisitos das normas NBR 15900-3 (ABNT 2009) e NBR 6118 (ABNT 2014).

3.2 CIMENTO

O cimento escolhido para a confecção dos traços da argamassa foi o CP II-F-32: Cimento Portland composto com Fíler, da marca Itambé, comercializado em Porto Velho (RO). A escolha desse cimento se deve a adição utilizada do mesmo, que é o fíler calcário, o que não gera interferência com a adição mineral (vidro moído) proposta a ser utilizada nessa pesquisa.

A composição química e os parâmetros físicos do cimento foram obtidas pelo fabricante, conforme mostram as Tabelas 3 e 4, respectivamente.

Tabela 3 - Composição química do cimento.

Químicos										
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Perda Fogo	CaO Livre	Resíd. Insol.	Equiv. Alcal.
Data	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Média	4,22	17,91	2,81	61,17	3,20	2,54	6,82	0,93	1,35	0,64
Sd	0,11	0,26	0,09	0,38	0,41	0,02	0,15	0,16	0,09	0,03
Mín.	4,05	17,59	2,70	60,68	2,68	2,51	6,67	0,73	1,16	0,60
Max.	4,43	18,41	3,01	61,98	4,07	2,57	7,08	1,27	1,48	0,70

Fonte: Adaptado de Itambé.

Tabela 4 - Parâmetros físicos do cimento.

Físicos											
	Exp. Quente	Tempo de pega		Cons. Normal	Blaine	#200	#325	Resistência à Compressão			
		Início	Fim					1 dia	3 dias	7 dias	27 dias
Data	mm	min	min	%	cm /g	%	%	MPa	MPa	MPa	MPa
Média	0,36	222,00	279,00	27,00	3,31	1,51	7,85	15,50	29,50	35,00	42,40
Sd	0,14	10,00	8,00	0,50	45,98	0,30	1,23	0,50	0,60	0,70	0,40
Mín.	0,15	202,00	266,00	26,30	3,26	1,08	6,10	14,50	28,30	33,30	41,80
Max.	0,59	236,00	293,00	27,80	3,42	1,90	9,16	16,20	30,30	36,10	43,00

Fonte: Adaptado de Itambé.

3.2.1 Caracterização do cimento Portland CP II-F-32

Para uma análise mais aprofundada do cimento, a seguir são apresentados os ensaios de caracterização realizados nesse material.

3.2.1.1 Granulometria à laser do cimento

A granulometria à laser é uma técnica de difração usada para determinar o tamanho de partículas em microns. A medição acontece de acordo com a intensidade e variação angular de luz que cada partícula emite ao interagir com o feixe de laser (DAL MOLIN, 2007).

A granulometria a laser do cimento foi realizada no Laboratório de Caracterização e Valoração dos Materiais (LCVMAT), da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

3.2.1.2 Termogravimetria do cimento

A termogravimetria tem a função de determinar reações de decomposições das substâncias de acordo com a variação de massa em consequência do acréscimo gradual de temperatura e outras circunstâncias de aquecimento estipulados. A curva de termogravimetria resultante desse tipo de ensaio, relaciona a massa em função do tempo, a fim de que se obtenha a velocidade dessa reação e a composição do material (PAIVA, 2009).

O ensaio de termogravimetria do cimento foi realizado no Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomateriais (LSCN) do Instituto Federal do Amazonas (IFAM).

3.2.1.3 Difração de raios X - DRX - Cimento

O ensaio de difração de raios X (DRX) é realizado com o intuito de se obter a identificação mineral de um material por meio da caracterização da estrutura cristalina, suas fases e sua composição química.

A difração de raios-X do cimento foi realizada no LSCN – IFAM.

3.3 AGREGADO MIÚDO

A areia usada como agregado miúdo foi adquirida no comércio local de Porto Velho (RO).

3.3.1 Métodos de ensaios de caracterização do agregado miúdo

Os ensaios para caracterização da areia utilizada seguirão as seguintes normas especificadas no Quadro 2.

Quadro 2 - Métodos de ensaios de caracterização do agregado miúdo utilizado.

Ensaio	Método de Ensaio
Massa específica	ABNT NBR 16916:2021
Massa unitária	ABNT NBR 16697:2021
Teor de material pulverulento	ABNT NBR 16973:2021
Impureza orgânica	ABNT NBR NM 49:2001
Composição granulométrica	ABNT NBR NM 248:2003
Módulo de finura	ABNT NBR NM 248:2003
Diâmetro máximo	ABNT NBR NM 248:2003
Teor de argila e materiais friáveis	ABNT NBR NM 7218:2010

Fonte: Elaborado pelas autoras.

3.4 RESÍDUO DE VIDRO

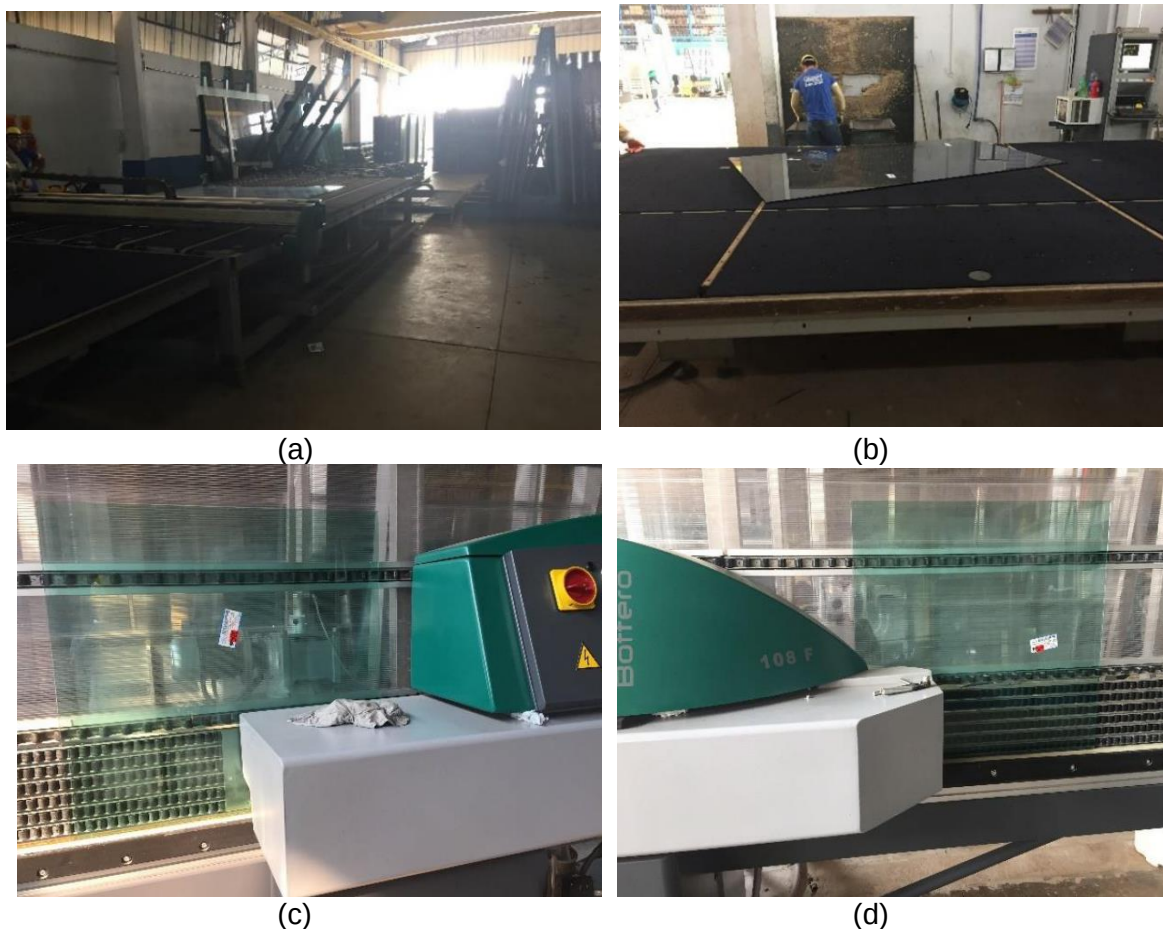
O resíduo de vidro foi disponibilizado e recolhido na empresa Guaporé Vidros, situada em Porto Velho (RO), através do processo de desbaste de vidros planos.

3.4.1 Coleta e método de preparação do resíduo de vidro

3.4.1.1 Coleta do resíduo de vidro

Após o procedimento de corte em mesas automatizadas das placas de vidro sob encomenda (Figuras 4a e 4b), os vidros planos cortados passam pelo processo de desbastamento, que consiste na lapidação das bordas, com o intuito de deixá-las com o acabamento mais liso e mais seguro durante seu manuseio, não o deixando cortante (Figuras 4c e 4d).

Figura 4 - (a) e (b) Mesas de corte das chapas de vidro plano; (c) e (d) Processo de desbastamento do vidro.



Fonte: Lopes (2017).

A etapa de desbaste é feita por ferramentas abrasivas (Figura 5a), necessitando de água para resfriar o material, diminuir o atrito e não prejudicar sua resistência. Essa água é despejada junto com os resíduos de vidro através de canaletas até uma câmara onde precisam passar por tratamento de floculação, a fim de sedimentar as partículas de vidro e separá-las para que a água possa ser reaproveitada (Figuras 5b, 5c e 5d). O resíduo de vidro sedimentado é retirado, separado em sacos e dispostos em uma caçamba e são destinados ao aterro da cidade (Figuras 5e e 5f).

Figura 5 - Etapa de desbastamento dos vidros planos: (a), (b) e (c) Processo de recolhimento e despejo das máquinas desbastamento; (d) Câmara de tratamento de floculação da água e do resíduo de vidro; (e) e (f) Descarte do resíduo de vidro sedimentado.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Fonte: Lopes (2017).

3.4.1.2 Método de preparação e moagem do resíduo de vidro

Após a coleta do resíduo de vidro, o mesmo foi disposto em bandejas de alumínio para secagem na estufa na temperatura de $(100 \pm 5) ^\circ\text{C}$ durante 24 horas (Figura 6a). Após isso, quando resfriado, o resíduo foi destorroado (Figura 6b) e moído em um triturador mecânico de alta rotação por 40 segundos. Em seguida, o resíduo de vidro moído foi passado pela peneira granulométrica de abertura de $75\ \mu\text{m}$ (malha #200), e pronto para ser utilizado.

Figura 6 - Etapa de preparação do resíduo de vidro: (a) Secagem do resíduo de vidro na estufa; (b) Resíduo de vidro destorroado.



(a)



(b)

Fonte: Lopes (2017).

3.4.2 Métodos de caracterização do resíduo de vidro

3.4.2.1 Granulometria à laser - resíduo moído de vidro

Visto que o tamanho das partículas do vidro é um parâmetro essencial para determinar um melhor desempenho em compósitos cimentícios e que foi finamente moído, é importante determinar sua granulometria a fim de analisar o tipo de comportamento e sua interação na argamassa confeccionada.

O ensaio de granulometria do vidro foi realizado no LCVMAT – UNISINOS, e foi realizado após o resíduo de vidro passar pelo processo de moagem.

3.4.2.2 Composição química do resíduo moído de vidro

Apesar do vidro ser do tipo sodo-cálcico, ele ainda pode sofrer pequenas variações em sua composição, como a adição de modificadores de cor ou de alguma propriedade mais específica, além da presença de impurezas e metais pesados (ABIVIDRO, 2010; BIGNOZZI et al., 2015). Segundo Bignozzi et al. (2015), a composição química do vidro pode alterar as propriedades mecânicas, influenciar no processo de hidratação do cimento e se caracterizar como pozolana. Logo, é indispensável ter conhecimento de sua composição.

O resíduo de vidro utilizado nessa pesquisa é o mesmo que foi empregado na pesquisa de Lopes (2017), sendo apenas mudado o processo de moagem. Segundo o autor, o ensaio foi realizado no laboratório de Ensaios Físico-Químicos/FT - UFAM por meio de fluorescência de raios X (FRX).

3.4.2.3 Análise de difração de raios X - DRX - resíduo de vidro

Através do ensaio de difração de raios X é possível demonstrar a microestrutura amorfa do resíduo de vidro.

Como mencionado anteriormente, o resíduo de vidro foi disponibilizado por Lopes (2017), e seu ensaio foi realizado pelo LSCN – IFAM.

3.5 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS

3.5.1 Dosagem das argamassas

As argamassas foram confeccionadas com o traço de referência nas proporções 1:2:0,50 (cimento:areia:relação água/aglomerante) para a realização dos ensaios de resistência à compressão nas idades de 7 e 28 dias. Em seguida, também foram confeccionados traços com substituição parcial do cimento Portland por resíduo de vidro moído com teores percentuais de 10%, 20% e 30%, seguindo a nomenclatura T10, T20, e T30, respectivamente, e TR ao traço de referência, conforme melhor ilustrado no Quadro 3.

Quadro 3 - Nomenclatura dos traços confeccionados de acordo com o teor de substituição.

Teor de Substituição	0%	10%	20%	30%
Nomenclatura	TR	T10	T20	T30

Fonte: Elaborado pelas autoras.

Após a pesagem dos materiais nas proporções escolhidas na balança eletrônica de precisão, os aglomerantes e a areia foram previamente misturados para receberem a água de amassamento. Para misturar a argamassa, foi usado um misturador mecânico planetário de capacidade de 5 litros. Conforme foi-se adicionando a água, foi-se misturando os componentes na velocidade mínima por 1 min e 30 s, depois a argamassa ficou em repouso por 30 s, e novamente voltou a ser misturada por mais 1 min e 30 s na velocidade máxima.

Posteriormente a realização de cada traço, foi executado o ensaio de espalhamento na mesa de consistência segundo a norma NBR 7215 (ABNT, 2019) (Figura 7).

Figura 7 - Ensaio de espalhamento das argamassas na mesa de consistência.



Fonte: Elaborado pelas autoras.

Os corpos de prova foram moldados manualmente em fôrmas cilíndricas de dimensões de 5 x 10 cm. Após untado com desmoldante, a aplicação da argamassa foi feita com o auxílio de espátula, em duas camadas com aproximadamente a mesma quantidade, recebendo 12 golpes cada uma com um soquete normal, fazendo movimentos uniformes e circulares para um adensamento homogeneamente distribuído (Figura 8). Foram feitos ao total 10 corpos de prova, sendo 5 para cada idade. Os corpos de prova devidamente prontos permaneceram em câmara úmida durante 24 horas, e em seguida, foram desmoldados e acomodados de maneira submersa em um tanque de água por 7 e 28 dias.

Figura 8 - Elaboração dos corpos de prova de argamassa.



Fonte: Elaborado pelas autoras.

3.5.2 Ensaio de resistência mecânica

A resistência à compressão dos traços das argamassas foi determinada seguindo a metodologia da NBR 5739 (ABNT, 2018). Os corpos de prova passaram pela máquina de retificação do Laboratório de Estruturas (LE) – UNISL, para regulagem das faces superiores e inferiores, a fim de que seja distribuída uniformemente a carga aplicada (Figura 9a). Os ensaios de resistência à compressão axial foram executados na prensa hidráulica servo-controlada com capacidade de 100 toneladas da marca Contenco, disponibilizada no Laboratório de Estruturas – UNISL (Figura 9b). A velocidade de carregamento (ou taxa de deslocamento) utilizada no ensaio foi de 0,45 MPa/s.

Figura 9 - Equipamentos para ensaios de resistência: (a) Máquina de retificação; (b) Prensa hidráulica.



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelas autoras.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

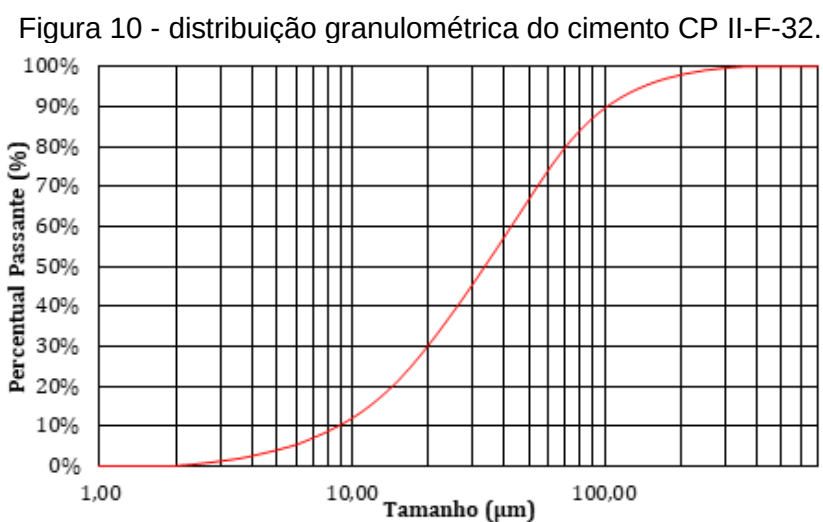
Neste capítulo serão apresentados os resultados e análise dos materiais utilizados e das argamassas confeccionadas.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

4.1.1 Cimento

4.1.1.1 Granulometria à laser do cimento

O resultado da granulometria à laser do cimento está apresentado no gráfico da Figura 10.



Fonte: Elaborado pelas autoras.

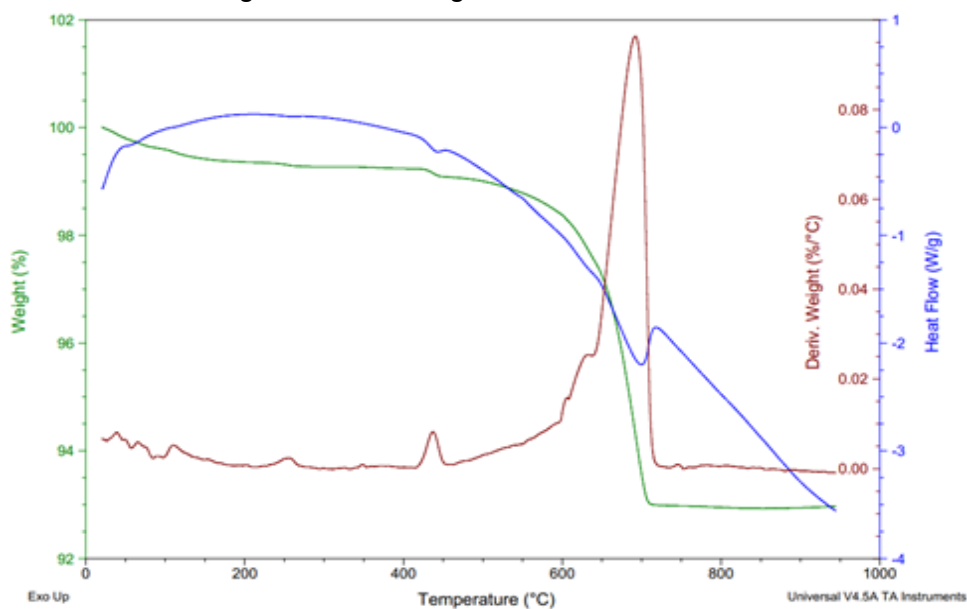
A curva granulométrica do cimento indica que o diâmetro médio da partícula do cimento foi de 26,57 μm .

4.1.1.2 Termogravimetria do cimento

É possível verificar no gráfico da Figura 11 que a análise da termogravimetria do cimento apresenta 3 picos preponderantes, o pico entre 90 e 120 $^{\circ}\text{C}$, que refere-se a água intersticial, que pode se justificar pelo processo inicial de hidratação por contato com umidade do ar, o pico em 450~500 $^{\circ}\text{C}$ referente ao desidroxilação do

Ca(OH)_2 , e o pico de descarbonatação, esse bem latente, que referente ao carbonato de cálcio, da adição do fíler calcário.

Figura 11 - Termogravimetria do cimento.

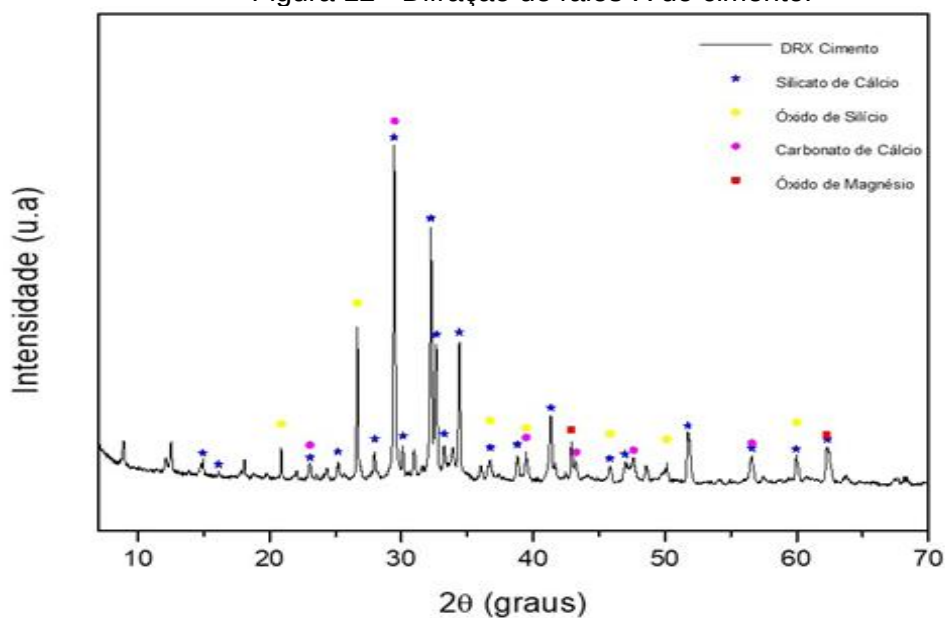


Fonte: Elaborado pelas autoras.

4.1.1.3 Difração de raios X - DRX - Cimento

A Figura 12 a seguir apresenta o resultado obtido da difração de raios X do cimento.

Figura 12 - Difração de raios-X do cimento.



Fonte: Elaborado pelas autoras.

Os principais compostos do cimento apresentados no gráfico são silicato e carbonato de cálcio, óxidos de silício e de magnésio.

4.1.2 Agregado Miúdo

Através do ensaio das caracterizações físicas do agregado miúdo utilizado, os resultados obtidos estão exibidos na Tabela 5.

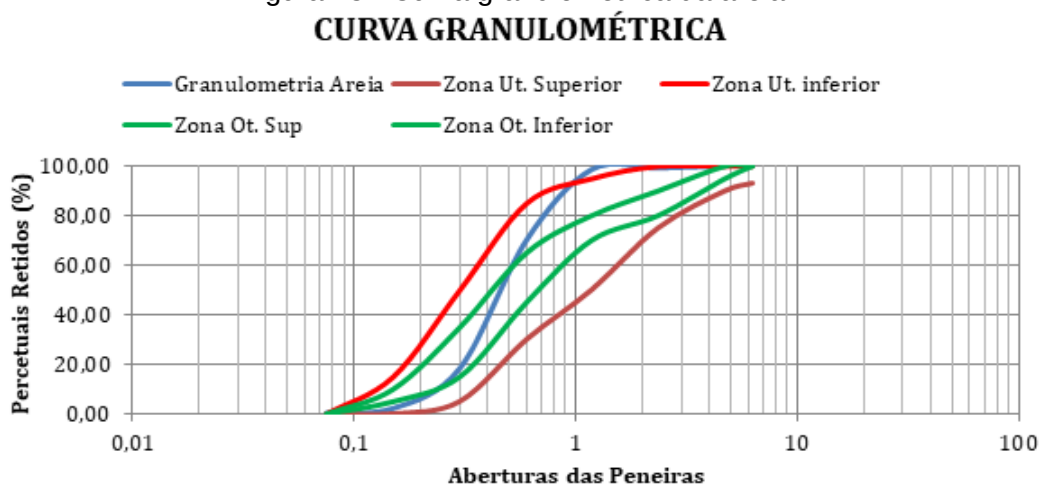
Tabela 5 - Resultado dos ensaios de caracterizações físicas do agregado miúdo.

Ensaio	Unidade	Resultado	Limites normatizados
Massa específica	kg/dm ³	2,722	-
Massa unitária	kg/dm ³	1,583	-
Teor de material pulverulento	%	4,350	3,00 a 5,00
Material orgânico	ppm	300	300
Módulo de finura	mm	3,12	-
Diâmetro máximo	mm	2,400	-
Teor de argila em torrões e materiais friáveis	%	1,50	1,50

Fonte: Elaborado pelas autoras.

A Figura a seguir (Figura 13) apresenta a distribuição granulométrica da areia, segundo a norma NBR NM 248 (ABNT 2003).

Figura 13 - Curva granulométrica da areia.



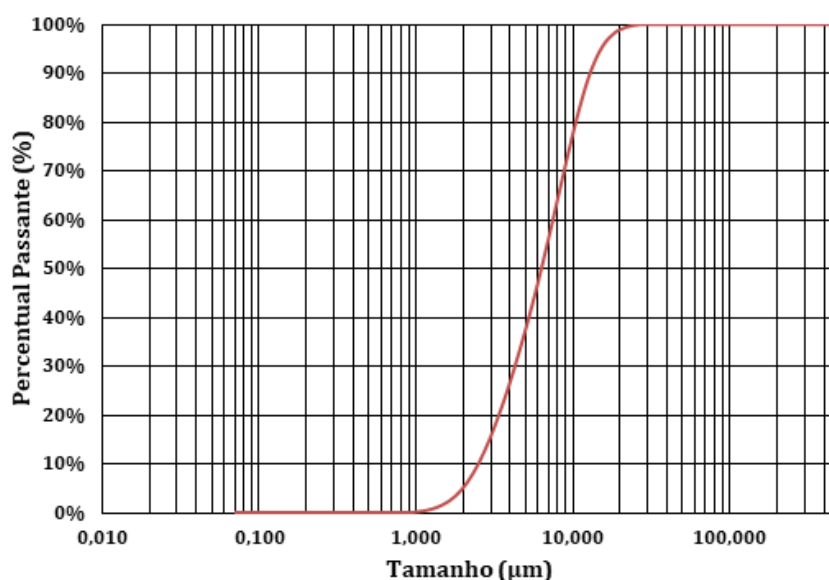
Nota-se que a areia se apresenta dentro a zona utilizável para argamassas, mas dentro dos limites inferiores e superiores utilizáveis, afastando-se do limite ótimo, o que pode provocar perdas de resistência, e também maior porosidade da argamassa, devido a uma distribuição granulométrica irregular.

4.1.3 Resíduo de vidro

4.1.3.1 Granulometria à laser do resíduo de vidro

A distribuição granulométrica do resíduo moído de vidro utilizado após o processo de moagem está representada no gráfico da Figura 14.

Figura 14 - Distribuição granulométrica do vidro.



Fonte: Elaborado pelas autoras.

Os valores do tamanho da partícula do vidro foram de 12,90 μm , 6,32 μm e 2,51 μm , para D_{90} , D_{50} e D_{10} respectivamente. Esses valores são menores que o cimento utilizado neste trabalho, o que pode contribuir para um melhor empacotamento da mistura granular da argamassa e promover uma maior densidade pois pode ser capaz de preencher os espaços deixados pelas partículas maiores do cimento.

4.1.3.2 Composição química do resíduo de vidro

O resíduo de vidro utilizado nessa pesquisa é o mesmo que foi empregado na pesquisa de Lopes (2017), sendo apenas mudado o processo de moagem do mesmo, sendo assim a composição química do vidro utilizado é apresentada no Quadro 4 a seguir.

Quadro 4 - Compostos do cimento em porcentual.

COMPOSTO QUÍMICO	PERCENTUAL (%)
SiO ₂ – Dióxido de Silício	74,07%
CaO – Óxido de Cálcio	13,27%
Na ₂ O – Óxido de sódio	7,94%
MgO – Óxido de Magnésio	1,93%
Al ₂ O ₃ – Óxido de Alumínio	0,99%
Fe ₂ O ₃ – Óxido Ferroso	0,66%
P ₂ O ₅ – Pentóxido de Fósforo	0,49%
K ₂ O – Óxido de Potássio	0,35%

Fonte: Lopes (2017).

Nota-se que a maior parte da composição do vidro é de sílica, o que já é esperado, uma vez que a origem do resíduo é da indústria do vidro plano (vidro soda-cal). A classificação como vidro soda-cálcico é confirmada, pois possui em sua composição a cal no segundo maior percentual (13,27%).

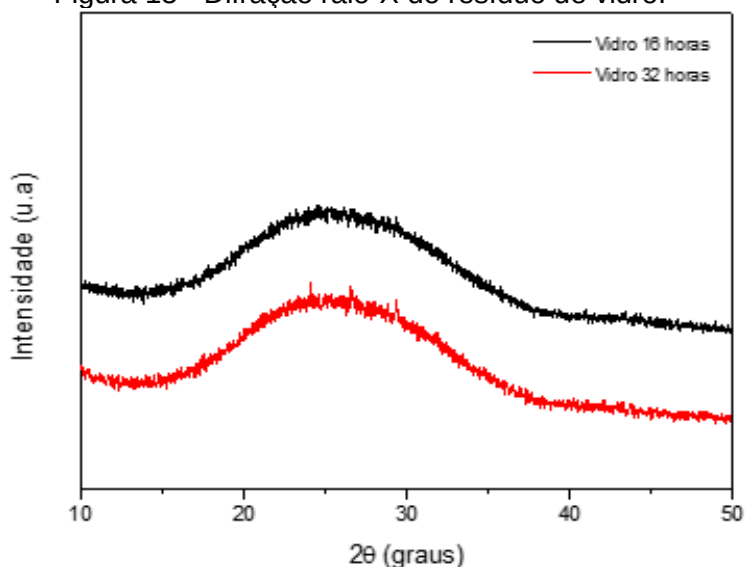
Para a classificação de materiais pozzolânicos, segundo a NBR 12563 (ABNT, 2014), o percentual dos componentes SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ devem ser de no mínimo de 70%. O resíduo de vidro deste trabalho apresenta teor de 75,72%, assim pode-se considerar esse resíduo com uma pozzolana.

4.1.3.3 Análise de difração de raio X – DRX – Resíduo de vidro

A difração de raios X foi realizada no resíduo de vidro a fim de demonstrar a microestrutura amorfa do material. A figura 15 apresenta os resultados obtidos por Lopes (2017) com o processo de moagem de 16 e 32 horas, onde se observa que o

tempo de moagem não gerou nenhuma mudança no estado amorfo da estrutura, sendo assim o resíduo utilizado, com tempo de moagem de 40 segundos, também apresentaria uma estrutura amorfa.

Figura 15 - Difração raio-X do resíduo de vidro.



Fonte: Lopes (2017).

4.1.4 Caracterização das Argamassas com resíduo de vidro moído

4.1.4.1 Resistência à compressão

Os valores de resistência à compressão axial dos corpos de prova das argamassas aos 7 e 28 dias, e as medidas de espalhamento das argamassas na mesa de consistência estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Valores de resistência à compressão e medidas de espalhamento das argamassas.

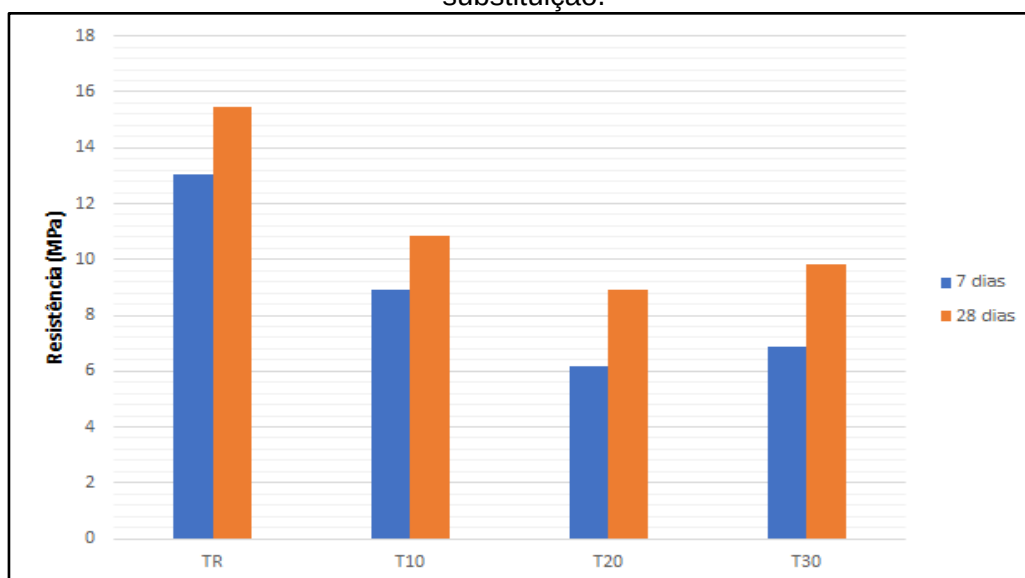
Traços	Resistência à Compressão (MPa)		Espalhamento
	7 dias	28 dias	
TR	13,04	15,46	240 mm
T10	8,92	10,86	245 mm
T20	6,20	8,92	256 mm
T30	6,88	9,80	260 mm

Fonte: Elaborado pelas autoras.

Analisando o espalhamento dos traços de argamassa, o traço de referência (TR) foi o que apresentou o menor valor, logo, os posteriores traços apresentaram maior espalhamento conforme o aumento do teor de substituição pelo resíduo de vidro, confirmando melhora da trabalhabilidade das argamassas. O aumento da fluidez dessas argamassas, segundo Topçu e Canbaz (2004) pode ser justificado devido à menor absorção de água do resíduo de vidro, visto que, o vidro em si é um material de baixíssima higroscopicidade (NEVILLE, 2006).

Os resultados obtidos quanto à resistência à compressão demonstram que, em todas as idades, os traços TR apresentaram maior desempenho em relação a todos os outros traços com teores de substituição por resíduo de vidro. Visto que as argamassas tiveram substituição e consequentemente redução na proporção do cimento, o fator determinante para a resistência no estágio inicial atribuído exclusivamente pelo silicato tricálcico (C_3S) presente no cimento também é reduzido. A diferença entre os traços de acordo com a idade está presente no gráfico da Figura 16.

Figura 16 - Gráfico dos valores de resistência à compressão das argamassas por teor de substituição.



Fonte: Elaborado pelas autoras.

Ressalta-se que todas as argamassas com teor de substituição de resíduo de vidro, obtiveram ganhos de resistência à compressão entre elas, conforme o aumento dos dias, portanto, podendo ser justificado pela atividade pozolânica provocada pelo resíduo de vidro (Tabela 7), assim como também foi demonstrado por Shi et al. (2004),

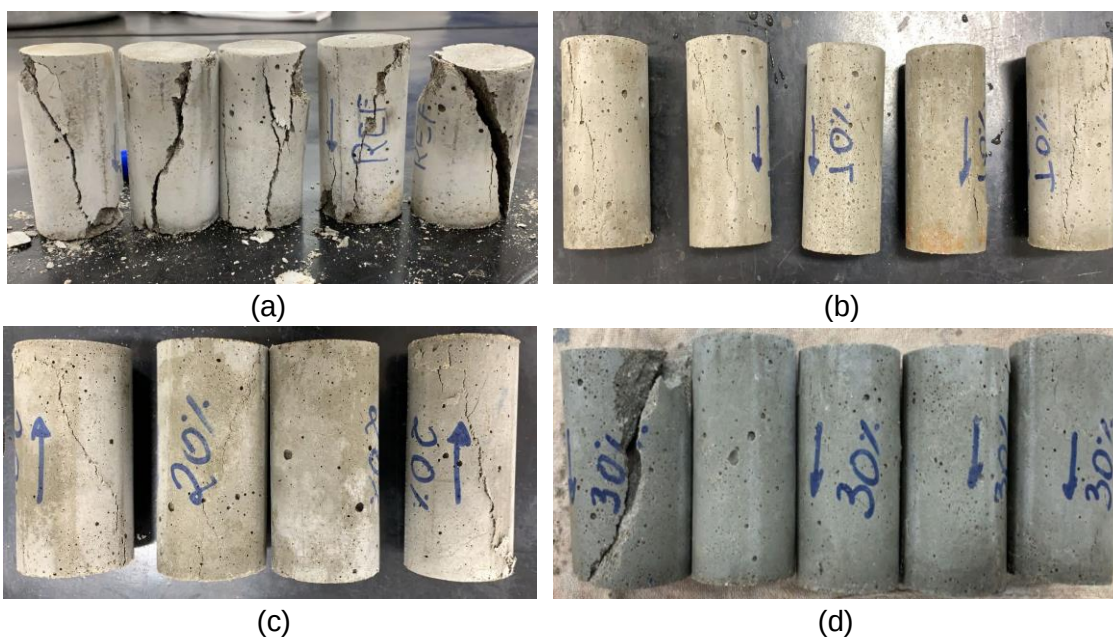
Paiva (2009), Lopes (2017), Higuchi (2018). A Figura 17 demonstra as configurações de ruptura dos corpos de provas de argamassas nos traços TR, T10, T20, T30 aos 28 dias, consecutivamente.

Tabela 7 - Ganhos de resistência à compressão entre a idade inicial e final.

Teor de substituição	Porcentagem de ganho de resistência à compressão
	7 à 28 dias
TR	15,65%
T10	17,86%
T20	30,49%
T30	29,80%

Fonte: Elaborado pelas autoras.

Figura 17 - Corpos de prova das argamassas rompidas à compressão: (a) Traço de referência; (b), (c), (d) Traços com teor de substituição de 10%, 20%, 30% de resíduo de vidro, respectivamente.



Fonte: Elaborado pelas autoras.

5 CONCLUSÃO

O resíduo de vidro finamente moído em substituição parcial do cimento Portland CP II-F-32 para utilização em compósitos cimentícios obtiveram resultados satisfatórios em relação às propriedades da argamassa no estado fresco e endurecido, mostrando-se uma eficiente alternativa no enfoque tecnológico e ambiental, atuando como material pozolânico.

Em seu estado fresco, o resíduo moído de vidro interferiu na trabalhabilidade da argamassa, isso se deve ao fato de o vidro possuir uma baixíssima higroscopicidade, conseqüentemente, conforme o aumento dos teores de substituição, houve uma redução na retenção de água, deixando a argamassa com índice de espalhamento cada vez maior.

Já no que se refere ao estado endurecido, o traço que apresentou maior resistência à compressão axial foi a de referência, seguido do teor de 10%, sendo o maior entre os outros teores. Apesar de nenhum dos traços com teores de substituição alcançarem a mesma resistência do TR, apresentaram evolução de ganhos consideravelmente altos com o passar das idades. Enquanto TR teve um ganho percentual de resistência de apenas 15,65%, os traços TR10, TR20 e TR30 obtiveram 17,86%, 30,49% e 29,80%, respectivamente. Logo, é possível observar a ação da atividade pozolânica agindo nas propriedades mecânicas da argamassa em idades mais avançadas. Diante disso, há grandes possibilidades de que esse ganho tenda a aumentar com tempos de cura maiores e ultrapassar a resistência mecânica do TR, ficando a sugestão para pesquisas futuras.

Portanto, pode-se concluir o que o resíduo moído de vidro proveniente do processo de desbastamento da indústria Guaporé Vidros situada na cidade de Porto Velho/RO apresenta potencial uso como adição mineral em substituição do cimento Portland, dado que TR e os traços com teores de substituição apresentaram valores muito próximos de resistência à compressão.

O assunto trabalhado é de alta relevância para o desenvolvimento e utilização desses novos métodos e idealizam uma nova alternativa de produção, como a regulamentação de novas adições para aplicação direta em canteiros de obras. O fator econômico é de altíssima relevância para incentivar o mercado a realizar mais estudos. Ressaltando o uso efetivo deste resíduo em corpos cimentícios, o resíduo moído de vidro como material pozolânico pode apresentar uma maior visibilidade

ambiental às indústrias, reduzindo tanto o impacto causado pelos gases poluentes emitidos durante a produção de cimento, quanto pelo descarte de resíduos que podem ter uma destinação adequada.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004**. Resíduos Sólidos — Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland — Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12653**. Versão Corrigida: 2015 - Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13281**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13956-1**. Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 1 Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15894-1**. Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta, Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15900-3**. Água para amassamento do concreto. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697**. Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16916**. Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16973**. Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro, 2021.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**. Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6120**. Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2014.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 49**. Agregado fino - Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 7218**. Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO CIMENTO PORTLAND – ABCP. **INDÚSTRIA BRASILEIRA DO CIMENTO: COMPROMISSOS AMBIENTAIS E AÇÕES**, 2021. Disponível em: <https://abcp.org.br/industria-brasileira-do-cimento-compromissos-ambientais-e-acoes/>. Acesso em: 10 out.2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - **ABRELPE**. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 17 out. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE VIDRO – **ABIVIDRO**. Disponível em: <https://abividro.org.br/por-que-vidro/>. Acesso em: 19 out. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BEBIDAS - **Abrabe**. Disponível em: <https://www.abrabe.org.br/glass-is-good/>. Acesso em: 19 out. 2021.

AFSHINNIA, K.; RANGARAJU, P. R. **Influence of fineness of ground recycled glass on mitigation of alkali-silica reaction in mortars. Construction and Building Materials**. v. 81, p. 257 - 267, 2015.

AKERMAN, Mauro. **Natureza, estrutura e propriedades do vidro**. Publicação técnica. Centro técnico de elaboração do vidro. Saint-Gobain, Vidros-Brasil, p. 16, 2000. Disponível em: https://www.unifal-mg.edu.br/ppgcem/wp-content/uploads/sites/116/2020/06/NaturezaEstrut_Prop_Vidro-Saint-Gobain-2000.pdf. Acesso em: 17 out. 2021.

ALI, E. E.; AL-TERSAWY, S. H. **Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in self compacting concrete**. Construction and Building Materials. v. 35, p. 785-791, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C618 - 17a**: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

ALVES, Oswaldo Luiz; DE FÁTIMA GIMENEZ, Iara; MAZALI, Italo Odone. **A arte de fazer vidro**. Química Nov. Na Esc. Edição Esp, p. 13-24, 2001. Disponível em: <https://www.ft.unicamp.br/~mariaacm/ST114/vidros.pdf>. Acesso em: 19 out. 2021.

BIGNOZZI, M.C.; SACCANI, A.; BARBIERI, L.; LANCELLOTTI, I. **Glass waste as supplementary cementing materials: The effects of glass Chemical composition**. Cement & Concrete Composites. v. 55, p. 45 - 52, 2015.

ÇAKIR, Özgür; AKÖZ, F. **Efeito das condições de cura nas argamassas com e sem GGBFS**. Construção e Materiais de Construção, v. 22, n. 3, pág. 308-314, 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061806002625>. Acesso em: 05 out. 2021.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). **Concreto Verde**. 2011. Disponível em: <https://cbic.org.br/concreto-verde/>. Acesso em: 10 mar. 2021.

CAMARINI, Gladis; SOARES, Márcio da Silva. **Propriedades de argamassas de cimento produzidas com resíduo de isolador de porcelana**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 23, n. 1, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/nhvMDssysndWRNkS4Bz4d3t/?lang=pt>. Acesso em: 29 mai. 2021.

CARRADORE, Juliano Santana. **Análise das propriedades mecânicas do concreto com substituição e adição parcial do cimento Portland por resíduo de esmalte cerâmico (REC)**. 2018. Disponível em:

<http://repositorio.unesc.net/bitstream/1/5558/1/JulianoSantanaCarradore.pdf>. Acesso em: 30 mai. 2021.

CARSANA, M.; FRASSONI, M.; BERTOLINI, L. **Comparison of ground waste glass with other supplementary cementitious materials**. Cement & Concrete Composites. v. 45, p. 39 - 45, 2014.

CAVALCANTI, D. J DE H. **Contribuição ao estudo de propriedades do concreto autoadensável visando sua aplicação em elementos estruturais**. Dissertação de mestrado. Maceió, Universidade Federal de Alagoas, 2006. Disponível em: https://ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgec/dissertacoes_arquivos/Dissertacoes/Diogo%20Jatoba%20de%20Holanda%20Cavalcanti.pdf. Acesso em: 06 out. 2021.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO VIDRO - CNI, 2010. Disponível em: http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_24/2012/09/06/262/20121127162159241932a.pdf. Acesso em: 21 out. 2021.

CONSELHO REGIONAL DE QUÍMICA - CRQ. **Vidro**. Disponível em: <https://www.crq4.org.br/vidroquimicaviva>. Acesso em: 29 out. 2021.

CORINALDESI, V., GNAPPI, G., MORICONI, G., MONTENERO, A. **Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars**. Waste Management Volume 25, Issue 2, 2005, Pages 197–201.

DAL MOLIN, D. C. C. **Capítulo 8: Adições minerais**. Concreto: Ciência e Tecnologia. 1ª Ed. Editora IBRACON. São Paulo. 1 v. 2011.

DYER, T. D.; DHIR, R. K. **Chemical reactions of glass cullet used as cement component**. Journal of Materials in Civil Engineering. v. 13, p. 412 - 417, 2001.

DE OLIVEIRA, Marco Antônio Barbosa et al. **Potencialidades da cinza de biomassa do beneficiamento de óleo de palma para materiais à base de cimento**. Parte I: caracterização microestrutural, mineralógica e atividade pozolânica. Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 3, p. 27972-27986, 2021. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/download/26626/21112>. Acesso em: 26 abr. 2021.

DE OLIVEIRA, Marília Pereira et al. **Estudo do caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento Portland**, 2004. Disponível em: http://www.usp.br/constrambi/producao_arquivos/estudo_de_caulim.pdf. Acesso em: 28 mai. 2021.

DU, H.; TAN, K. H. **Properties of high volume glass powder concrete. Cement and Concrete Composites.** v. 75, p. 22 - 29, 2017.

EFING, Antônio Carlos; DE PAIVA, Leonardo Lindroth. **Consumo e obsolescência programada: sustentabilidade e responsabilidade do fornecedor.** Revista de Direito, Globalização e Responsabilidade nas Relações de Consumo, v. 2, n. 2, p. 117-135, 2016. Disponível em: <http://www.indexlaw.org/index.php/revistadgrc/article/download/1356/1785>. Acesso em: 20 jun. 2021.

FREIRE, Laura Lúcia Ramos. **A indústria de vidros planos.** 2016. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482dspace/bitstream/123456789/241/1/2016_CDS_1_2_vidros.pdf. Acesso em: 22 out. 2021.

GODINHO, K. O.; HOLANDA, J. N. F.; DA SILVA, A. G. P. **Obtenção e avaliação de propriedades tecnológicas de corpos cerâmicos à base de argila e vidros reciclados.** Cerâmica, v. 51, p. 420-429, 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/jfWszhqLBhygTCqB4Lb7GPm/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 17 out. 2021.

HUMPHREYS, Ken; MAHASANAN, Maha. **Rumo a uma indústria de cimento sustentável. Subestudo 8: mudanças climáticas.** 2002. Disponível em: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20269589>. Acesso em: 11 mar. 2021.

HIGUCHI, A. M. D. **Estudo do desempenho do resíduo de vidro moído como material cimentício suplementar para aplicação em concreto autoadensável de alto desempenho.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas, 2018.

IDIR, R.; CYR, M.; TAGNIT-HAMOU, A. **Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars.** Construction and Building Materials, v. 24, p. 1309-1312, 2010.

ISMAIL, Z. Z.; AL-HASHMI, E. A.; **Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete.** Waste Management, v.29, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE), 2020. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5932#/n1/all/v/6561/p/201904,202001,202002,202003,202004/c11255/all/d/v6561%201//v,p,t+c11255/resultado>. Acesso em: 21 mai. 2021.

LEHNE, Johanna; PRESTON, Felix. **Making Concrete Change. Innovation in Low-carbon Cement and concrete,** 2018. Disponível em:

<https://www.chathamhouse.org/sites/default/files/publications/research/2018-06-13-making-concrete-change-cement-lehne-preston.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2021.

LEITE, A. A. F.; BAJAY, S. V.; GORLA, F. D. **Oportunidades de eficiência energética para a Indústria: relatório setorial: setor de ferroligas**. Brasília: CNI, 2010. Disponível em: http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_24/2012/09/06/262/20121127162159241932a.pdf. Acesso em: 20 out. 2021.

LOPES, Raduan Krause. **Utilização de resíduo moído de vidro industrial na confecção de argamassa de cimento Portland em Porto Velho/RO**. 2017. Disponível em: https://tede.ufam.edu.br/bitstream/tede/6214/5/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Raduan%20K.%20Lopes.pdf. Acesso em: 29 mai. 2021.

LOTENBACH, Bárbara; SCRIVENER, Karen; HOOTON, RD **Materiais cimentícios complementares**. Cimento e pesquisa de concreto, v. 41, n. 12, pág. 1244-1256, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001>. Acesso em: 28 abr. 2021.

MARTELLO, L. S.; CASADO, CEF; SAVASTANO JUNIOR, H. **Cinzas de dejetos suínos como adição em produtos à base de cimento**. Seminário sobre poluentes aéreos e ruídos em instalações para produção de animais, p. 103-109, 2002. Disponível em: http://www.usp.br/constrambi/producao_arquivos/cinzas_dejetos_suinos.pdf. Acesso em: 01 jun. 2021.

MASUERO, Angela Borges. **Estabilização das escórias de aciaria elétrica com vistas a sua utilização como substituição ao cimento**. 2001. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/170216>. Acesso em: 29 mai. 2021.

MATOS, Ana Mafalda et al. **Estudo de argamassas com substituição parcial de cimento por resíduos de vidro moídos**. 2010. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/59733/1/000145551.pdf> . Acesso em: 01 jun. 2021.

MAURY, Maria Beatriz; BLUMENSCHN, Raquel Naves. **Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente**. 2012. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/12110>. Acesso em: 10 mar. 2021.

MENDES, Valeska. **Avaliação do Potencial Geológico de Pozolanas na Naturais no Estado do Rio de Janeiro**. 2009. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11422/5313>. Acesso em: 11 mar. 2021.

MENDONÇA, Ana Maria Gonçalves Duarte et al. **Argamassas manufaturadas com substituição parcial do cimento por PET triturado**. Brazilian Journal of

Development, v. 7, n. 5, p. 44099-44109, 2021. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/29193/23023>. Acesso em: 28 mai. 2021.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais** (Concrete: Structure, Properties and Materials). 2008.

MEYER, C.; XI, Y. **Use of recycled glass and fly ash for precast concrete.** *Journal of Materials in Civil Engineering*. v. 11, p. 89 - 90, 1999.

MONTANHEIRO, Tarcísio José et al. **Terras diatomáceas: uma pozolana natural na Bacia do Paraná, Estado de São Paulo.** *Revista do Instituto Geológico*, v. 23, n. 2, pág. 1-17, 2002. Disponível em: <https://revistaig.emnuvens.com.br/rig/article/download/341/323>. Acesso em: 09 out. 2021.

MORAES, Regis da Costa. **Efeitos físicos e pozolânicos das adições minerais sobre a resistência mecânica do concreto.** Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2001.

NASCIMENTO, Marcio Luis Ferreira. **Breve história da produção de vidros planos: 60 anos da patente de Pilkington,** 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/ri/bitstream/ri/17974/1/BreveHistoriaVidroPlano-RIPB20-Nascimento.pdf>. Acesso em: 22 out. 2021.

NASSAR, Roz-Ud-Din; SOROUSHIAN, Parviz. **Argamassa verde e durável produzida com resíduos de vidro fresado.** *Revista de pesquisa concreta*, v. 64, n. 7, pág. 605-615, 2012. Disponível em: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/mac.11.00082>. Acesso em: 10 out. 2021.

NETTO, Rafael Mantuano. **Materiais Pozolânicos.** 149 f. Monografia (Especialização em Construção Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006. Disponível em: <https://cupdf.com/document/44976127-monografia-materiais-pozolanicos.html>. Acesso em: 17 out. 2021.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do concreto. Tradução de Ruy Alberto Cremonini.** 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. *E-book*. Acesso em: 10 mar. 2021.

OLIVEIRA, Douglas Marcus de et al. **Utilização de resíduo de granito como substituição ao cimento Portland em matrizes cimentícias.** Ouro Preto-MG, 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Augusto-Bezerra/publication/311983086_Utilizacao_de_residuo_de_granito_como_substituicao

ao_ao_cimento_Portland_em_matrizes_cimenticias/links/5866a17f08ae8fce490f1ec7/Utilizacao-de-residuo-de-granito-como-substituicao-ao-cimento-Portland-em-matrizes-cimenticias.pdf. Acesso em: 30 mai. 2021.

PAIVA, Otávio Augusto. **Resíduo industrial de vidro moído em argamassa de cimento Portland**. 2009. 208 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2009. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/3480>. Acesso em: 17 out. 2021.

PASSUELLO, Ana Carolina Badalotti et al. **Aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida na análise de impactos ambientais de materiais de construção inovadores: estudo de caso da pegada de carbono de clínqueres alternativos. Ambiente construído**, v. 14, p. 7-20, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/gwr9Q3mQ4KJZxHyPW8n5Vhd/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 27 out. 2021.

PAULA, Marcos O. de et al. **Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 13, n. 3, p. 353-357, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/34KLycZYPyhR3qSYgyqJcDy/?lang=pt>. Acesso em: 20 mar. 2021.

PCZIECZEK, Adriane et al. **Propriedades das argamassas contendo resíduos de borracha de pneus e poliestireno expandido (EPS)**. Revista de Engenharia Urbana e Ambiental, v. 11, n. 2, pág. 219-225, 2017. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/2832/283255970010.pdf>. Acesso em: 21 out. 2021.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de Cimento Portland**. 5ª ed. Rio de Janeiro: Globo, 1995. 307. p.

ROSA, Sérgio Eduardo Silveira da; COSENZA, José Paulo; BARROSO, Deise Vilela. **Considerações sobre a indústria do vidro no Brasil**. BNDES Setorial, n. 26, p.[101]-137, set. 2007., 2007. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2666/1/BS%2026%20Considera%3a%7c%3b5es%20sobre%20a%20ind%3bastria%20do%20vidro_P.pdf. Acesso em: 15 out. 2021.

SANTOS, Jaqueline Cardoso Pereira dos; PRUETER, Luiz Guilherme; SADULA, Tatyana. **Estudo comparativo da resistência à compressão de prismas de argamassa química e argamassa convencional industrializada**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em: http://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/9325/3/CT_TCC_2013_1_01.pdf. Acesso em: 28 de out. 2021.

SANTOS, Leandro Bruno. **A indústria de cimento no Brasil: origens, consolidação e internacionalização.** *Sociedade & natureza*, v. 23, n. 1, p. 77-94, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sn/a/nnypgjBHkwHg9Vt53YMJWLj/?lang=pt#> . Acesso em: 28 abr. 2021.

SANTOS, Matheus Machado Mendes dos. **Análise da resistência do concreto estrutural com substituição parcial do cimento por pó de serra.** 2019. Disponível em: <http://repositorio.anhanguera.edu.br:8080/handle/123456789/327> . Acesso em: 30 mai. 2021.

SANTOS, Sílvia. **Estudo da viabilidade de utilização de cinza de casca de arroz residual em argamassas e concretos,** 1997. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/111909/108492.pdf?sequence=1> . Acesso em: 21 mai. 2021.

SHAO, Y. LEFORT, T., MORAS, S., RODRIGUEZ, D. **Studies on concrete containing ground waste glass.** *Cement and Concrete Research*, Volume 30, Issue 1, January 2000, Pages 91–100.

SHAYAN, A.; XU, A. **Value added utilisation of waste glass in concrete.** *Cement and Concrete Research*, v. 34, p. 81-89, 2004.

SHI, C., WU, Y., RIEFLER, C., WANG, H. **Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders.** *Cement and Concrete Research*. Volume 35, Issue 5, May 2005, Pages 987-993.

SILVA, M. G. **Cimentos Portland com adições minerais. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2007.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (**SNIC**). Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-do-setor.php> . Acesso em: 18 out. 2021.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Produção Nacional de Cimento por Regiões e Estados**, 2020. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-industria.php> . Acesso em: 21 mai. 2021.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Roadmap Tecnológico do Cimento**, 2019. Disponível em: <http://snic.org.br/relatorio-roadmap.php> . Acesso em: 28 mai. 2021.

TOPÇU, I. B.; CANBAZ, M. **Properties of concrete containing waste glass**. Cement and Concrete Research, n. 34, p. 267–274, 2004.

TRENTIN, P. O.; MANICA, J.; VANZETTO, S. C. **Substituição parcial de agregado miúdo por resíduo de vidro moído na produção de argamassa**. Revista Matéria, v.25, n.1, 2020.

TINOCO, Vinícius Navarro Varela et al. **Revisão literária do uso de vidro moído como substituto do agregado miúdo no concreto**. 2018. Disponível em: https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/4271/2/ViniciusNVT_ART.pdf. Acesso em: 17 out. 2021.

VALT, Renata Bachmann Guimarães. **Análise do Ciclo de Vida de Embalagens de Pet, de Alumínio e de Vidro para Refrigerantes no Brasil variando a Taxa de Reciclagem dos Materiais**. 2004. Disponível em: <https://www.acervodigital.ufpr.br/handle/1884/1593>. Acesso em: 06 nov. 2021.

VIEIRA, WALMA LUCY MACIEL; DE ALMEIDA, LUIS FERNANDO. **PROPOSTA DE ARQUITETURA DE SISTEMA PARA AUXÍLIO À TOMADA DE DECISÃO NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE VIDROS PLANOS**. 2014. Disponível em: http://www.unitau.br/files/arquivos/category_154/MCE0526_1427378603.pdf. Acesso em: 22 out. 2021.

WITZKE, Franky Bruno; CORREIA, Sivaldo Leite; JUNIOR, Ronaldo A. Medeiros. **Abrasão superficial de concretos contendo cinza volante em substituição parcial ao cimento Portland**. Revista Técnico-Científica, n. 21, 2019. Disponível em: <http://creaprw16.crea-pr.org.br/revista/Sistema/index.php/revista/article/download/656/420>. Acesso em: 28 mai. 2021.