



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DA AREIA PELO VIDRO MOÍDO NA
ARGAMASSA**

NATANIELE LINS DE OLIVEIRA

POMBAL – PB

2023

NATANIELE LINS DE OLIVEIRA

SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DA AREIA PELO VIDRO MOÍDO NA
ARGAMASSA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador(a): Prof. Dr. Valdênia Porto Medeiros

POMBAL – PB

2023

O48s Oliveira, Nataniele Lins.
Substituição parcial da areia pelo vidro moído na argamassa /
Nataniele Lins Oliveira . – Pombal, 2023.
48 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) –
Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e
Tecnologia Agroalimentar, 2023.

“Orientação: Prof. Dr. Valdênia Porto Medeiros”.

Referências.

1. Argamassa de revestimento. 2. Construção civil - Materiais
alternativos. 3. Pegada ecológica. 4. Construção limpa. I. Medeiros,
Valdênia Porto. II. Título.

CDU 691.53 (043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO.

NATANIELE LINS DE OLIVEIRA

SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DA AREIA PELO VIDRO MOÍDO NA ARGAMASSA

Trabalho de Conclusão de Curso do discente (NATANIELE LINS DE OLIVEIRA) **APROVADO** em 10 de fevereiro de 2023 ano pela comissão examinadora composta pelos membros abaixo relacionados como requisito para obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL pela Universidade Federal de Campina Grande

Registre-se e publique-se.



Prof^a. Dr^a. Valdênia Porto Medeiros
(Orientadora – UFCG)

Prof. Dr. Walker Gomes de Albuquerque
(Membro Interno – UFCG)

Prof. Dr. Anderson Laursen
(Membro Externo – UFCG)

À meus pais, DEDICO!

AGRADECIMENTOS

Com lágrimas rolando pelo rosto, escrevo essas palavras de gratidão, pois apenas Deus e eu conhecemos as lutas que enfrentamos para chegar até aqui, onde finalmente posso dizer adeus a uma fase de aprendizado e iniciar uma nova jornada.

Gostaria de agradecer, em primeiro lugar, à minha família, que foi uma fonte de força e motivação para chegar ao final deste curso. Em especial, aos meus pais Sandra e Nilson, sem os quais eu não teria alcançado este sucesso. Agradeço pelos sacrifícios e apoio que me permitiram alcançar este objetivo. Dedico todo o meu sucesso na faculdade a vocês. A minha irmã por seu apoio e incentivo durante todo o processo. Por fim, agradeço aos meus avós por sempre acreditarem em mim.

Aos meus colegas de curso, que agora possa chamar de amigos; Pedro, Mayla, Rafaela e Karla. Obrigada por compartilharem comigo esses 5 anos de conhecimentos, momentos de dificuldade e principalmente companheirismo. Passamos por experiências que ninguém jamais saberá, mas sempre estivemos uns para os outros em momentos de apoio. Juntos, tivemos momentos inesquecíveis e criamos laços que permanecerão para toda vida. Sentirei saudades de vocês!

Aos meus amigos Barbara e Aislan, que apesar de longe, sempre estiveram presente para me ouvir, aconselhar e me apoiar nos desafios. Obrigada por toda lealdade, amo vocês.

Gostaria de expressar minha gratidão à minha orientadora Valdênia Porto. Embora não tenhamos nos conhecido durante o curso, aceitou me orientar e foi, sem dúvida, uma orientadora maravilhosa e prestativa.

RESUMO

O uso de resíduos sólidos como alternativa aos materiais convencionais na construção civil tem sido cada vez mais importante nos últimos anos, devido aos seus benefícios econômicos e ambientais. O vidro é um material amplamente utilizado, mas seu descarte inadequado tem impactos negativos no meio ambiente. Sua utilização como substituto é uma solução para evitar o descarte indevido e contribuir para a construção de edificações mais sustentáveis, pois permite a reutilização de materiais e diminui a extração de recursos naturais. Este trabalho estuda as propriedades físico-mecânicas da argamassa com substituição parcial da areia pelo vidro em diferentes proporções (12%, 24%, 36% e 48%) para avaliar as possíveis mudanças nas propriedades da argamassa no estado fresco e endurecido. A metodologia incluiu ensaios em laboratório e a comparação entre diferentes proporções de resíduos na argamassa em relação à argamassa de referência. Foram realizados ensaio de índice de consistência, resistência a tração na flexão e resistência à compressão, com 3 corpos de prova para cada traço, submetidos a ruptura aos 7 e 28 dias. Os resultados mostraram-se satisfatórios em todas as proporções, apresentando fluidez em todas as argamassas quando comparadas com a de referência. O teor de 36% apresentou o melhor desempenho mecânico, tendo um aumento de 25% em comparação a argamassa de referência.

Palavras-chave: Argamassa de Revestimento. Materiais Alternativos. Pegada ecológica. Construção limpa

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de Cimento Comercializados	15
Figura 2 – Classificação da areia quanto ao diâmetro dos grãos.....	16
Figura 3 – Composição do Vidro	19
Figura 4 – Fluxograma metodológico	24
Figura 5 – Ensaio de Granulometria da areia.....	26
Figura 6 – Ensaio de Granulometria do vidro	27
Figura 7 – Modelagem dos corpos de prova	29
Figura 8 – Processo de Cura.....	30
Figura 9 – Mesa de Flow Table manual	31
Figura 10 – Medição do espalhamento da argamassa.....	31
Figura 11 – Ensaio de Resistência à tração na flexão	33
Figura 12 – Corpo de prova rompido.....	33
Figura 13 – Ensaio de Resistência à compressão	33
Figura 14 – Classe das argamassas de acordo com a resistência à compressão.....	34
Figura 15 – Classe das argamassas de acordo com a resistência à tração	34
Figura 16 – Curva Granulométrica do agregado miúdo in natura.....	36
Figura 17 – Curva Granulométrica do vidro triturado	37
Figura 18 – Resistência á compressão das argamassas	40
Figura 19 – Resistência à tração na flexão	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação do módulo de finura	17
Tabela 2 – Propriedades físicas dos agregados	28
Tabela 3 – Análise Granulométrica da areia	35
Tabela 4 – Análise Granulométrica do vidro triturado	36
Tabela 5 – Resultados de espalhamento das argamassas	39
Tabela 6 – Resultados do ensaio de resistência á compressão	40
Tabela 7 – Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão	42

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	11
2	OBJETIVOS	12
2.1	GERAL.....	12
2.1.1	<i>ESPECÍFICOS</i>	12
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEORICA.....	12
3.1.	Argamassa.....	12
3.1.1	<i>Materiais Constituintes da Argamassa</i>	13
3.1.1.1	<i>Cimento</i>	13
3.1.1.2	<i>Agregados</i>	14
3.2.	Vidro	18
3.2.1.	Vidro como resíduo solido	20
3.3.	Pesquisas relacionadas sobre a Substituição Parcial da Areia por vidro como agregado miúdo	22
4	MATERIAL E MÉTODOS	23
4.1.1	<i>Métodos e Ensaios</i>	23
4.1.2	<i>Caracterização dos Materiais</i>	24
4.1.2.1	Água	24
4.1.2.2	<i>Agregado Miúdo – Areia</i>	24
4.1.2.3	<i>Cimento</i>	24
4.1.2.4	<i>Resíduos de vidro</i>	24
4.2	Ensaio de Caracterização	24
4.2.1	<i>Ensaio de Análise Granulométrica da Areia</i>	24
4.2.2	<i>Ensaio de Granulometria do Vidro</i>	25
4.3	Estudo de Dosagens e Determinação água/cimento	26
4.4	Moldagens dos corpos de prova.....	27
4.5	Ensaio no Estado Fresco – Índice de Consistência	29
4.6	Ensaio no Estado Endurecido.....	31
4.6.1	<i>Ensaio de Resistência à compressão e à tração na flexão</i>	31
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
5.1	Caracterização Granulométrica	34
5.2	Estudo de Dosagens	37
5.3	Ensaio de Índice de Consistência.....	37
5.4	Resistência à compressão e à tração na flexão	39
6	CONCLUSÕES.....	43
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43

1. INTRODUÇÃO

A construção civil é uma das indústrias mais importantes no Brasil, com forte influência no progresso econômico e social dos países. Porém, também é reconhecida por suas consequências ambientais, como a elevada produção de resíduos, a utilização de materiais e a modificação do meio ambiente. O setor enfrenta a missão de equilibrar a eficiência produtiva com a implementação de ações significativas que promovam o desenvolvimento sustentável e a minimização de impactos ambientais (OLIVEIRA, 2020).

De acordo com OLIVEIRA et al. (2020), a incorporação de grandes quantidades de resíduos é possível no setor da construção civil, e uma das técnicas mais promissoras para isso é o encapsulamento de resíduos em artefatos da construção civil. Embora consuma grandes quantidades de recursos naturais, a construção civil tem a capacidade de inserir no seu meio os resíduos sólidos, diminuindo as consequências ambientais causadas pela disposição final desses resíduos, e ao mesmo tempo, evitando a extração de matérias primas naturais.

Segundo a Associação Brasileira das Indústrias de Vidro (Abividro, 2019.), são produzidas mais de 8,6 bilhões de unidades de vidro por ano no Brasil. São aproximadamente, 1,3 milhões de toneladas do material colocado no mercado, e desse total, somente 300 mil toneladas (quase 25%) acabam destinadas a reciclagem.

De acordo com Bauer et al (2014), os vidros são compostos que contêm cerca de 70% de óxido de sílica, o que lhes confere boas propriedades pozolônicas para materiais cimentícios.

A administração inadequada de resíduos de vidro tem consequências prejudiciais significativas ao meio ambiente. Uma das principais formas de minimizar esses impactos é a coleta seletiva e o reaproveitamento do mesmo. De acordo com Souza et al. (2020), o Brasil possui cerca de 2.500 pontos de coleta de vidro, mas apenas 35% desse material é efetivamente reciclado. Ainda segundo o estudo, a falta de investimentos em infraestrutura e a falta de conscientização da população são alguns dos principais desafios para aumentar a taxa de reciclagem de vidro no país.

Diante do exposto, este estudo se dedica a uma análise das características e propriedades da argamassa sob a influência adicional de vidro moído como agregado miúdo, assegurando sua viabilidade como substituto parcial e proporcionando benefícios e possibilidades de aplicação desse resíduo na engenharia.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Realizar um estudo sobre as propriedades físico-mecânica da argamassa com substituição parcial do agregado miúdo areia pelo o resíduo vidro.

2.1.1 ESPECÍFICOS

- Caracterizar os agregados naturais e o resíduo de vidro utilizado como substituto do agregado miúdo (areia);
- Verificar a influência do resíduo de vidro nas propriedades físicas da argamassa, no estado fresco e endurecido;
- Comparar e avaliar as propriedades mecânicas das argamassas produzidas contendo diferentes teores de resíduos de vidro, com uma amostra de referência sem resíduos em diferentes idades.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Argamassa

Segundo Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 13529 (1995), a argamassa é “uma mistura homogênea de agregado(s) miúdos, aglomerante(s) inorgânicos e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento”. Possui função na construção civil de unir elementos estruturais, como tijolos e pedras, e também para preencher espaços vazios entre os elementos.

De acordo com a NBR 13281 (2005), existem requisitos mecânicos e reológicos específicos para as argamassas, são elas: resistência a compressão, capacidade de retenção de água e teor de água incorporado.

As argamassas são altamente eficientes em diversas aplicações na construção civil, como a união de unidades de alvenaria para criar um elemento único, aumentando a resistência aos esforços laterais. Elas também são utilizadas para selar juntas e garantir estanqueidade contra a penetração de água nas paredes, absorver deformações naturais de origem térmica e distribuir cargas atuantes (CARASEK,2007).

Para Silva (2008), a argamassa desempenha várias funções importantes na construção, como unir componentes de alvenaria, regularizar a absorção da base, corrigir imperfeições na base, cobrir e regularizar a superfície e unir componentes do acabamento decorativo e dar acabamento final a superfície. Para o autor ainda possuem outras funções e particularidades, pois a mesma pode contribuir para o aspecto estético de uma edificação, impedir a infiltração de água e evitar o crescimento de micro-organismos.

Sobre a utilização de resíduos em materiais, SOUZA (2008), salienta que o produto com uso de material reciclado necessita satisfazer às solicitações a que será submetido e as recomendações previstas pelas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), devendo ser funcional para o usuário e para indústria da construção civil.

3.1.1 Materiais Constituintes da Argamassa

3.1.1.1 Cimento

A história da indústria do cimento no Brasil começou em 1888, quando o empresário Antônio Prosst Rodovalho instalou a primeira fábrica no Estado de São Paulo. Desde então, várias outras indústrias surgiram em todo o país. Na década de 70, houve um aumento significativo na produção de cimento, passando de 9 milhões para 27 milhões de toneladas. Em 1999, atingiu-se um recorde de produção, com cerca de 40 milhões de toneladas devido ao início do Plano Real. Hoje em dia, a produção de cimento no Brasil é de aproximadamente 68 milhões de toneladas por ano (SNIC, 2017; ABCP, 2018).

Segundo a ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), o Cimento Portland é definido como: “Pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob a ação da água. Depois de endurecido, mesmo que seja novamente submetido a ação da água, o Cimento Portland não se decompõe mais”. (ABCP, 2001, p. 2).

O cimento Portland é amplamente utilizado em todo o mundo como ligante hidráulico para a fabricação de concreto, argamassas e pastas. A produção global de cimento é de 1,5 bilhão de toneladas por ano, o que consome grandes quantidades de energia e é responsável por cerca de 7% das emissões mundiais de CO₂. A fabricação de uma tonelada de clínquer de cimento Portland gera cerca de uma

tonelada de CO₂ na atmosfera. No Brasil, a produção mensal é de 4,5 milhões de toneladas, o que significa que o país contribui com a emissão de 4,5 milhões de toneladas de CO₂. Diante desse cenário, as indústrias estão buscando formas de se tornarem mais ecológicas, reciclando resíduos de uma indústria para substituir matérias-primas de outra, reduzindo assim, o impacto ambiental. Um exemplo disso são os cimentos compostos, que utilizam cinzas volantes e escória para substituir parte do clínquer de cimento, o que resulta na redução das emissões de carbono (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Os diferentes tipos de cimento são classificados de acordo com sua classe de resistência e os componentes adicionais utilizados para melhorar suas propriedades. Atualmente, no mercado brasileiro da construção civil, existem treze tipos de cimento Portland disponíveis para compra (KIHARA e CENTURIONE, 2005), expostos na **Figura 1**.

Figura 1 – Tipos de cimento comercializados.

Nome técnico do cimento Portland	Sigla	Classe	Conteúdo dos componentes (%)			
			Clínquer + gesso	Escória	Pozolana	Filer calcário
Comum	CPI	25, 32, 40	100	0	0	0
Comum com adição	CPI-S	25, 32, 40	95-99	0	1-5	0
Composto com escória	CPII-E	25, 32, 40	56-94	6-34	0	0-10
Composto com pozolana	CPII-Z	25, 32, 40	76-94	0	6-14	0-10
Composto com filer	CPII-F	25, 32, 40	90-94	0	0	6-10
Alto forno	CPIII	25, 32, 40	25-65	35-70	0	0-5
Pozolânico	CPIV	25, 32	5-45	0	15-50	0-5
Alta resistência inicial	CPV-ARI	-	95-100	0	0	0-5
Resistente a sulfatos	RS	25, 32, 40	-	-	-	-
Baixo calor de hidratação	BC	25, 32, 40	-	-	-	-
Branco estrutural	CPB	25, 32, 40	-	-	-	-
Branco não estrutural	CPB	-	-	-	-	-
Poços petrolíferos	CPP	-	-	-	-	-

Fonte: KHARA,Y.;CENTURIONE, S.L. 2005.

3.1.1.2 Agregados

Segundo a ABNT NBR 7211 (2005) os agregados miúdos são definidos como areias de origem natural ou obtidas através do britamento de rochas estáveis, ou uma mistura das duas, cujos 85% dos grãos passam na peneira de 4,8 mm e 15% são retidos na peneira de 0,075 mm. Eles exercem uma influência direta nas propriedades do revestimento, como retração, aderência e trabalhabilidade.

Entre os agregados miúdos utilizados na construção civil, Bauer (2008) afirma que a areia é considerada o mais comum. Sua granulometria é o fator determinante para classificá-la. Podemos vê-las descritas na **Figura 2** abaixo.

Figura 2– Classificação da areia quanto ao diâmetro dos grãos

Classificação	Tamanho dos grãos (mm)
Areia Fina	0,6 a 0,15
Areia Média	2,4 a 0,6
Areia Grossa	4,75 a 2,4

Fonte: Bauer, 2008.

De acordo com Nascimento (2018), os agregados miúdos, como a areia, desempenham a função principal de preenchimento na argamassa. No entanto, sua composição granulométrica e geometria dos grãos têm impacto significativo na qualidade da argamassa e do concreto, especialmente em relação à trabalhabilidade, densidade, compactação e resistência mecânica. É crucial que a granulometria dos agregados presentes na pasta seja devidamente controlada, pois essa característica tem grande impacto na retração, manuseabilidade, resistência à compressão e até mesmo na aderência da mesma. Quando se trata de argamassas com alto teor de cimento e cal, é necessário equilibrar o teor de areia de granulometria fina, pois altos níveis de finos aumentam o manejo e plasticidade e exigem mais água na pasta.

Londero et al. (2017) afirma que quando o agregado possui granulometria contínua e bem graduada, ele contribui para a redução do volume de vazios, atuando como um efeito de preenchimento conhecido como efeito filer, o que diminui a porosidade do conjunto granular e aumenta a sua densidade de empacotamento.

A NBR NM 248 é a norma utilizada para determinar a composição granulométrica dos agregados. Ela tem como objetivo estabelecer o método para identificar a distribuição de tamanhos dos agregados miúdos e graúdos. A mesma define como agregado miúdo cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 µm. Quanto ao seu módulo de finura, podemos classificá-las segundo a **Tabela 1** abaixo.

Tabela 1 – Classificação do módulo de finura

Granulometria	Módulo de Finura
Muito Grossa	$MF > 3,90$
Grossa	$3,30 < MF < 3,90$
Média	$2,40 < MF < 3,30$
Finas	$MF < 2,40$

Fonte: ABNT NBR 7211, 2009.

A determinação das dimensões das partículas é essencial para garantir a qualidade e segurança das obras. Elas podem ser encontradas em várias formas e tamanhos, mas as partículas mais importantes do ponto de vista da engenharia são as pequenas, conhecidas como agregado miúdo. A granulometria da areia afeta a facilidade de trabalhar com a argamassa e a quantidade de aglomerante e água necessários. Além disso, a distribuição granulométrica tem impacto no acabamento final, incluindo a tendência à fissuração, rugosidade, permeabilidade e resistência de aderência, afetando assim o desempenho geral do revestimento (ANGELIN et al., 2003, p.160.).

De acordo com Bauer (2014), o agregado é composto por uma mistura de grãos de diferentes tamanhos. É difícil encontrar uniformidade nas dimensões dos grãos de areia de mesma categoria. A proporção relativa, em porcentagem, dos diferentes tamanhos de grãos que compõem o agregado é conhecida como granulometria (Ribeiro, Pinto & Starling - 2013) a composição granulométrica é determinada através de ensaios laboratoriais, onde a amostra do agregado é submetida a uma classificação de tamanho de grãos de acordo com a série de peneiras da ABNT. A dimensão máxima característica e o módulo de finura são então definidos. Estes parâmetros são essenciais para especificar o uso dos agregados em argamassa. É importante mencionar que a composição granulométrica tem uma influência direta sobre a qualidade do argamassa, especialmente nos aspectos relacionados à consistência, resistência mecânica e à tração.

Segundo Ripper (1995), é necessário prestar muita atenção no uso dos agregados em concretos e argamassas, uma vez que eles são a maior parte dos materiais utilizados em uma construção. Em particular, para argamassas, é comum utilizar areia comum de grãos médios a grossos que pode conter uma pequena

quantidade de argila e impurezas. Para emboço (massa grossa), é recomendado usar areia limpa de grãos médios, enquanto para reboco (massa fina) é indicado usar areia fina e lavada (limpa e pura). Isso é crucial para evitar problemas como “estouros”. Na prática, o material utilizado para emboço e reboco é o mesmo, mas o desempenho é diferente. No reboco é usada esponja para os acabamentos.

3.1.1.3 Água

A água é fundamental para a produção de materiais cimentícios, como pastas, argamassas e concretos, pois o mesmo é responsável por garantir a trabalhabilidade da mistura e é essencial para iniciar a reação de hidratação dos componentes do cimento. Qualquer água apta para o consumo humano pode ser empregada na fabricação de cimento (Nville, 1997). Apesar disso, é importante lembrar que a água utilizada na mistura de cimento não deve conter nenhum tipo de impureza que possa afetar negativamente o processo de hidratação dos componentes do cimento.

Conforme o Ministério da Saúde (MS) (Brasil, 2021) a água é um recurso natural vital para a sobrevivência e o bem-estar da humanidade. Sua importância para a saúde e o desenvolvimento é inestimável, e é por isso que é essencial garantir que a água seja potável e segura para o consumo. Quando a água não atende aos critérios de potabilidade, ela pode causar doenças graves e comprometer seriamente as atividades físicas e biológicas das pessoas que a consomem. É fundamental, portanto, que sejam tomadas medidas para garantir a qualidade da água e seu acesso a todos, a fim de preservar a saúde e o bem-estar da humanidade.

Em argamassas e concretos não poderia ser diferente, precisam seguir critérios tanto quantitativos quanto qualitativos, pois impurezas presentes na água de mistura podem afetar negativamente a resistência mecânica e a durabilidade dos materiais. Em relação às misturas de argamassas e concretos utilizadas em obras, a sua composição nem sempre é especificada de forma precisa. Isso significa que a produção dessas misturas é baseada em critérios empíricos, ou seja, na experiência dos trabalhadores envolvidos na obra. Quando a composição é especificada, ela geralmente se refere à proporção dos aglomerantes e agregados miúdos e graúdos, bem como à quantidade de água utilizada na mistura (TecnoMor, 2020).

Quando a areia utilizada na argamassa possui um alto teor de fino e o ligante também é elevado, é necessário controlar o uso de água para evitar problemas. A

utilização de quantidade excessiva de água pode tornar a argamassa mais porosa, diminuindo sua resistência. Por outro lado, se a quantidade de água for insuficiente, a mistura não ficará perfeita (DUBAJ, 2000).

3.2. Vidro

Para BARSA (2019), o vidro é uma substância inorgânica, sem forma definida e homogênea em sua composição física. Ao esfriar, a massa endurece gradualmente, aumentando sua viscosidade até atingir um estado de rigidez sem passar por processo de cristalização.

As propriedades dos vidros e outros materiais é determinada pela sua estrutura e composição química. A variação dessas propriedades está relacionada à concentração dos componentes presentes no material. Isso pode afetar a proporcionalidade das propriedades, que são medidas para cada óxido. As fórmulas aditivas têm aplicação limitada e podem perder a validade quando há mudanças na estrutura ou interação dos componentes no vidro (Maia, 2003).

O vidro é composto pelos seguintes elementos: sílica, soda, cálcio, magnésio, alumina, cloreto de sódio, nitrato de sódio, óxidos e sucatas de vidros, como ilustra a **Figura 3**.



Figura 3 – Composição do vidro. (Fonte: ABVIDRO, 2011).

O vidro é amplamente utilizado hoje em dia com várias aplicações. É conhecido por sua transparência, capacidade de transmitir luz e reflexão. Barros (2010) mencionam suas propriedades mecânicas e físicas.

Propriedades mecânicas

- Elasticidade: É um material elástico e ao mesmo tempo frágil;
- Resistência à tração: Varia de 3 KN/cm² a 7 KN/cm² (30 Mpa a 70 Mpa);
- Resistência à compressão: Tem elevada resistência à compressão (1000 Mpa), o que possibilita um vasto campo para utilização desse material;
- Resistência a flexão: Resistência à flexão na faixa de 40 MPa para vidros recozido polido e 120 Mpa a 200 Mpa para temperados;

Propriedades físicas

- Dureza e resistência à abrasão: É um material duro, tendo valores na escala de Mohs (a escala vai de 1 a 10) de 6,5, entre a feldspato (6) e o quartzo (7);
- Densidade: Aceita-se o valor de 2,5 g/cm³, como valor médio para os vidros. No entanto, alguns valores são classicamente aceitos para alguns tipos de vidro, a tabela 1 traz as densidades dos principais vidros utilizados: Tabela 1: Densidade de Alguns Vidros

Vidro	Densidade (g/cm ³)
Cristal ordinário	3,33
Vidro para óculos	2,46
Vidro ordinário	2,56
Vidro para garrafas	2,64
- Resistência a brasão: Em média é 16 vezes mais resistente que o granito;
- Tem boa resistência química, exceto ao ácido fluorídrico (pela qual se deixa atacar);
- Praticamente impermeável, tanto para líquido, quanto para gás;
- Mal condutor de eletricidade;
- Boa resistência ao fogo;
- Isolamento térmico;
- Isolamento acústico.

Segundo Rashad (2014), a gestão inadequada dos resíduos de vidro, incluindo o vidro doméstico, é um dos principais desafios ambientais atuais. Com o aumento da quantidade de resíduos de vidro gerados e a diminuição da capacidade dos aterros sanitários, essa questão se torna cada vez mais urgente. Para mitigar os impactos negativos do descarte inadequado do vidro no meio ambiente,

pesquisas e estudos estão sendo realizados para encontrar formas eficientes de reciclagem.

3.2.1. Vidro como resíduo sólido

De acordo com a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 10.004 (2004), resíduos sólidos são definidos como aqueles que são gerados em estados sólidos ou semi sólidos, decorrentes de atividades industriais, domésticas, hospitalares, comerciais, agrícolas, de serviços e de limpeza de ruas.

A Lei 12.305/2010 instituiu o Gerenciamento Integrado dos Resíduos Sólidos Urbanos com o objetivo de implementar ações que resolvam os problemas relacionados ao manuseio de resíduos sólidos. Ela abrange aspectos como a geração, separação, embalagem, coleta, armazenamento, transporte, tratamento, reciclagem e destinação final dos resíduos, além de garantir a proteção à saúde pública.

A reciclagem de vidro traz diversos benefícios, um deles é a diminuição do uso de matéria-prima virgem. Para produzir uma tonelada de vidro novo, são necessários 1.200 kg de matéria-prima, enquanto que para produzir uma tonelada de vidro reciclado, é necessário apenas uma tonelada de caco de vidro. Além disso, a reciclagem de vidro também contribui para a economia de energia elétrica, reduzindo em 0,64 MWh/t, e também reduz o consumo de água em 50% e a poluição do ar em 20% (CALDEIRONI, 1999).

De acordo com a ABIVIDRO (2019), a prática de reaproveitar as embalagens vítreas após o consumo, utilizando um modelo retornável, tem diminuído no Brasil. No entanto, a reciclagem dessas embalagens é amplamente divulgada pelo setor vidreiro, devido ao fato de que o tempo de degradação das embalagens vítreas no meio ambiente é indeterminado. O processo de reciclagem, quando realizado, traz benefícios para o meio ambiente, como a redução de resíduos em aterros, a diminuição da emissão de gases de efeito estufa e a possibilidade de substituir completamente as matérias-primas naturais presentes nas embalagens, sem perda de qualidade ou propriedades durante o processo de refusão.

De acordo com a NBR 10004, os resíduos são classificados em três categorias: Classe I, Classe II A e Classe II B.

- Classe I: consiste em resíduos perigosos, que apresentam riscos para a saúde pública e ao meio ambiente devido às suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas.
- Classe II A: são os resíduos não inertes, que possuem características como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
- Classe II B: são os resíduos perigosos e inertes, que não solubilizam nenhum de seus constituintes em concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água ao entrarem em contato com água destilada ou deionizada.

De acordo com esses critérios, os resíduos de vidros planos são classificados como Classe II B, o que os torna não perigosos e inertes, facilitando o manuseio, separação, coleta e reciclagem do resíduo.

O vidro é uma material não biodegradável, e descartá-lo em aterros não é uma opção ecológica. Por isso, é necessário encontrar formas diferentes de lidar com o resíduo vidro. Uma alternativa é utilizá-lo em diversas aplicações, como na fabricação de abrasivos. Além disso, a inclusão do resíduo vidro na indústria da construção para a produção de concreto é um passo importante na redução dos custos de descarte deste material. (BISHT; RAMANA, 2017).

De acordo com Tamanna et al (2020), o processo de reciclagem para reutilização pelo setor de vidro não é viável economicamente devido a vários fatores. O resíduo de vidro está contaminado com elementos como tampas de plástico, metais e papéis colados, além da variação química entre os diferentes tipos de vidro e dificuldade na separação devido à coloração. A alternativa para o resíduo de vidro (RV) é utilizá-lo na produção de outros materiais. Compósitos cimentícios são uma opção promissora para esse fim. O RV pode ser triturado em diferentes partículas e substituir parcialmente o cimento e totalmente os agregados finos e grossos de concreto.

A utilização do resíduo de vidro na construção civil é uma forma atraente de aumentar o valor desse produto, já que o setor da construção pode incluir grandes quantidades de resíduo sem comprometer a qualidade do composto. (LETELIER et al, 2020).

3.3. Pesquisas relacionadas sobre a Substituição Parcial da Areia por vidro como agregado miúdo

Segundo Fávero (2009), a sílica ativa é uma ótima pozolana, altamente reativa e que proporciona excelentes ganhos de resistência mecânica. Já SANTOS (2003), afirma que a sílica é o principal componente na fabricação do vidro. Desta forma, o aumento da resistência à compressão ao longo do tempo pode estar relacionado ao efeito pozolânico gerado pelo resíduo de vidro. Além disso, o efeito filler, de preenchimento, diminuiu a porosidade da matriz, aumentando assim sua resistência mecânica.

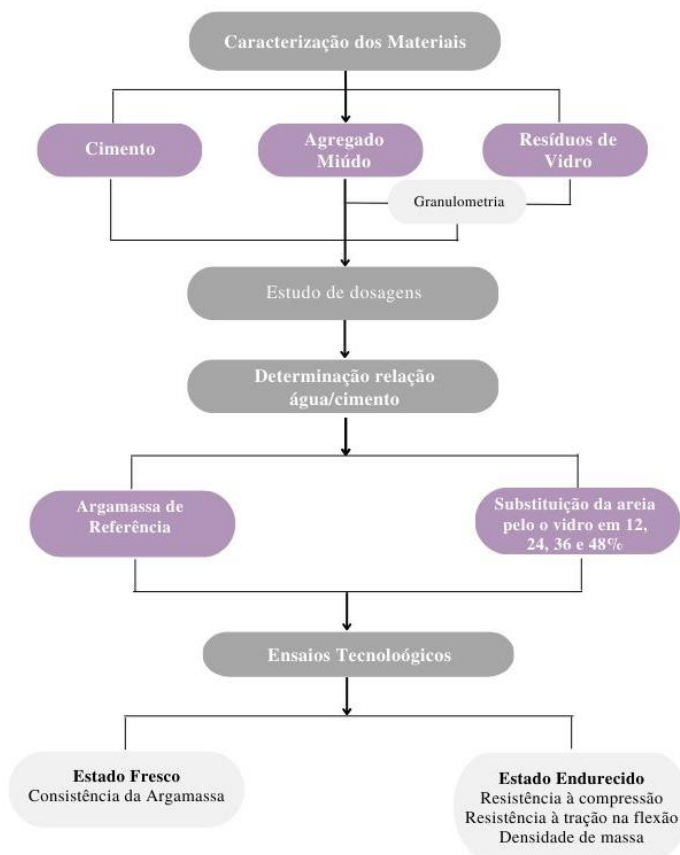
De acordo com METHA e MONTEIRO (2014), a relação entre a resistência à compressão e a porosidade dos agregados é evidente. Como o vidro é um material que não absorve água, quanto maior for a sua substituição nos agregados, maior será a resistência à compressão. Além disso, devido à curva de distribuição granulométrica do resíduo de vidro ser contínua e bem graduada, a mistura se mostrou mais compacta conforme o aumento do percentual de substituição, o que explica o aumento da resistência à compressão mecânica.

Já Matos (2010), a utilização do vidro como uma substituição parcial de cimento em misturas de argamassa, com as mesmas proporções utilizadas por Guignome (10 e 20%), resulta em uma diminuição na resistência à compressão, mas aumenta a resistência à penetração de cloretos e à reação álcali-sílica.

Mohajerani et al. (2017), realizou uma pesquisa aprofundada sobre o uso de resíduos de vidro como material na construção civil. Verificou-se que vários estudiosos estão se concentrando nas questões ambientais relacionadas ao descarte inadequado desses resíduos em aterros sanitários. No entanto, esses pesquisadores encontraram resultados animadores ao utilizarem o vidro como agregado em argamassas, concretos e asfalto.

4 MATERIAL E METODOS

Figura 4 – Fluxograma metodológico.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Apresenta-se na **Figura 4** um fluxograma detalhando todas as etapas desenvolvidas neste trabalho.

4.1.1 Métodos e Ensaio

Este capítulo irá detalhar os ensaios realizados como parte desta pesquisa, incluindo os métodos utilizados para caracterizar os materiais, processo de obtenção do vidro e dosagem da argamassa. Todos os testes foram conduzidos nos laboratórios de materiais e solos da Universidade Federal de Campina Grande, campus Pombal.

4.1.2 Caracterização dos Materiais

4.1.2.1 Água

A água utilizada nos ensaios foi adquirida através da empresa fornecedora de água encanada local- CAGEPA.

4.1.2.2 Agregado Miúdo – Areia

A areia utilizada neste experimento estava disponível no estacionamento do campus da Universidade, onde a mesma possui origem da ponte de São Domingos de Pombal, proveniente do rio.

4.1.2.3 Cimento

O tipo de cimento utilizado foi o CP II F, fabricado pela a empresa Poti, produzido de acordo com a norma NBR 16.697/2018. A escolha desse tipo, se deu por ser o disponível, quando procurado nos materiais de construção da cidade. É composto por: silicato de cálcio, alumínio, ferro, sulfato de cálcio e filler carbonáticos.

4.1.2.4 Resíduos de vidro

Os vidros foram obtidos de vidraçarias localizadas no centro da cidade Pombal, PB. A variação de espessura do mesmo foi de 3mm a 10mm.

É importante destacar que os vidros utilizados neste trabalho são compostos por pequenos fragmentos ou lotes com defeitos, que não possuem mais utilidade nas vidraçarias. Eles geralmente são descartados junto com o lixo comum. No entanto, todo o vidro utilizado foi retirado da reutilização de materiais que antes não possuíam qualquer potencial de uso.

4.2 Ensaio de Caracterização

4.2.1 Ensaio de Análise Granulométrica da Areia

O estudo da caracterização granulométrica da areia foi conduzido com base teórica e de acordo com a norma da NBR 7211/2009 no laboratório de geotecnia do campus CCTA.

Neste processo, foi possível obter a curva granulométrica, determinar o diâmetro máximo característico, calcular o módulo de finura e classificar a amostra de areia. Inicialmente, a amostra foi colocada em estufa a uma temperatura de 105°C por 1 hora para obter total secagem. Após esse procedimento, foi realizado o quarteamento da amostra para garantir a homogeneidade da mesma.

Em seguida, foram selecionadas cerca de 1000 gramas de areia. Essa pequena porção foi submetida a um peneiramento inicial, utilizando uma peneira de malha nº4. O objetivo foi obter o maior número possível de partículas passando na peneira. Em seguida, passou-se nas peneiras conforme a norma, obtendo o cuidado para evitar perdas de amostras durante o processo.

Figura 5 – Ensaio de Granulometria da areia: (a) Peneiramento; (b) Pesagem a mostra
(a) (b)



Fonte: Autoria própria, 2023

4.2.2 Ensaio de Granulometria do Vidro

O ensaio foi realizado com 7kg de material, onde o vidro foi separado por tamanhos e triturado manualmente. A trituração foi feita com adaptações dos equipamentos do laboratório de solos. Com ajuda de uma haste metálica, foram aplicados golpes no material até que fossem obtidos grão menores e com formas semelhantes ao agregado miúdo. O material foi pesado e partiu-se para análise granulométrica com o que passou na peneira de número 4. A caracterização

granulométrica procedeu-se do mesmo modo da areia, seguindo as normas da NBR 7211/2009, que determina a composição granulométrica em agregados.

Figura 6 – Ensaio de Granulometria da do vidro: (a) Processo de tritura; (b) amostra após ser triturada



(a)

(b)

Fonte: Autoria própria, 2023

4.3 Estudo de Dosagens e Determinação água/cimento

A pesquisa de dosagem foi baseada em estudos realizados por outros autores, e a partir dela foi selecionado o traço e formulado a argamassa. As argamassas foram elaboradas utilizando cimentos e agregados em proporção 1:3, em massa.

A definição do traço foi estabelecida baseando-se em pesquisas que utilizaram traços semelhantes conforme os autores como Souza (2016), Dias (2019) e KURZ (2018), que analisaram parâmetros como consistências e propriedades mecânicas de compostos cimentícios. De acordo com os relatos dos autores em seus trabalhos, os resultados mostraram que o vidro teve uma melhoria nas suas propriedades físicas e apresentou um excelente desempenho mecânico.

A quantidade de materiais usada foi baseada na norma ABNT 7215/2009, seguindo os requisitos de menor quantidade. A relação água/cimento foi determinada

através de testes para obter o valor adequado para a argamassa de assentamento, de acordo com o índice de consistência especificado pela norma ABNT NBR 13276.

Tabela 2 – Propriedades físicas dos agregados.

Material	Quantidade (g)
Cimento	700
Areia	2100
Água	385

Fonte: Autoria Própria, 2023

O método de mistura utilizado foi projetado para garantir a máxima homogeneidade dos componentes, seguindo as recomendações de Lopes et al. (2018). A argamassa foi preparada utilizando uma argamassadeira com capacidade de 5 litros. Os ingredientes foram adicionados aos poucos e misturados.

Todos os materiais secos foram adicionados ao equipamento automático, juntamente com 75% da água total. O equipamento foi ligado por 60s, para misturar os ingredientes. Em seguida, o aparelho foi desligado por 90s para que fosse possível raspar todo o recipiente e garantir a homogeneização da mistura. Então, foi adicionado os 25% restante da água e o equipamento foi ligado novamente na velocidade rápida por mais 60s, encerrando o processo de produção.

4.4 Moldagens dos corpos de prova

O preparo da argamassa se deu logo após a classificação granulométrica (da areia e do resíduo do vidro), com vários testes sendo realizados para chegar a uma argamassa de referência. O objetivo foi obter uma argamassa com valor ideal para argamassa de assentamento, conforme NBR 13276/2005. Corpos de prova foram moldados com substituição parciais de 12%, 24%, 36% e 48% de vidro. Todas as análises foram feitas moldando 3 corpos de prova para cada tipo de argamassa, garantindo assim uma maior precisão dos resultados, e em moldes prismáticos 4x4x16cm.

Conforme ilustrado na **Figura 7 (a)**, foram aplicadas camadas finas de óleo mineral para facilitar a remoção dos corpos de prova dos moldes. Depois de preparadas, foram inseridas e moldadas nos corpos de prova padrão e com diferentes

teores de vidro para as idades de 7 dia e 28 dias, visto na **Figura 7 (b)**. Em cada molde, foram aplicadas 3 camadas uniformes de argamassa, adensando-as com 30 golpes cada, conforme regulamentado pela NBR 13279/2005.

Figura 7 – Moldagem dos corpos de prova: (a) Lubrificação dos moldes; (b) Argamassas moldadas



(a)

(b)

Fonte: Autoria própria, 2023

Após moldagem, os corpos de prova foram identificados e removidos após 24 horas. A cura escolhida foi a cura úmida, regulamentada pela ABNT NBR 7215/19, que recomenda que os corpos de prova sejam inicialmente curados ao ar por 24 horas. Em seguida, desmoldados e imersos em água até o momento da realização dos ensaios mecânicos, como visto na **Figura 8**.

Figura 8 – Processo de cura das argamassas



Fonte: Autoria própria, 2023

A cura escolhida foi a cura úmida que segundo Silva et al. (2009), é crucial para as argamassas de revestimento, especialmente em áreas com alta ventilação e insolação, pois essas condições causam uma evaporação rápida da água durante o processo de endurecimento. Além disso, a cura úmida pode melhorar a aderência entre a argamassa e o substrato nas camadas de chapisco.

4.5 Ensaio no Estado Fresco – Ensaio de Índice de Consistência

O ensaio no estado fresco se refere ao ensaio que é feito logo em seguida a produção da argamassa.

A consistência das argamassas foi avaliada segundo os procedimentos da ABNT NBR NM 13276/2005, utilizando o ensaio de flow table. Ilustra-se na **Figura 9** o equipamento utilizado para as medições de consistência.

Para a execução do ensaio de consistência das argamassas, utilizou-se a mesa específica para tal finalidade. O mini slump foi posicionado no centro da placa e os materiais foram misturados na argamassadeira mecânica.

Figura 9 – Mesa Flow Table manual

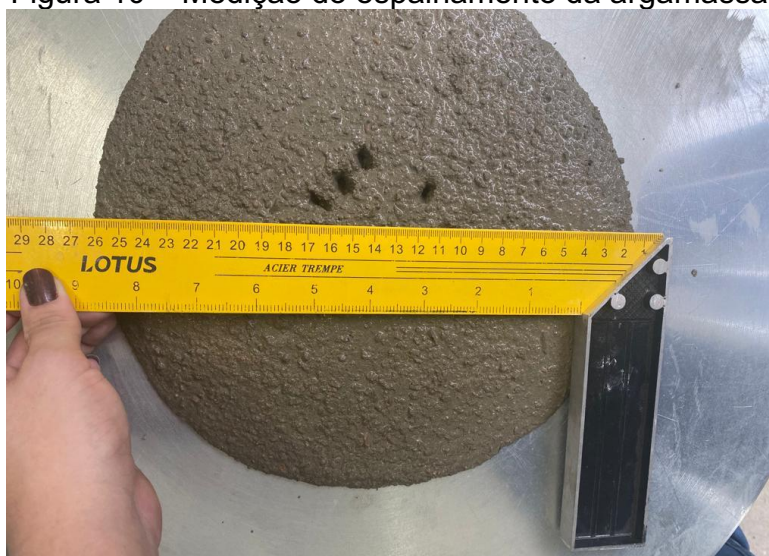


Fonte: SOLOTESTE, NBR 13220.

O objetivo do ensaio foi avaliar a consistência da argamassa mediante a média dos diâmetros perpendiculares de espalhamento do material, avaliando sua capacidade de se espalhar e preencher os espaços.

Após a mistura, o mini slump foi preenchido em três camadas com uma amostra de argamassa, registrando-se golpes de 15, 10 e 5 em cada camada. Em seguida, o mini cone foi levantado 30 vezes para permitir o espalhamento da argamassa sobre a placa. Utilizando uma régua métrica, foram feitas três medidas perpendiculares e a média dessas medidas foi utilizada para determinar o espalhamento final da argamassa, que deve estar dentro do intervalo de 24 a 26cm, de acordo com a EFNARC (2002).

Figura 10 – Medição do espalhamento da argamassa.



Fonte: Autoria própria, 2023

O teste de espalhamento foi realizado para avaliar os diâmetros alcançados em cada traço. Mostra-se com a **Figura 10** um dos resultados dos ensaios de índice de

constância realizados durante o processo de teste de dosagem. Ela mostra como a argamassa se apresentou na dosagem ideal, e o diâmetro de espalhamento alcançado pela argamassa na dosagem em que a relação água/cimento se deu ótima.

4.6 Ensaios no Estado Endurecido

Após o período de cura descrito anteriormente, foram realizados os ensaios mecânicos de resistência à tração na flexão e resistência à compressão no estado endurecido, assim, variações foram feitas nos níveis de vidro e duração da cura, mantendo a proporção de 1:3 para ensaios em idades de 7 e 28 dias.

4.6.1 Ensaio de Resistência à compressão e à tração na flexão

Os ensaios de compressão de acordo com as normas da ABNT NBR 7215/1996 (Associação Brasileira de Normas Técnicas) são utilizados para medir a resistência à compressão de um determinado material. Esses ensaios são realizados com a ajuda de uma máquina universal, onde uma carga de compressão é aplicada a um corpo de prova (geralmente um cilindro ou cubo) até a sua ruptura. Os dados obtidos incluem a carga máxima suportada pelo corpo de prova, a deformação máxima e a relação entre esses dois valores (módulo de elasticidade). Esses resultados são comparados com os valores estabelecidos pela norma para o material em questão e servem para avaliar se o material atende às especificações necessárias para sua utilização.

A norma ABNT NBR 13279/2005 regulamenta os ensaios de resistência a compressão e tração na flexão. Três corpos de provas prismáticos com medidas de 4x4x16cm foram utilizados para determinar a tração na flexão em idades de 7 e 28 dias. Uma carga foi aplicada no centro do corpo de prova bi-apoiado e a tensão de flexão foi calculada. Para o ensaio de compressão, foram utilizadas metades dos corpos de prova usados no ensaio de tração na flexão.

Apresentam-se com as **Figuras 11 e 12** a execução do teste de tração na flexão. Já a **Figura 13** ilustra uma metade do corpo de prova prismático submetido ao teste de compressão.

Figura 11 – Ensaio de resistência à tração na flexão.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 12 – Corpo de prova rompido.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 13 – Ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Estes ensaios envolvem a quebra dos corpos de provas através de tensões de compressão, causadas por uma pressão hidráulica que aplica cargas gradualmente sobre o corpo de prova, até que a carga de ruptura seja alcançada. A resistência a compressão do bloco de concreto é calculada pela relação entre a carga de ruptura e a área da seção transversal do mesmo.

A análise dos resultados de resistência a compressão e tração na flexão é essencial para determinar se as argamassas convencionais atendem aos requisitos estabelecidos pela norma. Essa análise classifica as argamassas em seis classes, de acordo com sua resistência a tração na flexão e a compressão. Na **Figura 14** vê-se as classes das argamassas de acordo com sua resistência a compressão, enquanto a **Figura 15** identifica-se as classes das argamassas de acordo com sua resistência a tração na flexão. Estas tabelas foram utilizadas para classificar as argamassas produzidas.

Figura 14 – Classe das argamassas de acordo com a resistência a compressão.

Classe	Resistência à compressão (Mpa)	Método de ensaio
P1	≤ 2,0	ABNT 13279
P2	1,5 a 3,0	
P3	2,5 a 4,5	
P4	4,0 a 6,5	
P5	5,5 a 9,0	
P6	> 8,0	

Fonte: ABNT NBR 13281/2005.

Figura 15 – Classe das argamassas de acordo com a resistência a compressão.

Classe	Resistência à tração na flexão (Mpa)	Método de ensaio
R1	≤ 1,5	ABNT 13279
R2	1,0 a 2,0	
R3	1,5 a 2,7	
R4	2,0 a 3,5	
R5	2,7 a 4,5	
R6	> 3,5	

Fonte: ABNT NBR 13281/2005.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização Granulométrica

Apresenta-se na **Tabela 3** os resultados da análise granulométrica do agregado miúdo natural. A análise foi realizada utilizando as séries de peneiras normais descritas na NBR 7211/2009.

Além disso, foi possível compreender e enquadrar essas características dentro dos requisitos das argamassas. Inicialmente, a classificação granulométrica da areia foi obtida através dos dados expressos na **Tabela 3**.

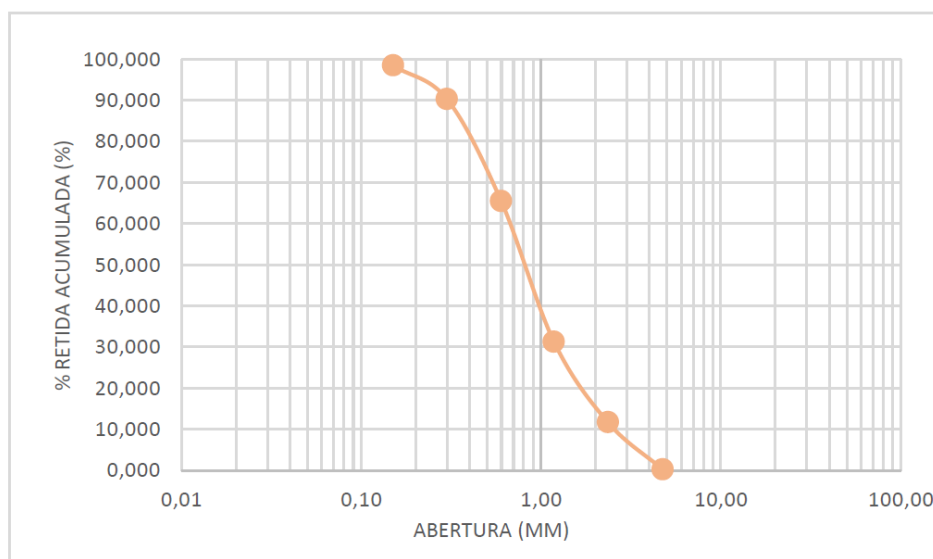
Tabela 3 – Análise granulométrica da areia.

Abertura (mm)	Massa Retida (g)	% Massa Retida	% Massa Retida Acumulada
4,75	2,00	0,20	0,200
2,36	114,00	11,40	11,6
1,18	196,00	19,60	31,20
0,6	342,00	34,20	65,40
0,3	248,00	24,80	90,20
0,15	82,00	8,20	98,40
Fundo	16,00	1,60	100,00

Fonte: Autoria própria, 2023.

Conforme a **Tabela 3**, a classificação da areia do estudo é de agregado miúdo com granulometria muito grossa. A curva granulométrica do agregado miúdo foi calculada com base nos dados de porcentagem retida acumulada e abertura das peneiras apresentados na **Tabela 3**, como ilustrado na **Figura 16**.

Figura 16 – Curva Granulométrica do agregado miúdo in natura.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Para analisar o vidro triturado, foram utilizadas as mesmas técnicas utilizadas para analisar a areia.

Tabela 4 – Análise granulométrica do vidro triturado.

Abertura (mm)	Massa Retida (g)	% Massa Retida	% Massa Retida Acumulada
4,75	26,00	2,60	2,600
2,36	490,00	49,00	51,60
1,18	206,00	20,60	72,20
0,6	132,00	13,20	85,40
0,3	66,00	6,60	92,00
0,15	46,00	4,60	96,60
Fundo	34,00	3,40	100,00

Fonte: Autoria própria, 2023.

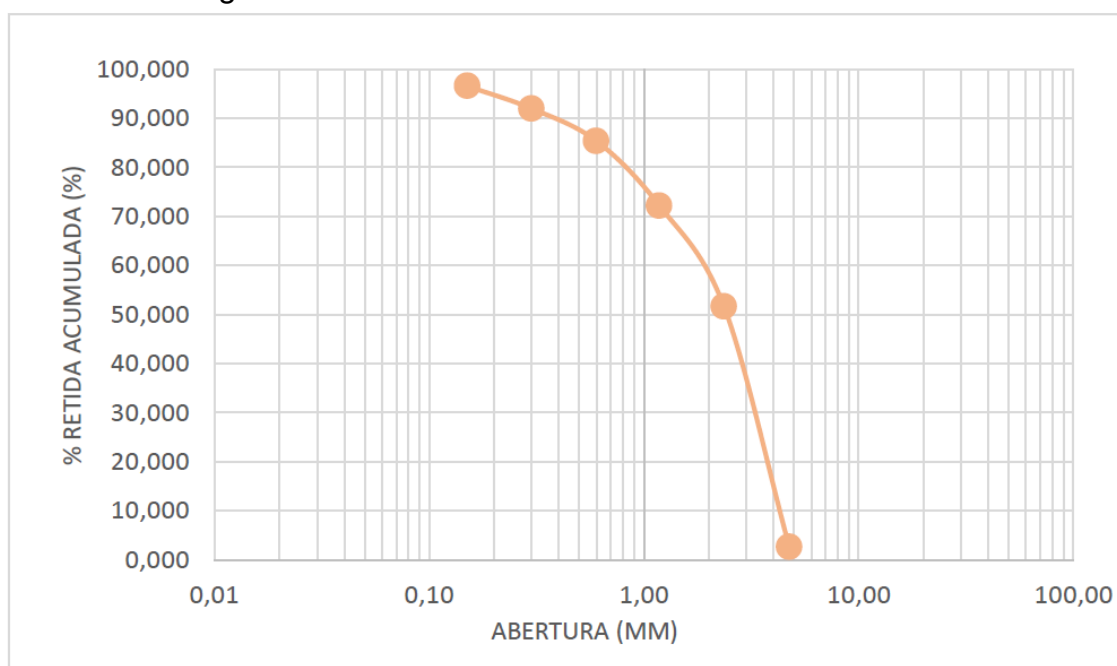
A **Tabela 4** mostrou os dados necessários para calcular o módulo de finura, a distribuição granulométrica e a dimensão máxima característica. De acordo com esses dados, o vidro triturado apresentou um módulo de finura de 5,04, classificando-se como um agregado miúdo de granulometria muito grossa.

A granulometria da areia tem um impacto direto na performance da argamassa, afetando a facilidade de trabalhar com ela e o consumo de água e aglomerantes no estado fresco. Além disso, também afeta o acabamento final, como a tendência à fissuração, rugosidade, permeabilidade e resistência de aderência (ANGELIM et al., 2003).

Em geral, as curvas granulométricas ideais para concretos e argamassas são aquelas que possuem um equilíbrio perfeito entre os grãos de diferentes tamanhos, sem nenhuma falta ou excesso. Isso é fundamental para garantir a resistência e a durabilidade desses materiais, pois as curvas desequilibradas podem comprometer a aderência dos grãos e a densidade do concreto ou argamassa, afetando sua resistência à compressão e à flexão.

Com base nos resultados obtidos, traçamos a curva granulométrica do vidro, conforme ilustrado na **Figura 17**.

Figura 17– Curva Granulométrica do vidro triturado.



Fonte: Autoria própria, 2023.

De acordo com os dados apresentados no **Figura 17** e na **Tabela 4**, foi observado que a curva granulométrica do vidro triturado é mais contínua quando comparada com a da areia. Ambos os tipos de materiais apresentam granulometria muito grossa e módulo de finura acima de 3,90, no entanto, a curva granulométrica

dos grãos do vidro indica que eles estão mais graduados. Isso pode ser benéfico para sua utilização em argamassas, pois confere maior trabalhabilidade.

Os grãos de vidro com essa granulometria também contribuem para aumentar a resistência à aderência, compressão, impermeabilidade e para a constituição de argamassas para assentamento. A característica máxima do diâmetro do agregado proposto foi de 2,36mm.

5.2 Estudo de Dosagens

A argamassa de referência foi elaborada com a proporção 1:3, baseada em testes realizados. Depois de analisada, foi estabelecida a mesma quantidade de água para todas as substituições estudadas.

Após diversos experimentos para determinar a proporção adequada entre água e cimento (relação a/c), foi estabelecida a relação a/c de 0,55 como a mais adequada para as argamassas. Essa escolha foi baseada nos resultados obtidos nos testes, que mostraram que as argamassas não apresentavam a fluidez desejada quando a relação a/c era inferior a 0,55.

Dessa forma, essa relação a/c foi mantida constante em todos os traços utilizados na pesquisa, o que proporcionou resultados positivos na dosagem ótima da argamassa para todas as substituições estudadas. Os dados das composições da argamassa são apresentados na **Tabela 2**.

Tabela 2 – Propriedades físicas dos agregados.

Material	Quantidade (g)
Cimento	700
Areia	2100
Água	385

Fonte: Autoria Própria, 2023

5.3 Ensaio de Índice de Consistência

A **Tabela 5** apresenta os dados de espalhamento obtidos através do teste de mini slump, conforme as diretrizes estabelecidas pela EFNARC (2002).

Tabela 5 – Resultados de espalhamento das argamassas.

Teores de Substituição do agregado	D1 (cm)	D2 (cm)	Esp. Médio: 24 a 26 cm
0%	25,46	25,83	25,64
12%	26,61	25,62	26,12
24%	26,77	26,82	26,80
36%	26,64	26,88	26,76
48%	26,87	26,97	26,92

Fonte: Autoria própria, 2023.

De acordo com a NBR 13276 (ABNT, 2016), o valor padrão para argamassas mistas de uso múltiplo é de 260 ± 5 mm. Com base nessa norma, a **Tabela 5** mostra os resultados obtidos a partir do abatimento da mesa de consistência. O método utilizado para realizar o ensaio também seguiu essa norma.

Ao examinar os dados da **Tabela 5**, notou-se que a adição de resíduo de vidro aumentou a fluidez da argamassa em questão e também proporcionou maior facilidade de manipulação durante sua fabricação. Comprovando este fato, como visto, o espalhamento da argamassa de referência com 25,64cm, enquanto as argamassas com teores de substituição de 12, 24%, 36% e 48%, apresentaram espalhamento superior a argamassa sem resíduo.

Segundo Carasek et al (2016), quando se alcança o melhor empacotamento em sistemas de agregados, as argamassas tendem a ser mais compactas. Por outro lado, elas precisam de menos pasta para manter a mesma fluidez (trabalhabilidade), devido a menos espaços vazios que precisam ser preenchidos, o que resulta em mais pasta disponível para lubrificar as partículas e aumentar o afastamento entre elas. Com o aumento do afastamento das partículas pela pasta, ocorre uma redução do atrito interno e uma melhoria na fluidez da argamassa. A viscosidade da pasta varia de acordo com a proporção entre a mistura e o agregado substituto (vidro), a medida que esta proporção aumenta, a viscosidade também aumenta, mantendo o índice de consistência elevado em todas as argamassas.

Dessa forma, os ensaios permitiram alcançar os traços finais e foram obtidos valores de índice de consistência dentro dos limites considerados adequados pela ABNT NBR 13276/2005.

5.4 Resistência à compressão e à tração na flexão

A **Tabela 6** e a **Figura 18** apresentam os resultados obtidos no ensaio de resistência a compressão das argamassas analisadas, nos períodos de 7 e 28 dias. Os resultados foram satisfatórios de acordo com a norma estabelecida.

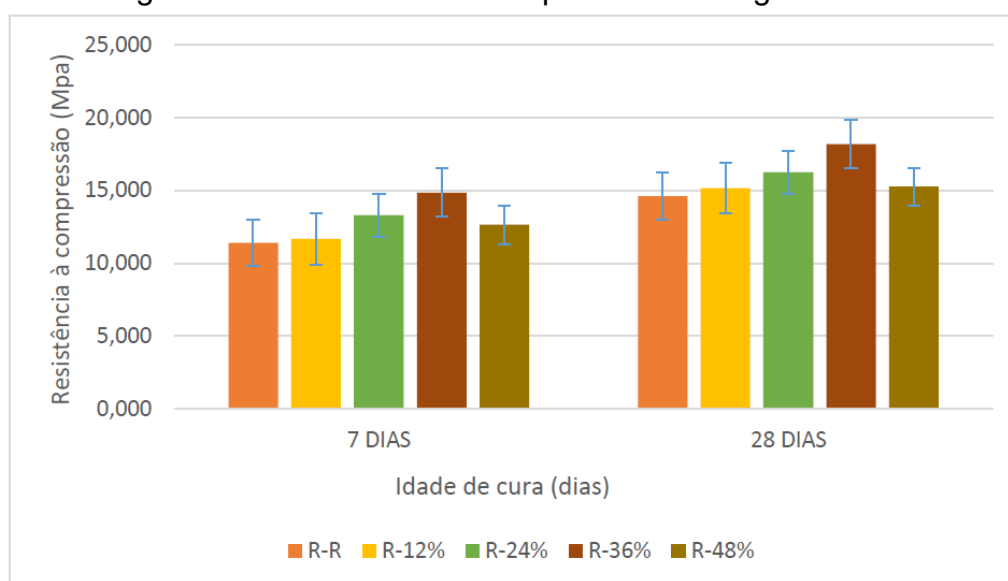
Tabela 6 – Resultados do ensaio de resistência à compressão das argamassas.

Resistência à compressão (Mpa)		
Teor de Substituição do agregado	Idade de Cura	
	7	28
R-R	11,400	14,618
R- 12%	11,676	15,170
R- 24%	13,306	16,242
R- 36%	14,863	18,204
R- 48%	12,644	15,268

Fonte: Autoria própria, 2023.

A distribuição das resistências é mostrada na **Figura 18**, de acordo com a idade de cura e o teor de resíduos adicionados.

Figura 18 – Resistência à compressão das argamassas.



Fonte: Autoria própria, 2023.

A análise dos resultados indica que as argamassas feitas com resíduos de vidro possuem maior resistência à compressão do que as argamassas de comparação. Em geral, observou-se um aumento nas resistências mecânicas à compressão durante o período de cura.

A tese de que matrizes cimentícias compostas por sistemas de agregados bem empacotados tendem a apresentar maior resistência mecânica é confirmada pelos resultados obtidos. Estudos realizados por Tokarski (2017) e Canova et al. (2015) apontam para o alcance de resultados superiores em argamassas produzidas com a substituição da areia natural pelo pó de pedra.

É observado que a substituição de 48% resultou em um aumento menos significativo da resistência em comparação com as outras porcentagens. Por outro lado, a argamassa com 36% de substituição apresentou o melhor desempenho quanto à resistência à compressão aos 28 dias, aumentando em 25% na resistência nessa idade em relação a argamassa de referência.

De acordo com MEHTA e MONTEIRO (2014), há uma relação inversa entre a porosidade e a resistência dos sólidos. A resistência à compressão das argamassas está diretamente ligada à porosidade da mistura. Dessa forma, como o resíduo de vidro moído apresentou uma melhor distribuição granulométrica em comparação com o agregado miúdo natural utilizado, o aumento do teor de substituição melhorou o empacotamento da mistura, diminuindo os vazios e a quantidade de água utilizada. Isso justifica o aumento da resistência à compressão nos teores de 24 e 36%.

De acordo com a média dos resultados obtidos ao longo de 28 dias de cura e a classificação de resistência à compressão estabelecida pela norma NBR 13281:2005, o traço de referência e os traços estudados com resíduos de vidro se enquadra na classe P6 com valores de compressão maiores que 8 Mpa.

A análise da **Figura 18** revela uma conexão direta entre a duração do processo de cura e a capacidade de resistir à compressão. Quanto mais tempo é gasto para curar, maior é a resistência apresentada. Porém, é importante observar que essa relação tende a se estabilizar após um certo limite. Além disso, a figura também indica que a resistência está relacionada ao nível de substituição dos materiais até um determinado ponto, após o qual a substituição passa a afetar negativamente as propriedades da argamassa.

O aumento da resistência das argamassas observado é semelhante aos estudos de Shi et al. (2004), que também desenvolveram argamassas com substituição parcial de 20% do cimento por vidros com características similares às do cimento Portland e proporção a/c em torno de 0,48. De acordo com os autores, as resistências obtidas com os resíduos, aos 28 dias de idade, foram superiores (39 MPa) em relação à argamassa de referência (35 MPa).

De acordo com Ferreira (2017), as argamassas possuem propriedades de resistência mecânica diferentes do concreto. A resistência à tração na flexão tem maior influência sobre o desempenho e durabilidade dos revestimentos do que a resistência a compressão. Quando as tensões internas do conjunto alvenaria-revestimento excedem a resistência à tração na flexão das argamassas, fissuras são geradas no revestimento, comprometendo sua performance.

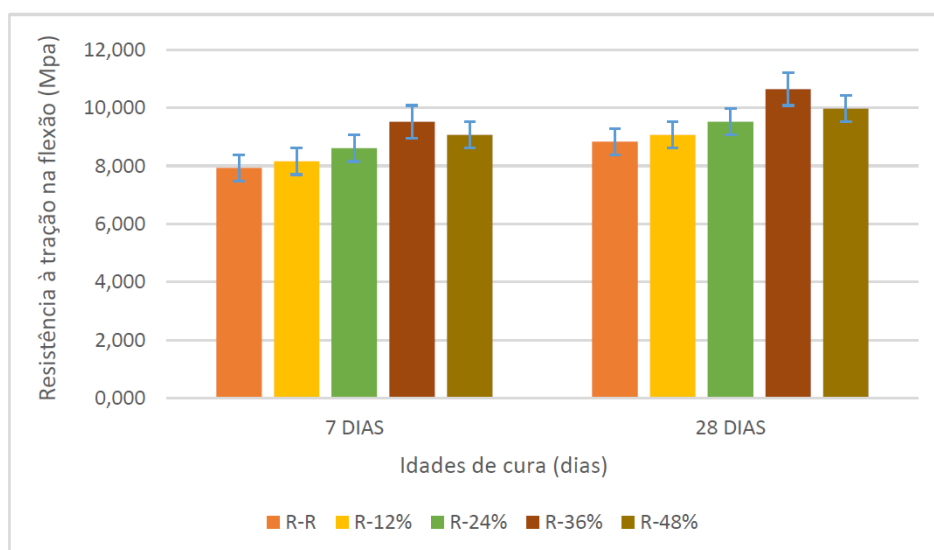
Testes de resistência à tração na flexão foram realizados em amostras de 4x4x16cm aos 7 e 28 dias de idade, de acordo com a norma NBR 13279 (ABNT, 1995). Os resultados para cada tipo de argamassa estudada estão dispostos na **Tabela 7** e na **Figura 19**.

Tabela 7 – Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão.

Teor de Substituição do agregado	Resistência à tração (Mpa)	
	Idade de Cura	
	7	28
R-R	7,930	8,837
R- 12%	8,157	9,063
R- 24%	8,610	9,516
R- 36%	9,516	10,649
R- 48%	9,063	9,970

Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 19– Resistência à tração na flexão



Fonte: Autoria própria, 2023.

Ao se comparar as argamassas que utilizam parcialmente resíduos de vidro em vez de apenas agregados tradicionais, verifica-se que a resistência à flexão é superior à das argamassas de referência. Todos os resultados de resistência à tração na flexão demonstraram um crescimento progressivo durante o período de cura, assim como os resultados de resistência a compressão.

Os resultados mostraram que as argamassas elaboradas com 36% de resíduos de vidro apresentaram níveis mais elevados de resistência à flexão em comparação com a argamassa de referência. Observou-se um aumento gradual de 20% na resistência após 7 dias e de 20% após 28 dias.

De acordo com a ABNT NBR 13281/2005, a classificação para este tipo de argamassa é R6, pois ela possui resistências superiores a 3,5 Mpa, conforme apresentado na **Figura 15** do item **4.6.1**.

Portanto, verificamos que a adição de resíduos de vidro contribuiu para o preenchimento dos espaços vazios entre as partículas da argamassa, resultando em uma maior resistência à tração em comparação com a argamassa tradicional.

Segundo Recena (2015), é crucial que os revestimentos argamassados possuam uma resistência à tração superior à resistência de aderência, para que as tensões não causem problemas indesejáveis na ligação entre a pasta e o substrato. Os resultados apresentados atendem a essa exigência em relação à resistência à tração na flexão.

6 CONCLUSÕES

Constatou-se que a substituição resultou em uma diminuição no índice de vazios na argamassa e maior resistência à compressão. Isso ocorreu porque as partículas finas de vidro preencheram os vazios na massa.

A avaliação da consistência no estado fresco, através do ensaio de índice de consistência, mostrou que aumentar as proporções de adição (de 12% até 48% em relação à areia) traz benefícios para a trabalhabilidade da argamassa. A proporção de 48% obteve o melhor desempenho, mas foi observado que todos os resultados foram crescentes em comparação à argamassa de referência. Verificando assim, que o vidro triturado tem uma boa distribuição granulométrica e proporciona uma maior fluidez e facilidade de manipulação durante a fabricação da argamassa.

Os testes conduzidos no estado endurecido da argamassa apresentaram resultados positivos, sendo que o melhor deles foi alcançado com a adição de 36% de vidro. Esse percentual proporcionou um aumento de 25% na resistência à compressão em comparação com o concreto de referência. Os outros percentuais utilizados, 12% e 24%, também mostraram aumentos modestos, mas significativos, de 3,78% e 11,11%, respectivamente.

Ao analisar os resultados, foi identificado que existe um limite para o aumento do resíduo utilizado em afetar negativamente as propriedades mecânicas do material. O melhor desempenho foi alcançado com 36% de aumento, mas ao aumentar para 48%, houve uma diminuição nas resistências mecânicas. Isso indica que existe um valor máximo benéfico para a trabalhabilidade, sem que as propriedades da argamassa sejam prejudicadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211 - Agregados para concreto-especificações. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215 - Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004 - resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222 - Concreto e Argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279 - Argamassa para assentamento e revestimentos de paredes e tetos. – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro - RJ, 2005.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13529 – Rvestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Rio de Janeiro - RJ, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16915 - Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248 - Agregado miúdo – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ANGELIM, R. R.; ANGELIM, S. C. M.; CARASEK, H. Influência da distribuição granulométrica da areia no comportamento dos revestimentos de argamassa. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, V., 2003. Anais... São Paulo: ANTAC, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. ABCP. Guia Básico de Utilização do Cimento Portland. (Guia Técnico), ABCP, 7 ed. São Paulo, 2002

ASSOCIAÇÃO TÉCNICA BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS AUTOMÁTICAS DE VIDRO - ABIVIDRO. Disponível em: <https://abividro.org.br/sustentabilidade/qualidade-do-vidro/>. Acesso em 02 de out. de 2022.

BARROS, C. Vidros. Instituto Federal Sul Rio-Grandense. Pelotas, 2010.

Bauer L. A. F. (2014). Materiais de construção, 5. Ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2008. 538 p.

BARSA, Enciclopédia. Rio de Janeiro: Enciclopédia Britânica Consultoria Editorial LTDA. Vol. 15 p. 410 – 420.

BISHT, K.; RAMANA, P.V. Sustainable production of concrete containing discarded beverage glass as fine aggregate. Department of Civil Engineering, Malaviya National Institute of Technology. Jaipur, Rajasthan, India, 12 May 2018. Acesso em: 06 jan. 2023.

BRASIL. Lei n. 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e dá outras providências.

CALDERONI, Sabetai. Os bilhões perdidos no lixo. 3ª ed. São Paulo: Humanistas, 1999.

CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, G. C. (Ed.). Materiais de Construção Civil. São Paulo: Ibracon, cap.26, p. 863-904, 2007.

CARASEK, H. et al. Parâmetros da areia que influenciam a consistência e a densidade de massa das argamassas de revestimento. Matéria (Rio de Janeiro) [online], v.21, n.03, 2016.

DIAS, James Monteiro. Análise da Influência de Resíduos de Vidro nas Propriedades Mecânicas do Concreto. Orientador: Prof. MSc. Rogério de Jesus Santos. 2019. Dissertação (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Gouveia, 2019.

DUBAJ, E. 2000. Estudo comparativo entre traços de argamassa de revestimento utilizadas em Porto Alegre. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Programa de Pós-Graduação em Engenharia. Porto Alegre. Brasil.

EFNARC. Specification and Guidelines for Self-compacting Concrete. Report from EFNARC, [s. l.], v. 44, n. February, p. 32, 2002. Disponível em: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Specification+and+Guidelines+for+Self-Compacting+Concrete#0>. Acesso em: 24. Dez. 2022.

El-Haggar, S. (2018). Utilization of Glass Waste as a Partial Replacement of Sand in Mortar. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(6), 04018026.

FÁVERO, R.B. “Avaliação da utilização de sucata de vidro como adição mineral frente à sílica ativa e como agregado miúdo artificial na produção de materiais à base de cimento”. Trabalho de conclusão de curso, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2009.

LETELIER, V.; HENRÍQUEZ-JARA, B. I.; MANOSALVA, M.; MORICONI, G. Combined use of 405 waste concrete and glass as a replacement for mortar raw materials. *Waste Management*, [S.L.], v. 94, p. 406 107-119, jul. 2019.

LONDERO, C. et al. Determinação da densidade de empacotamento de sistemas granulares compostos a partir da areia normal do IPT: comparação entre modelos de otimização de distribuição granulométrica e composições aleatórias. *Cerâmica*. São Paulo, v.63, n.365, p.23-33, mar.2017. DOI: 10.1590/0366-69132017633652018.

LOPES, R. K. Utilização de resíduo moído de vidro industrial na confecção de argamassa de cimento 408 Portland em Porto Velho/RO. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do 409 Amazonas. 2017, 107f.

KURZ, M. N.; BRANDELLI, T. M.; PALIGA, C. M.; TORRES, A. S. revista *Matéria*, v.23, n.3, 2018.

MAIA, Samuel Berg. *O Vidro e sua fabricação*. Ed: Interciencia Rio de Janeiro, 2003.

MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*, 3 ed., São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2014.

Ministério Da Saúde. Portaria de Consolidação n. 5, de 28 de setembro de 2017. Anexo XX – Controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília, 2017.

MOHAJERANI, A.; VAJNA, J.; CHEUNG, T. H. H.; KURMUS, H.; ARULRAJAH, A.; HORPIBULSUK, S.. Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: a review. *Construction and Building Materials*, v.156, p.443-467, 2017.

OLIVEIRA, J. P. et al. Concrete performance evaluation of coarse aggregate replacement by civil construction waste. Universidade Federal de Santa Maria, 04 de setembro de 2020. Acesso em: 10 dez. 2022.

OLIVEIRA, L.T., SILVA, J.B., IDE, C.N., “Avaliação das Propriedades Físicas de Corpos de Prova com a Adição de Lodo de Reciclo de Cromo”, In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, Salvador, 2007.

PAIVA, O.A. “Resíduo Industrial de vidro moído em argamassa de cimento Portland”, Dissertação de Mestrado, UFAM, Manaus, AM, Brasil, 2009

RASHAD, A. M.. Recycled waste glass as fine aggregate replacement in cementitious materials based on Portland cement. *Construction and Building Materials*, v.72, p.340-357, 2014.

Recena, F. A. P. *Conhecendo argamassa*. Porto Alegre: ediPUCRS, 2015.

Relação água/cimento: o que é e como afeta a qualidade final do concreto. TecnoMor, 2020. Disponível em: <https://tecnomor.com.br/blog/relacao-agua-cimento-o-que-e/>. Acesso em: 17, dezembro de 2022.

Ribeiro, C. C.; Pinto, J. D. S. & Starling, T. (2013). *Materiais de Construção Civil*. Ed. UFMG, (4a ed.).

Ripper, E. (1995). *Manual prático de materiais de construção*. Pini.

SANTOS, A. R., “Vidro - Ficha Técnica”, *Programa de Iniciação Científica, Departamento de Construção Civil, Escola Politécnica da USP*, São Paulo, 2003.

SILVA, A. S. R., Argamassas: Conceitos, tipos e funções, Comunidade da construção, Salvador, 2008.

SILVA, V. S. et. al.; Influência dos resíduos vítreos na resistência à compressão axial do concreto de cimento portland. In: VIII Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Curitiba, 2009.

SHI, C.; WU, Y.; RIEFLER, C.; WANG, H. "Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders". Cement and Concrete Research, v. 35, n. 5, p. 987-993, may 2005. Disponível em: <
http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MIimg&_imagekey=B6TWG4CMYBG6-2-1&_cdi=5562&_user=686157&_orig=search&_coverDate=05%2F31%2F2005&_sk=999649994&view=c&wchp=dGLzVlz-zSkzS&md5=eb73fe4e992ad6208ad15750283403a9&ie=/sdarticle.pdf> Acesso em: nov. 2022.

SOUZA, T.M. "Análise das propriedades mecânicas de argamassas com adição de vidro triturado", Trabalho de Conclusão de Curso, UEPB, Araruna, PB, Brasil, 2016.

SOUZA, J., Estudo da durabilidade de argamassas utilizando cinzas e casca de arroz, Tese do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

Souza, D. et al. "Glass recycling in Brazil: current status and future perspectives", Brasil, 2020.

TAMANNA, N.; TULADHAR, R.; SIVAKUGAN, N. Performance of recycled waste glass sand as 427 partial replacement of sand in concrete. Construction And Building Materials, [S.L.], v. 239, p. 117804, 428 abr. 2020.