



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA

PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DE MATERIAIS

ALESSANDRA DE SOUSA LIMA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AGREGADO
MIÚDO POR RESÍDUO DE VIDRO EM ARGAMASSAS**

Recife

2023

ALESSANDRA DE SOUSA LIMA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AGREGADO
MIÚDO POR RESÍDUO DE VIDRO EM ARGAMASSAS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências de Materiais da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para obtenção do título de mestre em Ciências de Materiais. Área de concentração: Materiais não metálicos.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Nathalia Bezerra de Lima

Recife
2023

Catálogo na fonte
Bibliotecária Nataly Soares Leite Moro, CRB4-1722

L732e Lima, Alessandra de Sousa
Estudo da influência da substituição parcial de agregado miúdo por resíduo de vidro em argamassas / Alessandra de Sousa Lima. – 2023.
74 f.: il., fig., tab.

Orientadora: Nathália Bezerra de Lima.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CCEN, Ciência de Materiais, Recife, 2023.
Inclui referências.

1. Materiais não metálicos. 2. Argamassa. 3. Resíduo de vidro. I. Lima, Nathália Bezerra de (orientadora). II. Título.

620.19

CDD (23. ed.)

UFPE- CCEN 2023 - 64

ALESSANDRA DE SOUSA LIMA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AGREGADO
MIÚDO POR RESÍDUO DE VIDRO EM ARGAMASSAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência de Materiais da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestra em Ciência de Materiais.

Aprovada em: 29/03/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Nathália Bezerra de Lima (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr. Tiago Felipe de Abreu Santos (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr. Felipe Mendes da Cruz (Examinador Externo)
Universidade de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pelas bênçãos e propósito em minha vida.

Agradeço aos meus amados pais, Terezinha Maria de Sousa Lima e Vicente Francisco de Lima (*in memorian*) por todo o amor, carinho e apoio ao longo dos anos, por serem minha base e me incentivar a ser cada vez melhor desde sempre, me ensinando a lutar pelo que é correto. Tudo o que sou devo a vocês. Agradecer em especial à minha mãe, por me amar e ajudar incondicionalmente, mesmo que distante. A distância, que atualmente faz parte de nossa realidade, machuca e a saudade é enorme, mas o propósito vale à pena. Agradeço também a meu irmão Alexandre, pelas trocas e pela irmandade. Amo vocês. Agradeço também a todos os integrantes da minha família que me ajudaram, direta ou indiretamente, durante minha trajetória.

Agradeço aos amigos da graduação que seguiram jornada parecida com a minha e estão na UFPE. Jonathan, Julie e Rhodivam, vocês foram, e ainda são, um porto seguro em Recife. Agradeço também aos demais amigos que fiz durante a caminhada.

Agradeço à professora Nathalia Bezerra pela orientação e assistência durante esses anos.

À FACEPE pelo apoio financeiro, viabilizando a efetivação desse projeto e desenvolvimento da ciência, como também ao INTM e Programa de Pós-Graduação em Ciências de Materiais (PGMTR) da UFPE pela infraestrutura.

Agradeço à minha avó, Maria de Jesus Justino (*in memorian*), que sempre foi um exemplo de paciência, carinho e afeto pra mim, apesar do pouco tempo que passamos juntas. O amor que sinto pela senhora é algo que nem consigo explicar, sei que és uma estrelinha no céu cuidando de mim e me guiando.

Por fim, minha gratidão a todas as pessoas que contribuíram para o desenvolvimento desse trabalho.

RESUMO

Nesta dissertação foi analisada a influência da substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de vidro na propriedade mecânica de resistência à compressão em argamassas, bem como nas etapas de fabricação. Foram fabricadas argamassas com resíduo de vidro substituindo a areia nas proporções de 10%, 20% e 30% em relação à proporção adotada entre cimento e areia, como também argamassas sem essa substituição. Para os quatro casos foram utilizados 6 kg de cimento, 2,9 kg de cal, 21 kg de areia e 4 kg de resíduo de vidro, utilizando uma relação água/cimento de 1,3. Os resultados de resistência à compressão obtidos mostram que para as argamassas com resíduo de vidro houve uma diminuição deste comportamento mecânico quando comparadas a resistência da argamassa de referência, em ambas as idades. Apesar desta diminuição, a diferença de comportamento mecânico foi pequena (< 1 MPa). Embora tenha provocado uma leve diminuição nos valores de resistência das argamassas, a incorporação de resíduo de vidro nas misturas promoveu uma melhor trabalhabilidade às massas, uma vez que o material não absorve água. Adicionalmente foi realizada caracterização química, estrutural e microestrutural dos materiais precursores e dos produtos obtidos. Assim, foram realizados ensaios de difração de raios-x (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de raios-x por energia dispersiva (EDS) e termogravimetria (TG). A partir das análises de DRX foi possível identificar o uso de argamassa calcítica, como também a presença de sistemas como quartzo e silicatos de cálcio hidratado. Através dos resultados de MEV/EDS percebeu-se a boa formação dos produtos de hidratação do cimento etringita e portlandita e com a análise termogravimétrica o efeito de altas temperaturas nas argamassas. Os resultados também mostraram que as argamassas sem resíduo de vidro apresentaram os maiores valores de resistência à compressão quando comparado aos casos em que a areia foi substituída pelo resíduo. Finalmente, ao avaliar todos os diferentes tipos de argamassas fabricados nesta dissertação, as adições de 10% e 20% de resíduo de vidro levam a argamassas de maior potencialidade para aplicações na construção civil.

Palavras-chave: argamassa; resíduo de vidro; caracterização; microestrutura; resistência à compressão.

ABSTRACT

In this work, the influence of partial replacement of fine aggregate by glass waste was investigated in the mechanical property of compressive strength in mortars, as well as on the manufacturing stages. Mortars with glass waste substituting sand in the proportions of 10%, 20% and 30% in relation to the proportion adopted between cement and sand were manufactured, as well as mortars without this substitution. For the four cases 6 kg of cement, 2.9 kg of lime, 21 kg of sand and 4 kg of waste glass were used, using a water/cement ratio of 1.3. The compressive strength results revealed that the strength of mortars with glass waste decreased compared to the strength of the reference mortar, at both ages. Despite this decrease, the difference in mechanical behavior was small (< 1 MPa). Although it has caused a slight decrease in mortar strength values, the incorporation of glass waste in the mixtures has promoted a better workability of the mixtures, since the material does not absorb water. Additionally, chemical, structural, and microstructural characterization of the precursor materials and the obtained products was performed. Thus, X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) and thermogravimetry (TG) analyses were performed. From the XRD analyses it was possible to identify the use of calcitic mortar, as well as the presence of systems such as quartz and hydrated calcium silicates. Through the SEM/EDS results it was possible to notice the good formation of the cement hydration products ettringite and portlandite, and with the thermogravimetric analysis the effect of high temperatures on the mortars. The results also showed that the mortars without glass waste showed the highest compressive strength values when compared to the cases where the sand was replaced by waste. Finally, when evaluating all the different types of mortars produced in this dissertation, the additions of 10% and 20% of glass waste lead to mortars with greater potential for applications in civil construction.

Keywords: mortars; glass waste; characterization; microstructure; compressive strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Fluxograma das atividades propostas para o procedimento experimental do projeto.	37
Figura 2 –	Discos de pasta cimentícia com relações água/cimento 0,40 (esquerda) e 0,50(direita).	41
Figura 3 –	Corpo de prova cúbico, composto por água e cimento, posicionado na prensa para ser submetido à compressão.	41
Figura 4 –	Corpos de prova cilíndricos, com dimensões 5mm x 10mm, da argamassa de referência (esquerda) e argamassa com 20% de resíduo de vidro (direita).	42
Figura 5 –	Curva granulométrica do resíduo de vidro, diâmetro das partículas versus percentual passante.	47
Figura 6 –	Médias das resistências à compressão dos CP's com 7 e 28 dias de cura, respectivamente.	48
Figura 7 –	Imagens MEV da argamassa de referência.	49
Figura 8 –	Imagens MEV da argamassa com 20% de resíduo de vidro.	50
Figura 9 –	Imagens MEV da argamassa com 30% de resíduo de vidro.	50
Figura 10 –	Resultado do EDS referente à argamassa de referência.	52
Figura 11 –	Resultados EDS referente à argamassa com 20% RV (esquerda) e 30% RV (direita).	52
Figura 12 –	Difratogramas de raios X das argamassas de referência e com 30% de resíduo de vidro após a cura.	55
Figura 13 –	Difratograma de raios X da cal hidratada utilizada na produção das argamassas	56
Figura 14 –	Análise termogravimétrica (TG/DSC) da argamassa de referência, após 28 dias de cura úmida.	57
Figura 15 –	Análise termogravimétrica da argamassa com 30% de resíduo de vidro, após 28 dias de cura úmida.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dosagens das argamassas estudadas no procedimento experimental.	39
Tabela 2 – Quantidade, em peso, dos materiais utilizados na confecção de corpos de prova cilíndricos, resultando em 24 CPs para cada tipo de argamassa.	43
Tabela 3 – Média dos valores, em MPa, das resistências à compressão dos CP's rompidos com 7 e 28 dias de cura	48
Tabela 4 – Dados quantitativos obtidos através do espectro EDS, para a argamassa de referência.	54
Tabela 5 – Tabela 5: Dados quantitativos obtidos através do espectro EDS, para a argamassa contendo 20% RV.	54
Tabela 6 – Tabela 6: Dados quantitativos obtidos através do espectro EDS, para a argamassa contendo 30% RV.	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo geral	15
2.2	Objetivos específicos	15
3	REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1	Histórico	16
3.2	Argamassas	16
3.2.1	<i>Argamassa de cal</i>	17
3.2.2	<i>Argamassa de cimento</i>	17
3.2.3	<i>Argamassa mista</i>	18
3.2.4	<i>Tipos de argamassas</i>	18
3.3	Materiais constituintes da argamassa	18
3.3.1	<i>Agregados miúdos</i>	18
3.3.2	<i>Cal</i>	19
3.3.3	<i>Cimento</i>	20
3.4	Funções das argamassas de revestimento.....	21
3.4.1	<i>Trabalhabilidade</i>	22
3.4.2	<i>Adesão inicial</i>	22
3.4.3	<i>Plasticidade</i>	22
3.4.4	<i>Retenção de água</i>	22
3.4.5	<i>Resistência mecânica</i>	23
3.5	Dosagem de argamassas	24
3.6	Hidratação do cimento	24
3.7	Adições minerais em substratos.....	26
3.7.1	<i>Adições minerais em concretos</i>	27
3.7.2	<i>Principais adições minerais</i>	28

3.8	Mecanismos de adesão	33
3.9	Resíduos sólidos	34
3.9.1	<i>Resíduo de vidro</i>	35
4	METODOLOGIA	38
4.1	Características dos materiais utilizados	38
4.1.1	<i>Aglomerante</i>	38
4.1.2	<i>Plastificante</i>	38
4.1.3	<i>Agregado natural</i>	39
4.1.4	<i>Agregado reciclado</i>	39
4.2	Beneficiamento do agregado reciclado	39
4.2.1	<i>Areia</i>	39
4.2.2	<i>Resíduo de vidro</i>	39
4.2.3	<i>Estudo da granulometria do resíduo de vidro</i>	39
4.3	Procedimentos Experimentais	40
4.3.1	<i>Planejamento das proporções das argamassas</i>	40
4.3.2	<i>Tratamento e limpeza dos resíduos</i>	41
4.4	Estudo inicial para análise comportamental dos componentes	41
4.4.1	<i>Preparação de pastas cimentícias</i>	41
4.4.2	<i>Preparação de corpos de prova de cimento e água</i>	42
4.4.3	<i>Preparação de corpos de prova de argamassa</i>	43
4.5	Preparação das argamassas para confecção dos CPs	43
4.5.1	<i>Argamassa de referência</i>	44
4.5.2	<i>Argamassas com resíduo de vidro</i>	44
4.5.3	<i>Procedimento de cura</i>	45
4.6	Caracterizações	45
4.6.1	<i>Termogravimetria e termogravimetria derivada</i>	45
4.6.2	<i>Calorimetria exploratória diferencial (DSC)</i>	45

4.6.3	<i>Microscopia eletrônica de varredura (MEV e MEV/EDS)</i>	46
4.6.4	<i>Difração de Raios-X (DRX)</i>	46
4.6.5	<i>Determinação da resistência à compressão</i>	46
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5.1	Granulometria.....	47
5.2	Resistência à compressão	47
5.3	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	50
5.4	Espectroscopia por dispersão de energia (EDS).....	52
5.5	Difração de Raios-X	55
5.6	Termogravimetria	57
6	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	60
7	CONCLUSÕES	61
	REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Xavier *et al.* (2020), as argamassas podem ser consideradas misturas homogêneas e acredita-se que tenha surgido na Pérsia antiga, onde era usada em alvenaria de tijolos secos expostos ao sol. No império romano, as primeiras argamassas foram criadas a partir da mistura de cinzas vulcânicas, materiais aglomerantes e materiais inertes. No Brasil, começou a ser usada no primeiro século da colonização, sendo muito utilizada para assentar alvenaria de pedra (Xavier *et al.*, 2020). Vale destacar que a argamassa é um material constituído pela mistura de aglomerantes, agregados miúdos e água, podendo também conter aditivos com a finalidade de melhorar suas propriedades, que após tratamento de cura endurece atendendo às propriedades e desempenhos especificados. Ainda em estado úmido, possuem boa plasticidade, enquanto que, quando endurecidas, possuem rigidez, resistência e aderência. As argamassas são normalmente constituídas por cimento, cal, areia e água, sendo que, outros materiais também podem ser adicionados de acordo com particularidades regionais, como o barro e o caulim, aplicação, necessidade e/ou intenção de estudo.

Existem quatro principais classes de argamassa que podem ser utilizadas para realizar o ligamento entre blocos de alvenaria ou peças de cerâmicas de revestimento, vale elencar: argamassa de assentamento, argamassa para pisos, argamassa impermeabilizante e argamassa de revestimento. A argamassa de assentamento sendo a classe mais empregue e conhecida, é utilizada para se fazer a união entre tijolos e blocos de alvenaria. A argamassa para pisos é colocada no contra piso para dar ligação entre o contra piso e a cerâmica. No que tange a argamassa impermeabilizante é utilizada para proteger ambientes contra a umidade, fazendo a impermeabilização de paredes e tetos. A última classe principal se trata da argamassa de revestimento, que é contida pelo chapisco que cria uma aderência, do emboço para a regularização do local e o reboco para dar o acabamento (Xavier *et al.*, 2020).

A fabricação de argamassas com a presença de adições vem ganhando espaço, esses materiais são adicionados às argamassas para modificar as suas propriedades e quantidade é levada em consideração no proporcionamento

(Carasek, 2007). As adições geralmente são empregadas como substitutos do agregado miúdo ou da cal, visando garantir plasticidade à massa com um custo reduzido. Quando utilizadas para substituir o agregado miúdo, tem-se em vista a busca por materiais e métodos que minimizem o impacto ambiental. Um exemplo de adição que vem sendo utilizada pela construção civil é o resíduo de vidro.

A indústria da construção civil consome uma grande quantidade de cimento Portland e areia natural para produzir argamassa, concreto e derivados. Em 2018, o setor de construção civil foi responsável por 36% do consumo final de energia e por 39% da energia e emissão de dióxido de carbono (CO₂) associadas ao seu processamento (IEA, 2019).

A produção de grande volume de concreto e argamassas requer o uso contínuo dos recursos naturais. O uso excessivo e descontrolado de areia natural na indústria da construção introduziu sérias preocupações em relação ao equilíbrio dos recursos naturais. Em decorrência disso, pesquisadores buscam estudar o potencial uso de vários produtos residuais, como escória de ferroníquel, resíduos de vidro e resíduos cerâmicos como alternativas à areia natural em misturas cimentícias (Sharifi *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2018; Siddique *et al.*, 2018; Saha e Sarker, 2017). Dentre esses resíduos sólidos, o resíduo de vidro tem se destacado entre as pesquisas como substituto do agregado miúdo devido possuir características físicas e químicas similares, principalmente serem compostos majoritariamente por sílica. O grande volume da produção de vidro também aumentou a quantidade de resíduos de vidro e, apesar de ser 100% reciclável, boa parte do vidro vai parar em aterros sanitários ou lixões (Soliman e Tagnit-Hamou, 2017; Sharifi *et al.*, 2015).

Pesquisas atuais indicam que o resíduo de vidro pode ser considerado um adequado material de construção devido a características como, por exemplo, seu tamanho flexível, forma, composição química e ampla disponibilidade quando comparado com outros materiais cimentícios sustentáveis (Metha e Ashish, 2019; Jiang *et al.*, 2019; Paul *et al.*, 2018). O estudo da aplicação do vidro em substituição de agregados naturais como em concreto e argamassas pode ser uma alternativa viável para promover a economia circular sustentável e reduzir o uso de recursos naturais e energéticos. No geral, analisando pesquisas anteriores, o resíduo de

vidro pode ter enorme potencial para ser utilizado como substituição de areia natural na preparação de materiais cimentícios. Buscou-se analisar a influência de diferentes teores de resíduo de vidro nas argamassas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

É objetivo geral desta dissertação avaliar a influência da incorporação de resíduo de vidro miúdo como substituinte parcial de agregado miúdo em um conjunto de argamassas na resistência à compressão, morfologia e propriedades estruturais destes materiais.

2.2 Objetivos específicos

São objetivos específicos:

- Projetar e preparar um conjunto de argamassas sustentáveis a partir da incorporação de resíduo de vidro como substituinte de agregado miúdo (areia);
- Caracterizar propriedades estruturais das argamassas a partir de experimentos de DRX;
- Investigar aspectos morfológicos e químicos das superfícies das argamassas a partir de experimentos de MEV/EDS;
- Avaliar o comportamento térmico das argamassas por experimentos de termogravimetria;
- Analisar a possibilidade de utilização de resíduo de vidro moído como substituto parcial da areia e a influência que essa substituição exerce sobre o produto final.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Histórico

As argamassas são um dos produtos mais utilizados na construção civil, desde o tempo do antigo Egito e Oriente Médio, quando o gesso e a cal desempenhavam a função de material ligante das partes, muito embora a argila fosse anteriormente usada em seu estado natural como forma de unir peças de mesma natureza. Entretanto foram os romanos e os gregos que exploraram e utilizaram outros materiais como aditivos para, gradativamente, aumentar a resistência mecânica da argamassa. Foi assim que iniciaram o desenvolvimento da argamassa hidráulica (Moropoulou, et al., 2002; Marques, 2005; Rodrigues, 2013).

As argamassas de revestimento, presentes na grande maioria dessas edificações, têm a função de criar uma camada superficial que reveste e protege os paramentos, realizando um acabamento regular e garantindo as funções higiênicas estéticas e de proteção ao ambiente. Em geral, os requisitos da argamassa são diferentes para os rebocos externos e os internos. Para os revestimentos externos é preponderante a função protetora, embora continue significativa a função decorativa. Para a formação dos rebocos para exterior, preferem-se cimento e/ou cal hidráulica como ligante, pelo menos nas primeiras camadas do reboco. (BERTOLINI, 2010).

As argamassas a base apenas de cal aérea, graças às propriedades de baixa absorção e de rápida restituição da água, são às vezes utilizadas para a formação de argamassas para exteriores; é muito importante garantir que a área permaneça seca nos primeiros meses depois da colocação (BERTOLINI, 2010).

3.2 Argamassas

Argamassas são materiais constituídos por um ou mais aglomerantes, materiais de granulometria pequena (areia natural ou de britagem) e água misturados homogeneamente. Pode haver também aditivos ou adições minerais em sua composição com finalidade de melhorar as propriedades do conjunto. As argamassas possuem propriedades aderentes e de endurecimento (CARASEK,

2017). A NBR 13529 (ABNT, 1995) traz definições complementares relacionadas à natureza dos aglomerantes, propriedades e funções, como:

- argamassa de cimento: possui o cimento como único aglomerante;
- argamassa mista: preparada com mais de um aglomerante;
- argamassas de chapisco, emboço e reboco: argamassas utilizadas nos processos de chapisco, emboço e reboco, respectivamente;
- revestimento: cobertura de uma superfície com uma ou mais camadas de argamassa.

As argamassas são de uso essencial na construção civil, sendo utilizadas em revestimentos, assentamento de alvenaria e rejuntamentos de cerâmicas. Teve suas primeiras aplicações datadas da pré-história, descoberta durante uma escavação na Galileia, onde foi encontrado um piso com pedras e argamassa de cal e areia. A utilização de argamassas de cal e gesso também foi registrada entre os egípcios, gregos e romanos. Com o passar do tempo, novos materiais foram sendo desenvolvidos, o que também influenciou as argamassas recentes, que passaram a possuir cimento Portland em sua composição e, frequentemente, aditivos orgânicos (CARASEK, 2017).

Usualmente são utilizadas argamassas de cal, de cimento e argamassas de cimento, cal e areia, também conhecidas como argamassas mistas (ABNT, 1995).

3.2.1 Argamassa de cal

Argamassa composta por cal, agregado miúdo e água, sendo a cal o único aglomerante. Os vazios presentes entre os grãos do agregado miúdo são preenchidos com a cal, melhorando a plasticidade e a retenção de água. Normalmente apresentam baixa resistência mecânica e um endurecimento lento (RECENA, 2012).

3.2.2 Argamassa de cimento

Composta por cimento, agregado miúdo e água, sendo o cimento o único aglomerante. Possui elevada resistência mecânica, porém tem baixa retenção de água, o que lhe confere baixa trabalhabilidade (CARASEK, 2017). Geralmente possuem boa resistência mecânica e resistência à umidade (RECENA, 2012).

3.2.3 Argamassa mista

Possui cimento e cal como aglomerantes juntamente dos agregados miúdos e da água. Consegue associar boas características do cimento, como a secagem mais rápida, e da cal, como melhor trabalhabilidade e flexibilidade (CARASEK, 2017).

3.2.4 Tipos de argamassas

De acordo com Kanan (2008) os principais tipos de argamassa, classificadas quanto à sua utilização, são:

Argamassas de assentamento e preenchimento aplicadas em pisos, alvenarias e até em coberturas com a função de preencher vazios presentes, dar estabilidade e ajudar a distribuir cargas;

Argamassas de revestimento são os rebocos e acabamentos que possuem a função de proteger o substrato de intempéries e ações do meio;

Argamassas decorativas se permitem ser moldadas e pintadas, oferecendo proteção e acabamento às superfícies.

3.3 Materiais constituintes da argamassa

Como citado anteriormente, as argamassas são formadas por aglomerantes, no geral cimento Portland, agregados miúdos, cal e/ou gesso (podendo ser substituídos por aditivos).

3.3.1 Agregados miúdos

O conceito de agregados miúdos, ou areia na denominação popular, segundo a NBR 7211 (ABNT, 2005), é “agregados cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 µm, em ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248, com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310-1.

A distribuição granulométrica da areia interfere no desempenho da argamassa, influenciando a trabalhabilidade e o consumo de aglomerantes e água, no estado fresco. Já com o revestimento acabado, influencia na rugosidade, permeabilidade e resistência à aderência (ANGELIM, 2003). A areia não participa das reações químicas de endurecimento, no estado fresco sua composição granulométrica e tamanho dos grãos influenciam na trabalhabilidade e retenção de água; no estado endurecido exerce influência nas resistências mecânicas e capacidade de deformação (CARNEIRO & CINCOTTO, 1997).

Normalmente, a caracterização das areias é feita através do seu módulo de finura, através de especificações de faixas granulométricas ou selecionada a partir de normas que especificam a granulometria dentro de certas faixas (SILVA, 2006). SELMO (1989) classificou as areias de acordo com o módulo de finura em:

MF < 2.0	areia fina,
2.0 < MF < 3.0	areia média,
MF > 3.0	areia grossa.

Dentre as principais funções dos agregados miúdos estão prover a pasta de partículas capazes de suportar as cargas aplicadas, intempéries e desgaste mecânico; reduzir bruscas variações de volume comum no processo de endurecimento das argamassas e, por fim, prover um material de enchimento economicamente atrativo (MINEROPAR, 2004).

Ainda de acordo com MINEROPAR (2004), os agregados podem ser classificados quanto à sua origem, podendo ser naturais, encontrados na natureza já na forma de utilização; ou artificiais, agregados que necessitam de modificações para se tornarem adequados para uso.

3.3.2 Cal

A NBR 7175 (ABNT, 2003) conceitua cal hidratada como um pó seco obtido através da hidratação adequada da cal virgem, constituída de hidróxido de cálcio ou uma mistura de hidróxido de cálcio com hidróxido de magnésio, ou ainda, uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio.

CARASEK et al. (2001) classificam as cales quanto sua composição, sendo:

cálcica: $\text{CaO} > 90\%$, em relação aos óxidos totais,

magnésica: $65\% < \text{CaO} < 90\%$,

dolomítica: CaO < 65%.

Quanto à aplicação, a cal sempre fez parte dos componentes de argamassas, porém, com uso de aditivos, a cal perdeu um pouco desse espaço. Dentre suas aplicações estão a construção civil, indústria e serviços públicos. No estado fresco a cal propicia maior plasticidade à argamassa, o que promove melhor trabalhabilidade e uma aplicação da massa melhor executada e, ainda no estado fresco, a cal auxilia na retenção de água (RAGO & CINCOTTO, 1999).

Argamassas que contém cal preenchem mais facilmente e completamente a superfície do substrato, o que proporciona melhor aderência (CARASEK et al., 2001). Ainda segundo CARASEK et al. (2001), diversos estudos indicam que com o aumento da percentagem de hidróxido de magnésio na composição da cal há aumento na capacidade de aderência da argamassa.

3.3.3 Cimento

Taylor (1967) explica que, por volta de 1756, o engenheiro Jonh Smeaton buscava por um aglomerante que endurecesse mesmo em contato com água. Durante sua busca, Jonh verificou que uma mistura calcinada de calcário e argila tornou-se resistente depois de seca. Apenas em 1824, o pedreiro Joseph Aspdin patenteou a descoberta denominando de cimento Portland, referenciando a *Portlandstone*, uma pedra bastante utilizada nas construções em Portland, Inglaterra. O calcário era moído com argila em meio úmido até se transformar em pó. Após a evaporação da água, os blocos formados pelo pó seco eram moídos bem finos.

Tanto o tipo de cimento quanto suas características físicas podem influenciar na aderência da argamassa, sendo a finura do cimento um dos parâmetros mais significativos; quanto mais fino o cimento maior a aderência obtida (CARASEK et al. 2001).

Adentrando mais na composição do cimento Portland, ISAIA et al. dividem a composição em clínquer e adições, onde:
clínquer: compostos de calcário e argila obtidos através de queima em fornos com temperatura interna de aproximadamente 1450°C. São nódulos de 5 mm a 25mm do material sinterizado.

adições: matérias-primas misturadas ao clínquer na etapa de moagem e, sua variação é o que permite a variação de cimentos Portland disponíveis no mercado.

gesso: presente em teor de aproximadamente 3%; aumenta o tempo de endurecimento do clínquer moído, possibilitando seu uso na construção civil;

escória: derivados da fabricação de ferro-gusa em alto fornos; utilizada para melhorar propriedades como a durabilidade, principalmente em ambientes hostis;

pozolana: rochas vulcânicas, certos tipos de argilas queimadas em elevadas temperaturas e cinzas provenientes da queima de carvão mineral; cimentos com materiais pozalânicos oferecem maior impermeabilidade;

carbonatos: minerais moídos, tais como o calcário; a adição de carbonatos permite uma maior trabalhabilidade do produto.

3.4 Funções das argamassas de revestimento

Segundo o Instituto brasileiro do concreto, revestimentos de argamassa podem ser compreendidos como uma proteção para superfícies, de uma ou mais camadas, apto a receber acabamento decorativo ou ser o acabamento final (CARASEK, 2017). As camadas que constituem o revestimento possuem funções e características distintas. Dentre as principais funções do revestimento, estão:

- proteger a edificação de agentes agressivos;
- auxiliar nos isolamentos térmico e acústico;
- proporcionar um acabamento regular e também contribuir para a estética de fachadas.

Variando as proporções dos constituintes da argamassa e seu emprego no revestimento, variam também os termos utilizados. Chapisco é a camada inicial que tem como finalidade uniformizar a superfície e facilitar a aderência do revestimento. Após a aplicação do chapisco tem-se o emboço, utilizado para cobrir e regularizar a superfície e dar o formato da parede. Em seguida há o reboco, cobrindo o emboço e permitindo o recebimento de uma camada decorativa ou constituindo o acabamento final, corrigindo imperfeições (ABCP, 2009).

Quanto às propriedades desejadas para que argamassas de revestimento tenham bom desempenho podem ser citadas trabalhabilidade, adesão e aderência, plasticidade, resistência mecânica, dentre outras (CARASEK, 2017).

3.4.1 Trabalhabilidade

Segundo Sabbatini (1984), qualitativamente, uma argamassa possui boa trabalhabilidade quando distribui-se facilmente ao ser assentada, não gruda em ferramentas e permanece plástica por tempo suficiente para que seja manuseada e ajustada. O conceito de argamassa pode ser entendido como a maior ou menor facilidade de depositar a argamassa na posição final desejada (RECENA, 2012). Ainda segundo Sabbatini (1984), citando Isberner, a trabalhabilidade é uma propriedade complexa, de avaliação indefinível e pessoal, sendo também uma combinação de outras propriedades, como plasticidade, consistência, adesão e densidade.

Atrelado a estas informações, quantificar valores de trabalhabilidade também é difícil decorrente da sua dependência do profissional que realiza o processo e sua técnica de aplicação (CASCUDO, 2005).

3.4.2 Adesão inicial

Propriedade relacionada à trabalhabilidade e está relacionada com a capacidade da argamassa fresca aderir ao substrato. É esperado que a argamassa, ao ser lançada no substrato, não escorra e permita ser manipulada (CARASEK, 2017). Uma boa adesão inicial favorece a aderência entre os materiais após a secagem e endurecimento.

3.4.3 Plasticidade

Propriedade pela qual as argamassas conseguem manter-se deformadas após a retirada das tensões de deformação, isso em seu estado fresco. Fatores que influenciam a consistência e, por consequência, a plasticidade das argamassas são: relação água/aglomerante, relação aglomerante/areia, granulometria da areia e qualidade do aglomerante (SABBATINI, 1984).

3.4.4 Retenção de água

Capacidade da argamassa fresca de manter a trabalhabilidade mesmo durante solicitações que provocam perda de água seja por evaporação, sucção do substrato ou hidratação do cimento (CARASEK, 2017). A capacidade da argamassa

de reter água também influencia na aderência do material ao substrato, evitando que porções da argamassa desloquem e garantindo homogeneidade da alvenaria (RECENA, 2012).

Bons níveis de retenção indicam que a perda de água pela argamassa será lenta, o que auxilia ganho de resistência mecânica e minimiza a quantidade de fissuras que possam aparecer devido variações bruscas de volume (RECENA, 2012).

3.4.5 Resistência mecânica

Uma questão relacionada à resistência mecânica de argamassas é sua quantificação, o valor a ser obtido e como deve ser feita essa medição. Questões como qual o ensaio, qual técnica a ser aplicada e qual corpo de prova a ser utilizado são recorrentes e a resposta para essas questões estão vinculadas à aplicação prevista para a argamassa junto das solicitações mecânicas também previstas em projeto (RECENA, 2012). Sendo assim, podem-se ser estimados valores para resistência à compressão, flexão, aderência, entre outras propriedades mecânicas. Visando um bom desempenho das argamassas de revestimento, propriedades de resistência mecânica devem ser analisadas com cautela, principalmente as de superfície como resistência de aderência (CARASEK, 2017).

A medida de resistência de aderência é de grande importância quando se trabalha com argamassas uma vez que, se falhar, danos a vidas humanas podem ser provocados devido quedas de pedaços de revestimento. No Brasil a avaliação de resistência de aderência está prevista pela NBR 13528 (ABNT, 1995), podendo ser avaliada em laboratório e em obra. Esse ensaio resulta em valores com coeficientes de variação altos, decorrentes dos fatores que os influenciam (passíveis de variações) como as condições climáticas, tipo de substrato e execução do revestimento. Tratando-se de materiais cerâmicos e, por decorrência, frágeis, a resistência à fratura é extremamente dependente da probabilidade da existência de um defeito que seja capaz de iniciar uma fissura (CARASEK, 2017).

3.5 Dosagem de argamassas

O desempenho adequado das argamassas depende da escolha correta dos seus materiais e sua proporção (LARA et al., 1995). A dosagem de argamassas tem a função de estabelecer as proporções e traços dos materiais que compõem a mistura. Um método de dosagem eficiente é a que visa minimizar defeitos e produz argamassas de maior qualidade e durabilidade, se baseando em conceitos técnico-científicos e bem fundamentados (SANTOS, 2014).

Carneiro (1999) explica que a composição e a dosagem das argamassas utilizadas no Brasil, geralmente, são feitas a partir de traços (massa ou volume) especificados em normas nacionais e internacionais, a Associação Brasileira de Normas Técnicas sendo a responsável no Brasil. É dito ainda que as proporções adotadas são de 1:1:6 ou 1:2:9 (cimento:cal:areia) e 1:3 ou 1:4 (aglomerante:agregado).

Os procedimentos de dosagem de argamassas são diversos e pode-se dizer que passaram por adaptações com intuito de melhorar sua aplicabilidade e melhor se adaptar à realidade das construções. SANTOS (2014), em seu trabalho, faz uma revisão sobre os principais métodos de dosagem. Métodos como os de SELMO (1989), LARA et. al.(1995), CARNEIRO e CINCOTTO (1999) e GOMES e NEVES (2002) são apresentados e debatidos, mostrando seus principais conceitos e formas de funcionamento. Com isso, é perceptível que as técnicas de dosagem ainda possuem divergências e podem ser modificadas para melhor se adequar à normalização atual para as argamassas.

3.6 Hidratação do cimento

O entendimento do mecanismo cinético da hidratação do cimento é de importância tanto para a academia quanto para o meio prático. Do ponto de vista acadêmico, por se tratar de um processo complexo e interdependente, a hidratação do cimento promove desafios significativos relacionados às técnicas experimentais e métodos. Do lado prático, a necessidade de produzir materiais mais sustentáveis resulta em misturas mais complexas, que incluem aumento de adições minerais secundárias, e uma variedade de misturas químicas que pode realçar o desempenho do material cimentício (BULLARD et al., 2011).

A hidratação do cimento envolve um grupo de processos químicos, onde cada um ocorre em taxas determinadas pela natureza do processo e pelo estado do sistema naquele dado instante. Esses processos podem operar em sequência, simultaneamente ou em combinações mais complexas (BULLARD et al., 2011).

Agrupando esses processos em estágios, tem-se:

Dissolução/dissociação: processo que envolve a separação de unidades moleculares da superfície de um sólido em contato com a água.

Difusão: processo onde ocorre o transporte dos componentes através dos poros da pasta cimentícia.

Crescimento: envolve a incorporação de unidades moleculares na estrutura do sólido.

Nucleação: processo que inicia a precipitação de sólidos, quando a força motriz de energia livre para formar o sólido ultrapassa a energia de formar a nova interface sólido-líquido.

Complexação: interação entre íons simples para formar íons complexos.

Adsorção: acumulação de íons ou outras moléculas em uma interface como a superfície de uma partícula sólida.

Quanto à sua composição, os cimentos possuem silicatos, aluminatos e ferro aluminatos como principais constituintes. Silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) e ferro aluminato tetracálcico (C_4AF) são os principais componentes do clínquer e são escritos dessa maneira por questões de praticidade. Cada um desses compostos possui uma função no produto final, após hidratação. Os silicatos estão relacionados com a resistência dos produtos que utilizam o cimento, onde o C_3S é responsável pela resistência em idades iniciais e o C_2S responsável pela resistência em idades mais avançadas; os aluminatos e ferro aluminatos influenciam no tempo de pega (ABCP, 2002).

Com a hidratação do cimento tem-se como resultado os produtos de hidratação que são os responsáveis pelas características que o produto vai obter. Silicato de cálcio hidratado (C-S-H) possui formato irregular, é originado pelos silicatos e responsável pela resistência à aderência; hidróxido de cálcio (C-H ou $Ca(OH)_2$) possui formato hexagonal e tem função de manter o pH alcalino do produto, protegendo-o (ABCP, 2002).

O mecanismo de hidratação do C_3S varia em função do tempo e esse fato levou à divisão do processo em quatro estágios, levando em conta a cinética do

mecanismo: (1) reação inicial, (2) período de reação lenta, (3) período de aceleração e (4) período de desaceleração (BULLARD et al., 2011).

No estágio de reação inicial C_3S reage rapidamente com a água, sendo iniciada imediatamente após o molhamento, e é um processo exotérmico, liberando calor pela dissolução do C_3S . Análises químicas evidenciam que C_3S dissolve rápido e proporcionalmente nos primeiros segundos após a adição de água. Relacionado ao período de reação lenta, Barret et al. propôs uma hipótese na qual uma 'camada superficialmente hidroxilada' se forma na superfície do C_3S que está em contato com a água e a desassociação dos íons presentes nessa camada é mais lenta do que o esperado. O período de crescimento acelerado está associado com o mecanismo de nucleação e crescimento do produto de hidratação (com destaque para o C-S-H), e implica uma dependência da taxa de hidratação na quantidade de produto formado. O período de desaceleração, também compreendido como o período após o pico, é importante, pois favorece o desenvolvimento de resistência de forma mais lenta. É considerado que, em idades mais avançadas, a taxa de hidratação é controlada por difusão, mas existem alguns outros fatores que influenciam como falta de água e a presença de partículas grandes, tendo em vista que as partículas menores reagiram nos primeiros processos (BULLARD et al., 2011).

3.7 Adições minerais em substratos

Até agora foi falado sobre as argamassas, suas propriedades e as possíveis modificações capazes de melhorar sua aderência ao substrato, porém, a outra parte envolvida no processo de aderência é o próprio substrato, superfície onde a argamassa será aplicada. Os substratos são, geralmente, de concreto, que também podem sofrer modificações visando a melhora de suas propriedades e do conjunto final. No Brasil, a fabricação e procedimentos de controle dos concretos são regidos pela ABNT.

A definição dada para adições, de acordo com a literatura encontrada, é de materiais utilizados com objetivo de somar ou substituir parcialmente um constituinte do material cimentício, devido às características similares entre os dois materiais (FONSECA, 2010). Adições minerais vêm sendo utilizadas em cimentos há várias décadas e são estudadas com objetivos bem variados, como aumento na

resistência à compressão do concreto, alterações em propriedades como a trabalhabilidade e redução nos custos de produção. Existe uma grande variedade de adições, logo é necessário que todos os cuidados referentes à adição sejam tomados a fim de proporcionar a melhor combinação de propriedades à estrutura. Em alguns casos, adições que favorecem a resistência mecânica podem provocar uma redução na durabilidade, devido consumo da reserva alcalina (CASCUDO & CARASEK, 2011; RAISDORFER, 2015).

De acordo com suas ações físico-químicas no concreto, as adições minerais podem ser classificadas em: materiais pozolânicos, materiais cimentantes e *filler* (FONSECA, 2010).

Os materiais pozolânicos são definidos como materiais silicosos ou sílico-aluminosos que, fino e na presença de água, reage com hidróxido de cálcio e consegue formar compostos com propriedades cimentantes, diferindo apenas porque o cimento Portland puro libera o hidróxido de cálcio como subproduto, enquanto a atividade pozolânica utiliza esse subproduto para formação de cristais mais resistentes. Quanto à origem, podem ser naturais, possuindo origem vulcânica ou sedimentar; ou sintéticos, sendo provenientes de tratamentos térmicos ou subprodutos industriais com atividade pozolânica. Os materiais cimentantes são capazes de formar compostos cimentantes, como o *C-S-H*, sem a presença de hidróxido de cálcio (HOPPE FILHO, 2008; FONSECA, 2010). O *filler* é um material fino, inerte quimicamente com função de empacotamento, tendo papel como pontos nucleantes para a hidratação (DA MOLIN, 2005).

3.7.1 Adições minerais em concretos

Fonseca (2010) citando Malhotra e Mehta explica que as adições minerais tiveram seu primeiro uso por volta de 1.500 a.C., com a extração de material vulcânico na ilha de Santorini, Grécia. O uso dessas adições minerais derivadas de vulcões foi se difundindo durante o período romano e, posteriormente, outras adições surgiram, como a argila calcinada, suprimindo o mercado onde a cinza vulcânica não estava disponível. As cais hidráulicas, descobertas durante o século XVIII, antecederam a invenção do cimento Portland que, por sua vez, ganhou favoritismo rapidamente devido características como tempo de pega e endurecimento mais rápidos.

No século XIX foi observada a possibilidade de empregar escórias na fabricação do cimento, quando o engenheiro Louis Vicat analisou as semelhanças entre as composições químicas do cimento Portland e da escória. Um ligante hidráulico constituído de cal e escória foi lançado no mercado e sua aceitação ocorreu de forma lenta devido à concorrência do cimento Portland sem adição, considerado um material nobre. O uso da escória apresentou boa economia de combustível, gerando uma redução de 200 Kg de carvão a cada tonelada de clínquer substituído pela escória, além dos benefícios ambientais obtidos, uma vez que é dada utilidade a materiais que a princípio seriam descartados. A maior parte das adições minerais atualmente é proveniente de siderúrgicas e usinas termelétricas, substituindo as pozolanas naturais e argilas calcinadas. (FONSECA, 2010).

As adições minerais podem ser utilizadas com as mais diversas finalidades, modificando várias características do concreto e, dependendo das aplicações, podem ser ou não positivas.

3.7.2 Principais adições minerais

Metacaulim

É classificado como um material sílico-aluminoso, normalmente derivado de argilas caulínicas. Pode ser produzido por reutilização de rejeitos da indústria de papel ou a partir de argilas caulínicas, sendo este último o método mais utilizado. Nos dois casos é necessário calcinar o material para que propriedades pozolânicas sejam atribuídas. As argilas sozinhas não apresentam atividade pozolânica, porém liberam íons hidroxila presentes em sua estrutura quando aquecidas. Depois de aquecidas, até temperaturas inferiores a 900°C, formam um componente quimicamente instável responsável pela atividade pozolânica, a metacaulinita ($Al_2Si_2O_7$). Acima de 900°C são formados compostos estáveis e com atividade pozolânica mínima (RAISDORFER, 2015).

A quantidade de óxido de ferro presente no metacaulim influencia na sua cor e também em características como a reatividade; mais branco o metacaulim maior a quantidade de sílica presente e, conseqüentemente, maior a reatividade. (MEDINA, 2011; RAISDORFER, 2015;).

Sílica ativa

É um subproduto de indústrias de ligas metálicas que utilizam sílica em sua composição. Durante o processo, a temperaturas acima de 2.000°C, é liberado SiO₂ em estado gasoso que, em contato com temperaturas mais baixas, solidifica e fica na forma de pó. As características da sílica ativa estão relacionadas com a composição do material que estava no forno, temperatura de queima e tipo do forno. A sílica ativa é muito fina e suas partículas são esferas quase perfeitas e tem sido utilizada com intuito de aumentar a resistência mecânica e a compacidade dos concretos. Devido sua finura ocorre efeito *filler*, podendo melhorar o fator de empacotamento de partículas, reduzindo a porosidade local, e também ocorre efeito pozolânico, cristais de C-S-H são produzidos favorecendo a resistência e diminuindo a porosidade. As reações pozolânicas ocorrem principalmente nas superfícies externas resultando em partículas amorfas no centro, circundadas por regiões cristalinas (ROMANO et al., 2008; DALMOLIN, 2011; RAISDORFER, 2015; NEZERKA et al., 2019).

Filler quartzoso

Conhecido também como pó de quartzo, possui diâmetros que variam entre 5 e 25 µm e, normalmente, é destinado à confecção de tintas, plásticos e borrachas. É considerado inerte por não apresentar atividade química e, na construção civil, é adicionado a cimentos reativos ajudando a preencher vazios existentes entre grãos, contribuindo com o empacotamento das partículas. Também contribui acelerando o processo de hidratação do concreto nas suas primeiras idades, uma vez que as pequenas partículas do *filler* ficam em volta dos grãos de cimento e deixa a camada de hidratos mais fina e espalhada facilitando a hidratação (LAWRENCE et al., 2003; DALMOLIN, 2011; RAISDORFER, 2015).

Resíduo de vidro

O vidro é um material muito utilizado, com diversas aplicações e, em decorrência dessa vasta utilização, é responsável pela geração de um número significativo de resíduos. Possui características favoráveis para seu uso como substituto em materiais cimentícios devido sua composição possibilitar o desenvolvimento de atividade pozolânica, sendo constituído majoritariamente por sílica amorfa. Para ser incorporado o vidro passa por tratamento e é moído para

obter a granulometria compatível com a granulometria do agregado que está substituindo. Uma produção mais sustentável é o desejo e desafio de várias áreas, inclusive da construção civil, e a incorporação de resíduos de vidro é uma saída viável tanto pela disponibilidade de material quanto pelo custo adicional do processo (FRAGATA, 2007).

Resíduo de construção civil

A construção civil se destaca pelo desperdício de materiais e geração de resíduos, materiais esses que possuem potencial para serem reutilizados, e sua reciclagem resultam em economia de custos, consumo de matérias-primas e energia para o setor de construção civil. Por ser constituído por materiais já presentes e comuns à argamassas e concretos, resíduos de construção possuem características interessantes para aplicação como substituto em materiais cimentícios (MENEZES, 2009).

Estudos recentes mostram a versatilidade dos compostos de concreto com adições minerais. Nezerka *et al.* (2019) analisaram o impacto das adições minerais metacaulim, sílica ativa e cinza volante na espessura e resistência da zona de transição interfacial (ZTI) em concretos, ZTI que possui grande influência na performance estrutural do concreto. A amostragem foi feita com percentuais de 10%, 20% e 30% para cada uma das adições, os resultados mostram que a sílica ativa se mostrou mais eficiente na redução da espessura da ZTI em relação à cinza volante e o metacaulim, enquanto a cinza volante promoveu um aumento na resistência mais significativo entre os três materiais. De acordo com os resultados, uma substituição de cimento Portland por 10-20% de sílica ativa ou cinza volante é apropriada para aperfeiçoar resistência e durabilidade do concreto. Para o metacaulim essa porcentagem ficou em 10%, maiores porcentagens não se mostraram eficientes. Em seu estudo, Li *et al.* (2021) investigaram o efeito da adição mineral na aprimoração do método de mistura para concretos autocompactantes. As adições minerais utilizadas foram cinza volante e pó de calcário e foram analisadas suas influências na trabalhabilidade do concreto autocompactante e também a melhora nos processos de mistura, atuando como *fillers* e proporcionando maior empacotamento na estrutura do concreto. Foi constatado que as adições influenciaram positivamente no que foi previsto, com melhora de cerca de 78%

comparado com o método original. Cascudo *et al.* (2021) avaliaram a solução de poros utilizando o método de lixiviação *ex situ* de uma grande variedade de concretos com adições minerais, submetidos a uma carbonatação natural por 14 anos de exposição em um típico ambiente urbano. Misturas com sílica ativa, metacaulim foram produzidas cinzas de casca de arroz, cinzas volantes e escória de alto forno, com o objetivo de gerar diferentes parâmetros químicos relacionados com a solução de poros. Os resultados indicam que as menores profundidades carbonáticas foram obtidas nos concretos com metacaulim e referência; em contraste, os concretos com a maior espessura carbonatada foram aqueles feitos com cinzas volantes e escória de alto forno.

Em seu trabalho de 2020, Andrade analisou a ação de adições minerais no grau de carbonatação de concretos. O estudo leva em consideração a capacidade dos concretos de absorver CO_2 através da carbonatação da pasta cimentícia, contribuindo para a diminuição das emissões de CO_2 no ar. Estes concretos, com diferentes formulações e, como e sem adições minerais (cinzas voláteis, materiais pozolânicos e escória de alto forno granulada, do inglês GGBS), foram expostos a três ambientes distintos, sendo ambiente fechado, ambiente aberto sem proteção e um ambiente aberto com proteção para possíveis intempéries. No geral, a taxa de carbonatação aumenta com a implementação de adições minerais, em especial GGBS. As maiores taxas de carbonatação foram encontradas nas amostras que estavam em ambiente externo e com proteção e as menores taxas foram encontradas nas amostras que estavam em ambiente interno, fato explicado pela baixa umidade do local em comparação ao exterior. As amostras protegidas aparentam ter maior umidade relativa, o que gera melhor grau de carbonatação quando comparado às amostras em ambiente externo desprotegidas. Por fim, foi explicado que os cimentos que obtiveram maior grau de carbonatação tinham maiores proporções de CO_2 .

Oksri-Nelfia *et al.*, em 2016, pesquisaram sobre a utilização de finos de concreto triturados como adição mineral e substitutos em materiais cimentícios. A intenção é reutilizar materiais de construções e demolições que normalmente seriam descartados como lixo. Algumas soluções já haviam sido sugeridas como o uso como substituto da areia natural, porém a elevada capacidade de absorver água se tornou uma problemática. Quanto às propriedades físicas tem-se que a densidade obtida com a adição do reciclado foi similar à densidade do concreto sem adições.

Foi observado que os finos possuem maior área específica do que o *filler* de *limestone* e o concreto sem adição. Isso se deve ao processo de preparação dos finos reciclados. Possuem também uma boa distribuição no tamanho das partículas, podendo ter resultado do processo de britagem contribuindo para diferentes tamanhos e formatos de grão. No geral, os autores concluíram que os concretos com adição de finos reciclados como adições minerais obtiveram propriedades similares aos concretos com *filler limestone*, ou seja, aceleram e melhoram a hidratação do cimento. Algumas conclusões mais particulares foram que a resistência compressiva de argamassas com adição de finos reciclados foi igual à resistência de argamassas com *limestone* e que, em idades iniciais, os coeficientes de atividade são maiores comparados aos do *filler limestone*, principalmente para cimentos com substituição de 25%.

Pesquisadores de Minas Gerais estudaram a substituição em percentuais de peso de cimento por cinzas de casca de arroz (CCA), visando atribuir maior sustentabilidade ao material produzido. A cinza de casca de arroz pode apresentar altas porcentagens de sílica reativa ou amorfa após ser feita a queima controlada e é comumente utilizada em argamassas e concretos devido sua capacidade de apresentar propriedade pozolânica, sendo capaz de atribuir nobreza ao produto final. Caracterizações como ensaios de DRX, granulometria a laser e perda ao fogo mostraram a presença de sílica em estado cristalino (pouco amórfica) e que a cinza de casca de arroz analisada tem propriedades pozolânicas moderadas. A CCA também possui superfície específica e granulometria maiores comparadas com o cimento, necessitando de processos como moagem e adição de superplastificantes para serem bem aproveitados. Apesar do seu grande potencial, essas características mostram que CCA não se adequa para a substituição do cimento, sua estrutura é formada por grande parte cristalina que prejudica a atividade pozolânica e, além disso, a elevada área superficial pode resultar em perda de trabalhabilidade, necessitando de etapas adicionais de moagem para melhores resultados (SANTOS *et al.*, 2019).

Fernandes *et al.*, (2020) compararam propriedades mecânicas de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral do concreto convencional produzido na região do Amazonas e concretos produzidos com adição de microsílica e aditivo superplastificante. As análises foram feitas para as idades de 7, 14, 21, 28 e 90 dias e, através dos ensaios mecânicos, foi percebido que a adição

simultânea de superplastificante e microsílca aumentou significativamente a resistência e também pode aumentar o módulo de elasticidade e a durabilidade do material. As adições proporcionaram redução no tamanho dos poros, melhorando a interface da matriz com os agregados, e uma redução considerável na água de hidratação. O ar aprisionado e o tamanho dos poros são reduzidos e forma-se uma microestrutura mais densa no estado sólido.

3.8 Mecanismos de adesão

A adesão pode ser entendida como a capacidade de umectação e afinidade de um material adesivo ou selante a um ou mais substratos. A força de adesão se baseia nas forças de atração entre as moléculas do adesivo ou selante e das superfícies. A adesão da camada de argamassa sobre o concreto ou sobre outra camada de argamassa existente tornou-se um conhecimento primordial para a área da construção civil, visto a quantidade de problemas ocasionados quando as camadas descolam (Iliescu, 2016).

Existem mecanismos que explicam a adesão entre dois corpos, dentre eles, o mecanismo por adsorção, considerando que a adesão resulta de contato intermolecular entre os materiais e envolvendo forças superficiais dos átomos presentes. As forças mais comuns são *van der Waals*, pontes de hidrogênio e interações ácido-base. A adsorção é considerada a teoria mais importante no mecanismo de adesão. Tem-se também o mecanismo de adesão mecânica, que considera que a adesão resulta da penetração do material adesivo nos poros ou quaisquer outras irregularidades do substrato. O mecanismo da adesão química atribui a adesão a uma reação química impossível de ser desfeita sem causar danos. Quanto à resistência de colagem do material adesivo, propriedades como a adesão do adesivo ao substrato, coesão do material adesivo e coesão do substrato (resistência interna do material, resultado das forças intramoleculares) influenciam nos resultados obtidos. Quando o substrato utilizado é o concreto, fatores como o teor de alcalinidade, o estado da superfície do substrato e a umidade influenciam na adesão entre o material alcalino e o substrato (Iliescu, 2016).

3.9 Resíduos sólidos

O interesse e a preocupação da sociedade atual acerca de assuntos relacionados à preservação do meio ambiente são crescentes em todo o mundo (CARTAXO et al., 2018; SILVA; DAMO, 2014), devido às atividades humanas que provocam degradação ambiental em larga escala. No tocante à questão dos resíduos sólidos, a grande preocupação deve-se ao enorme volume e à disposição inadequada de resíduos gerados diariamente no planeta (SANTOS et al., 2021).

Quanto aos resíduos sólidos, os grandes centros urbanos são grandes geradores, tanto em quantidade quanto em diversidade, devido ao desenvolvimento econômico, ao crescimento populacional, a urbanização e a revolução tecnológica, que alteram o estilo de vida e os modos de produção e consumo da população (GOUVEIA, 2012). Quando os resíduos são descartados de forma inadequada, contribuem para gerar vários impactos ambientais e afetam a qualidade do meio ambiente (SANTOS, SAMPAIO, VILAS BOAS, 2021; CARDOSO et al., 2018).

Segundo Vieira e Beltrame (2019), a disposição inadequada de resíduos sólidos é um problema antigo, e ao mesmo tempo atual, e atinge muitos municípios brasileiros, agravado pelo crescimento populacional nos centros urbanos, falta de educação ambiental da população e ausência de planejamento das cidades. A procura por soluções para os problemas socioambientais gerados pelo acúmulo, destino e falta de tratamento adequado dos resíduos sólidos tem despertado discussões, mobilizações e intensa busca por alternativas que visem o equilíbrio sustentável do meio ambiente. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/10 (BRASIL, 2010), é um marco regulatório que norteia a questão dos resíduos sólidos no Brasil dispendo diretrizes referentes à gestão integrada e ao gerenciamento dos mesmos. Além disso, orienta inúmeros aspectos desta cadeia, que vão desde a correta destinação até a responsabilização dos geradores de resíduos (LIMA, CARDOSO, 2018).

3.9.1 Resíduo de vidro

Percebe-se que o número de pesquisas investigando a viabilidade do uso de resíduos de vidro em substituição ao agregado miúdo natural vem aumentando nos últimos anos (Khan *et al.*, 2020; Paul *et al.*, 2018). Desde os tempos antigos, os seres humanos têm usado o vidro em várias indústrias e este está presente em nosso dia a dia de diversas formas. Garrafas, recipientes, janelas e lâmpadas são alguns exemplos dos tantos que podem ser citados (Sharifi *et al.*, 2016; Idir *et al.*, 2010). Este grande volume da produção de vidro também aumentou a quantidade de resíduos de vidro e, apesar de ser 100% reciclável, boa parte do vidro vai parar em aterros sanitários ou lixões. Isso ocorre porque as indústrias de reciclagem de resíduos de vidro não podem reciclar todos os tipos de resíduos devido à grande variação do ponto de fusão, bem como ao alto custo de reciclagem (Soliman e Tagnit-Hamou, 2017; Sharifi *et al.*, 2015; Ali e Al-Tersawy, 2012).

Resíduos de vidro são amplamente utilizados na produção de concreto, asfalto, enchimentos, blocos de construção, telhas, pedras artificiais e vitrocerâmicas (Wang e Wang, 2017). Os resíduos de vidro têm sido usados como um dos materiais mais ideais para substituir agregados devido à sua estrutura física e química especial (Tan e Du, 2013; Nassar *et al.*, 2012; Nassar e Soroushian, 2012; Disfani *et al.*, 2011; Loryuenyong *et al.*, 2009; Meyer, 2009; Taha e Nounu, 2008; Shi e Zheng, 2007; Park *et al.*, 2004). Pesquisas atuais indicam que o resíduo de vidro pode ser considerado um adequado material de construção devido a características como seu tamanho flexível, forma, composição química e ampla disponibilidade quando comparado com outros materiais cimentícios sustentáveis (Metha e Ashish, 2019; Jiang *et al.*, 2019; Paul *et al.*, 2018).

Shi e Zheng (2007) avaliaram três possíveis usos de resíduos de vidro como matéria-prima para produção de cimento, sendo elas substituição parcial de cimento e substituição parcial ou total do agregado. Os autores concluíram que os resíduos de vidro podem ser utilizados como matéria-prima para produção de materiais cimentícios em uma porcentagem muito baixa, o cimento pode ser substituído por pó de vidro até 50% ou mais sem qualquer efeito negativo e o ao utilizar o resíduo de vidro como agregado deve-se considerar a possibilidade de patologias

relacionadas a expansão causada pela de reação de álcali-sílica (RAS). Apesar disto, Rashad (2014) em estudo com substituição parcial e total do agregado miúdo pelo resíduo de vidro, verificou que o uso de resíduos de vidro como agregado miúdo pode melhorar algumas propriedades significativamente. De acordo com o autor a expansão causada pela RAS em concretos e argamassas pode ser minimizado usando materiais cimentícios complementares, como metacaulim, cinzas volantes e compostos de lítio ou níquel como Ni_2CO_3 e $LiNO_3$ (Khan *et al.*, 2020).

O vidro é um material amplamente utilizado em bebidas, embalagens, objetos de decoração, edificações entre outras aplicações e possui um grande potencial de reciclabilidade. O estudo da aplicação do vidro em substituição de agregados naturais como em concreto e argamassas pode ser uma alternativa viável para promover a economia circular sustentável e reduzir o uso de recursos naturais e energéticos. No geral, analisando pesquisas anteriores, o resíduo de vidro pode ter enorme potencial para ser utilizado como substituição de areia natural na preparação de materiais cimentícios. No entanto, os resultados existentes ainda não são suficientes para concluir a eficácia do resíduo de vidro como agregado, e é necessário avaliar algumas propriedades importantes como absorção, porosidade e retração por secagem para o uso definitivo de resíduos de vidro.

Segundo a Resolução nº 307/2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), o vidro é classificado como Classe B – materiais que podem ser recicláveis, por exemplo, plásticos, papéis, metais, vidros. E conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004) como Classe II B, pois é um material inerte por não ser inflamável ou corrosivo. A quantidade de vidro recolhida em 2017 foi 10.015 toneladas e em 2018 foi 6.738 toneladas pelas cooperativas e associações de catadores (ABRELPE, 2019).

Os materiais vítreos ao reduzir a temperatura, tornam-se mais viscosos e, com isso, vai endurecendo sem acontecer a cristalização. O volume específico, que é o inverso da densidade, diminui continuamente em relação à diminuição da temperatura. No momento do decrescimento da temperatura, a curva de transição vítrea apresenta uma pequena queda na inclinação e abaixo dessa temperatura que o produto é considerado como vidro (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

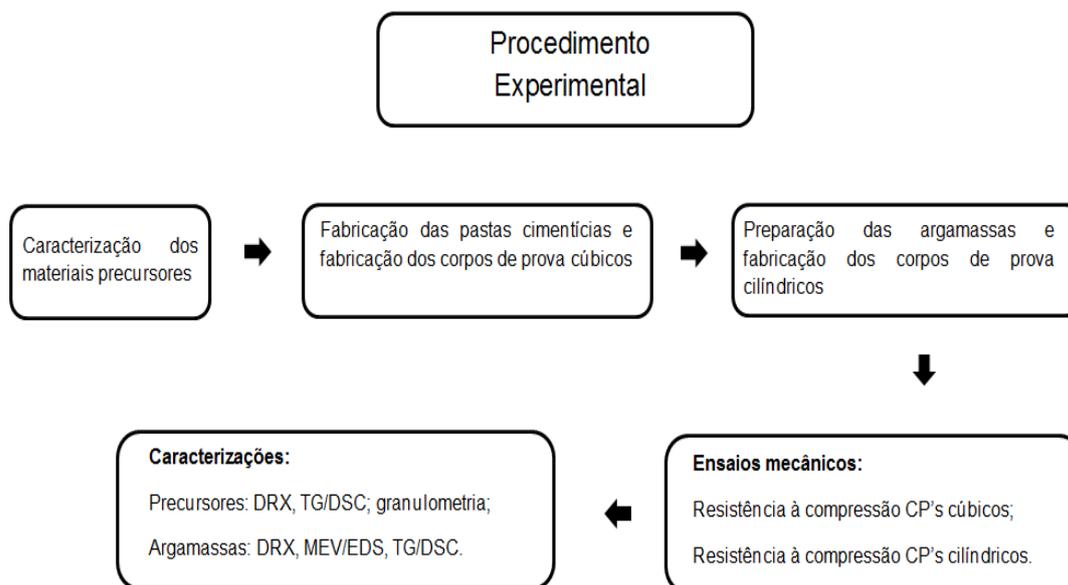
Os vidros mais comuns são silicatos; vidro comum de janela é composto por, aproximadamente, 72% em peso de sílica amorfa (SiO_2), e o resto do material contém, particularmente, óxido de sódio (Na_2O) e óxido de cálcio (CaO). Os vidros partilham a especificidade da fragilidade das cerâmicas cristalinas (SHACKELFORD, 2008). Conforme a Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos (ABRAVIDRO, 2017), a destinação adequada para o descarte do vidro é o aterro industrial.

Um exemplo de reutilização total do vidro é o caso de uma sucata em Campina Grande – PB que possui como principais funções a triagem e organização dos resíduos. Entre os recebidos estão vasilhas de cachaça, com cerca de 80 mil unidades/ano. Somente garrafas intactas não são enviadas para a reciclagem, pois são destinadas à reutilização para servir de embalagem, devolvendo-o para as atividades logísticas (POLICARPO; FARIAS, 2018).

4 METODOLOGIA

A seguir é apresentado o fluxograma das etapas propostas/realizadas ao longo da execução deste trabalho de dissertação.

Figura 1 - Fluxograma das atividades propostas para o procedimento experimental do projeto.



Fonte: Autor (2022)

4.1 Características dos materiais utilizados

Os materiais utilizados foram ensaiados no Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais (INTM/UFPE), sendo algumas especificações fornecidas pelos próprios fabricantes.

4.1.1 Aglomerante

O cimento utilizado foi o CP II Z 32, da marca Poty.

4.1.2 Plastificante

Foi utilizado o plastificante para argamassa da marca Bom Mix.

4.1.3 Agregado natural

Foi utilizado como agregado miúdo a areia.

4.1.4 Agregado reciclado

O agregado reciclado utilizado foi o resíduo de vidro. O resíduo de vidro substituiu parcialmente a areia, nas concentrações de 10%, 20% e 30%. As análises feitas nos agregados foram desenvolvidas no laboratório de engenharia molecular e de materiais e no laboratório de análises térmicas, ambos presentes no INTM.

4.2 Beneficiamento do agregado reciclado

4.2.1 Areia

A areia utilizada na pesquisa foi obtida através de fornecedor local, uma casa de construção localizada na Cidade Universitária, Várzea, Recife. A areia possui granulometria grossa, tendo tamanhos de grãos de 1,2 a 2,0 mm.

4.2.2 Resíduo de vidro

O resíduo de vidro (RV) utilizado na pesquisa foi derivado de garrafas do tipo *long neck*. O vidro foi recebido já moído, sendo feito ensaio granulométrico antes de ser aplicado nas argamassas. O resíduo de vidro foi passado pelas peneiras de aberturas 4,75mm, 2,36mm, 1,18mm e 0,6mm (malhas #4, #8, #16 e #30 respectivamente), para análise granulométrica. O RV utilizado foi o passante na peneira de #8, tendo granulometria similar ao da areia.

4.2.3 Estudo da granulometria do resíduo de vidro

De acordo com a NBR 6508, o ensaio de granulometria é o processo utilizado para a determinação da porcentagem em peso que cada faixa especificada de tamanho de partículas representa na massa total ensaiada. Através dos resultados obtidos através deste ensaio é possível a construção da curva de distribuição granulométrica, tão importante para a classificação dos solos bem como a estimativa de parâmetros para filtros, bases estabilizadas, permeabilidade,

capilaridade etc. A determinação da granulometria de um solo pode ser feita apenas por peneiramento ou por peneiramento e sedimentação, se necessário (ABNT, 2014). No presente trabalho, a determinação da granulometria foi realizada apenas por peneiramento.

4.3 Procedimentos Experimentais

Houve um estudo sobre argamassas de revestimento e decisões foram tomadas com relação à quais proporções utilizar, os materiais que comporiam a argamassa, o resíduo a ser utilizado e quais concentrações deste resíduo adotar. Após tomadas as decisões, o processo de fabricação da argamassa e corpos de prova foi iniciado.

4.3.1 Planejamento das proporções das argamassas

Os procedimentos experimentais apresentados nessa dissertação tiveram início com a definição do resíduo que viria a substituir a areia na mistura final, ficando decidida a fabricação de argamassas, com resíduo de vidro (RV) como substituto, em diferentes quantidades.

Foram dosadas 3 proporções distintas para cada um dos tipos de argamassa, partindo da argamassa de traço 1:0,5:4,5 (cimento:cal:areia), em que a areia foi substituída nas seguintes quantidades pelo resíduo de vidro: 10%, 20% e 30%. Assim, a tabela abaixo apresenta as proporções dos materiais utilizados na fabricação das argamassas estudadas.

Tabela 1 - Dosagens das argamassas estudadas no procedimento experimental.

Argamassa	Proporção
Referência	(1:0,5:4,5) cimento:cal:areia - Referência (REF)
1	(1:0,5:4,05:0,45) cimento:cal:areia:resíduo de vidro
2	(1:0,5:3,6:0,9) cimento:cal:areia:resíduo de vidro
3	(1:0,5:3,15:1,35) cimento:cal:areia:resíduo de vidro

Fonte: A autora (2022).

4.3.2 Tratamento e limpeza dos resíduos

Resíduo de vidro foi o adotado para ser estudado neste trabalho. O vidro utilizado na pesquisa foi obtido através de parceria com de Fernando de Noronha, através do Programa de Extensão Tecnológica para Governo (PET-GOV) sendo recebido já moído. Inicialmente houve o beneficiamento do vidro, o qual foi quebrado manualmente com o auxílio de martelos e soquetes, depois foi moído em moinho de bolas até atingir a granulometria de resíduo. O resíduo de vidro foi limpo e tratado em laboratório. A limpeza dos resíduos de vidro se deu por meio de lavagem com detergente neutro e água corrente, visando evitar agressões e deteriorações na superfície do vidro, e secos naturalmente. Partes contendo rótulos foram retiradas do montante para não influenciarem nas propriedades. Foi feito, então, ensaio granulométrico com o vidro moído e, por fim, aplicado nas argamassas.

4.4 Estudo inicial para análise comportamental dos componentes

É conhecido que as adições influenciam nas propriedades dos materiais, o estudo inicial em questão foi pensado devido a necessidade de compreender como se comportam o cimento e a água antes da adição dos demais componentes, durante a fabricação da argamassa.

4.4.1 Preparação de pastas cimentícias

Inicialmente foram preparadas pastas cimentícias com diferentes relações água/cimento para análise microestrutural e comportamental desses componentes. As razões água/cimento utilizadas foram 0,40 e 0,50.

Figura 2 - Discos de pasta cimentícia com relações água/cimento 0,40 (esquerda) e 0,50(direita).

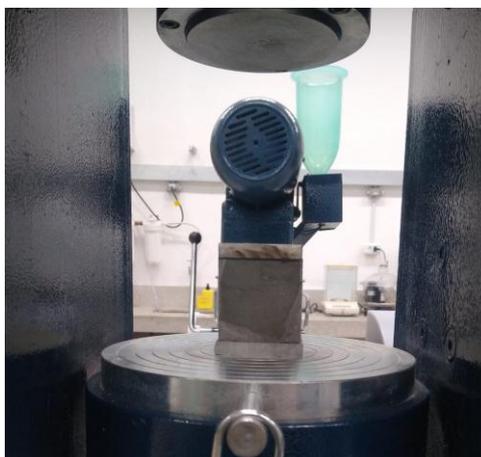


Fonte: A autora (2022).

4.4.2 Preparação de corpos de prova de cimento e água

Foram confeccionados 6 corpos de prova cúbicos, de medidas 20mm x 20mm, com os mesmos componentes das pastas cimentícias, cimento e água, contendo 50% de água em relação ao cimento. A relação água/cimento de 0,50 foi adotada entre as duas relações pensadas inicialmente visando melhor trabalhabilidade da massa. O intuito da fabricação desses corpos de prova foi analisar o comportamento mecânico dos componentes e sua resistência à compressão.

Figura 3 - Corpo de prova cúbico, composto por água e cimento, posicionado na prensa para ser submetido à compressão.



Fonte: A autora (2022).

4.4.3 Preparação de corpos de prova de argamassa

Os corpos de prova (CPs) de referência foram preparados com as seguintes quantidades de materiais, em peso: 0,711 Kg de cimento, 2,132 Kg de areia e 0,341 Kg de água. Foram fabricados 7 CPs. A argamassa com substituição de areia por resíduo de vidro preparada inicialmente possui concentração de 20% de resíduo em relação à areia. As quantidades, em peso, de material utilizadas para a fabricação de 7 CPs com resíduo de vidro foi de: 0,5 Kg de cimento, 1,200 Kg de areia, 0,3 Kg de resíduo de vidro e 0,24 Kg de água.

As argamassas obedeceram a proporção de 1:3 (cimento:agregado) e a relação água/cimento de 0,50, adotada previamente.

Figura 4 - Corpos de prova cilíndricos, com dimensões 50mm x 100mm, da argamassa de referência (esquerda) e argamassa com 20% de resíduo de vidro (direita).



Fonte: A autora (2022).

4.5 Preparação das argamassas para confecção dos CPs

Para o estudo da influência da substituição do agregado miúdo por resíduo de vidro foram fabricados 12 corpos de prova para cada proporção de resíduo adotada, bem como para a argamassa de referência, sem resíduo.

A fabricação dos corpos de prova foi feita em duplicata, ou seja, um total de 24 CP's para cada proporção, pois tinha-se como intuito romper os corpos de prova em duas idades distintas, 7 e 28 dias.

4.5.1 Argamassa de referência

As argamassas de referência, com proporção 1:0,5:4,5 (cimento:cal:areia) e relação água/cimento igual a 1,3, foram preparadas a partir da mistura de 0,745 Kg de cimento, 0,373 Kg de cal, 3,342 Kg de areia fina e 0,964 Kg de água. Após a pesagem os materiais foram adicionados na argamassadeira na seguinte ordem: 1) cimento, 2) cal, 3) água e 4) areia.

4.5.2 Argamassas com resíduo de vidro

As argamassas contendo resíduo de vidro foram preparadas seguindo o traço: 1:0,5:4,5-X:X, onde X variou de acordo com a porcentagem desejada para substituição. Adotando essa lógica, as argamassas foram preparadas com as seguintes misturas:

1:0,5:4,05:0,45 = 0,745 Kg de cimento, 0,373 Kg de cal, 3,007 Kg de areia, 0,334 Kg de resíduo de vidro e 0,964 Kg de água.

1:0,5:3,6:0,9 = 0,745 Kg de cimento, 0,373 Kg de cal, 2,673 Kg de areia, 0,668 Kg de resíduo de vidro e 0,964 Kg de água.

1:0,5:3,15:1,35 = 0,745 Kg de cimento, 0,373 Kg de cal, 2,339 Kg de areia, 1,002 Kg de resíduo de vidro e 0,964 Kg de água.

Tabela 2 - Quantidade, em peso, dos materiais utilizados na confecção de corpos de prova cilíndricos, resultando em 24 CPs para cada tipo de argamassa.

Argamassa	Cimento (Kg)	Cal (Kg)	Areia (Kg)	Vidro (Kg)	Água (Kg)
REF - 1:0,5:4,5	1,49	0,746	6,684	0	1,928
1 - 1:0,5:4,05:0,45	1,49	0,746	6,014	0,668	1,928
2 - 1:0,5:3,6:0,9	1,49	0,746	5,346	1,336	1,928
3 - 1:0,5:3,15:1,35	1,49	0,746	4,678	2,004	1,928

Fonte: A autora (2022).

Depois de fabricados, os corpos de prova permaneceram moldados por 24 horas, logo após esse período os CPs foram desmoldados e submetidos à cura úmida até o dia do rompimento.

4.5.3 Procedimento de cura

Os corpos de prova foram moldados e, após 24 horas, foram desmoldados e armazenados em recipientes contendo água para serem submetidos à cura úmida. Esse processo tem por finalidade evitar a perda de água precoce e os efeitos que essa evaporação prematura pode causar como, por exemplo, fissuras, e trincas e garantir que a hidratação do cimento ocorra de forma correta.

4.6 Caracterizações

Tanto os componentes da argamassa quanto os produtos finais foram submetidos a caracterizações para que fosse possível o entendimento de propriedades de interesse, da microestrutura do material, além do comportamento do material quando submetido a determinadas condições como, por exemplo, altas temperaturas.

4.6.1 Termogravimetria e termogravimetria derivada

O ensaio de TG foi realizado utilizando o equipamento STA 449 F3 da marca Netzsch. Foram submetidas ao ensaio as amostras da argamassa de referência e as amostras com 30% de vidro incorporado, além da cal utilizada. Foram submetidos aos seguintes parâmetros: i) faixa de temperatura de 25°C a 900°C, ii) taxa de aquecimento de 15° K/min.

4.6.2 Calorimetria exploratória diferencial (DSC)

O ensaio de DSC foi realizado utilizando o equipamento STA 449 F3 da marca Netzsch. Foram submetidas ao ensaio amostras da argamassa de referência e com 30% de vidro incorporado, além da cal utilizada utilizando os seguintes

parâmetros: i) faixa de temperatura de 25°C a 900°C, ii) taxa de aquecimento de 15° K/min

4.6.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV e MEV/EDS)

A microestrutura foi analisada com o equipamento da marca Tescan, modelo MIRA 3, conectado a um analisador de raios X por dispersão de energia (EDS), filamento FEG e detector de elétrons secundários. Foram realizadas análises de MEV na argamassa de referência e nas argamassas com 20% e 30% substituição do resíduo pelo agregado.

4.6.4 Difração de Raios-X (DRX)

O equipamento utilizado foi o modelo XRD-7000 da fabricante Shimadzu. Foram realizadas análises de DRX na cal utilizada, na argamassa de referência, na argamassa com 30% substituição do resíduo pelo agregado. O intervalo de angulação utilizado foi de 5° a 90° de acordo com o material conhecido na amostra, utilizando uma velocidade de varredura de 2 °/s e tensão de aceleração de 40 kV e corrente de 30 mA.

4.6.5 Determinação da resistência à compressão

Os ensaios para determinação da resistência à compressão das argamassas atenderam os critérios da NBR 7215 (ABNT, 2019) sendo realizado em corpos de prova cilíndricos de 5mm de diâmetro e 10 mm de altura. Foram fabricados 12 corpos de prova da argamassa de referência e 12 corpos de prova para cada concentração do resíduo. As argamassas, seguindo as proporções previamente definidas, foram preparadas no misturador mecânico e compactadas manualmente nos moldes. Após um período de 24 horas os corpos de prova foram desmoldados e submersos em água para cura até a data da realização da ruptura.

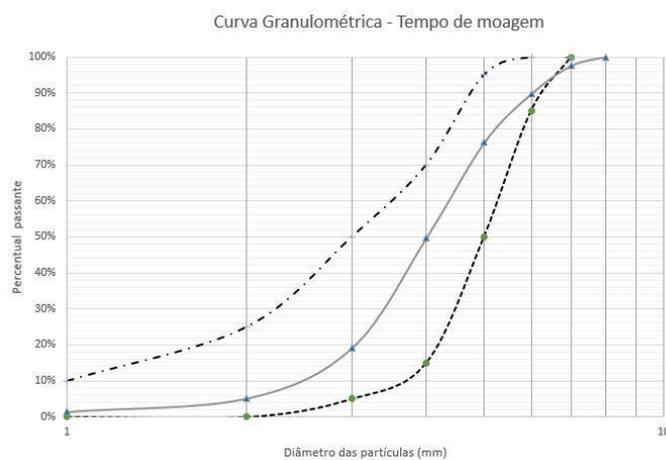
O rompimento dos corpos de prova foi realizado com o auxílio de uma prensa manual para ensaios em argamassas - 20 toneladas da ENGETOTUS.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Granulometria

O resíduo de vidro foi submetido ao ensaio de granulometria, onde foi passado pelas peneiras de 4,8mm até 0,075mm. O gráfico resultante é mostrado abaixo na figura 5.

Figura 5 - Curva granulométrica do resíduo de vidro, diâmetro das partículas versus percentual passante.



Fonte: A autora (2022).

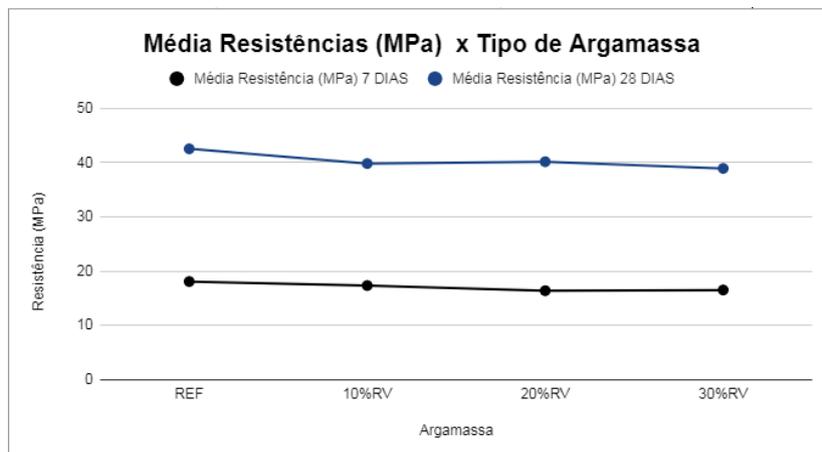
A curva granulométrica do resíduo de vidro é representada pela curva central. As curvas superior e inferior são da norma, representando a zona utilizável. Dessa forma, nota-se que a granulometria do resíduo de vidro encontra-se dentro da faixa permitida para utilização como agregado miúdo, sendo considerada adequada para uso. Esse fato, juntamente com demais características do vidro como composição química, majoritariamente composto por sílica, tamanho flexível e disponibilidade, fazem o resíduo de vidro se destacar entre as pesquisas como um substituto de agregado miúdo.

5.2 Resistência à compressão

Foi realizado o rompimento dos corpos de prova, com 7 e 28 dias de cura úmida, e os resultados de resistência à compressão estão sendo apresentados na figura 1. A partir desses dados a média e desvio padrão de cada traço de argamassa foram medidos para auxiliar na análise geral dos resultados. A seguir

também é apresentada a tabela com os valores obtidos, para um melhor entendimento.

Figura 6 - Médias das resistências à compressão dos CP's com 7 e 28 dias de cura, respectivamente.



Fonte: A autora (2022).

Tabela 3 - Média dos valores, em MPa, das resistências à compressão dos CP's rompidos com 7 e 28 dias de cura.

Argamassa	Resistência - 7 dias (MPa)	Resistência - 28 dias (MPa)
Referência	18,09	42,53
10%RV	17,35	39,83
20%RV	16,40	40,16
30%RV	16,53	38,93

Fonte: A autora (2022).

Analisando os resultados obtidos percebe-se que a argamassa de referência obteve os maiores valores de resistência à compressão tanto com 7 quanto com 28 dias de cura úmida, obtendo os melhores resultados. Para ambas as condições de rompimento, 7 e 28 dias de cura, as argamassas de referência obtiveram os maiores valores de resistência à compressão. No rompimento após 7 dias de cura, a segunda melhor média foi obtida pela argamassa com 10% de resíduo de vidro. Já com relação às argamassas rompidas após 28 dias de cura, a segunda melhor média de resistência foi obtida pela argamassa com 20% de resíduo de vidro.

Em seu estudo de 2018, Ortega *et al.*, substituíram o cimento utilizado na fabricação de argamassas por resíduo de vidro em pó, nas concentrações de 10% e 20%. Constataram que a resistência à compressão de todas as argamassas aumentou com o aumento da idade dos corpos de prova. Em idades iniciais - até 30 dias - a argamassa de referência apresentou os maiores valores para resistência à compressão e, com o passar do tempo, as argamassas com resíduo de vidro foram apresentando melhores resultados. Os autores justificam esse comportamento com um *delay* da atividade pozolânica do resíduo de vidro, promovendo um aumento nas resistências apenas em idades avançadas. Ortega *et al.*, ainda relacionam o aumento da resistência à compressão com substituições de 10% e 20% com um refinamento na porosidade das argamassas provocado pelo resíduo de vidro em pó.

Sikora *et al.*, 2016, substituíram a areia por resíduo de vidro nas concentrações de 25, 50, 75 e 100%. No ensaio realizado com 2 dias de cura, a resistência das argamassas com teor de resíduo de vidro apresentou valores inferiores ao da referência. Já a partir de 7 dias de cura as resistências das argamassas com resíduo de vidro começaram a ter aumento. Comparando os resultados dos ensaios feitos com 2, 7 e 28 dias os autores confirmam estudos prévios que sugerem que o aumento nos valores de resistência à compressão ocorre com 10-30% de RV. Os autores ainda relatam que a geometria irregular do vidro reciclado tornou difícil conseguir uma distribuição homogênea e que moer o vidro e utilizar uma granulometria homogênea pode melhorar os resultados de resistência.

De forma similar, Khan e Saker (2020), estudaram a substituição de areia por resíduo de vidro nas concentrações de 25, 50, 75 e 100%. Constataram que, com o aumento da concentração de resíduo de vidro na argamassa, os valores resultantes de resistência à compressão diminuíram. Em seu estudo, a média de resistência obtida no rompimento com 28 dias para a argamassa de referência foi de 71 MPa e para a argamassa contendo 100% de resíduo de vidro foi de 66 MPa. Os autores explicam que uma possível justificativa para tal fato são ligações mais fracas entre o resíduo de vidro e a matriz cimentícia, decorrente da maciez da superfície do vidro. Além disso, a angularidade do agregado de vidro pode aumentar os vazios internos que afetam negativamente o desenvolvimento da resistência à compressão. Em

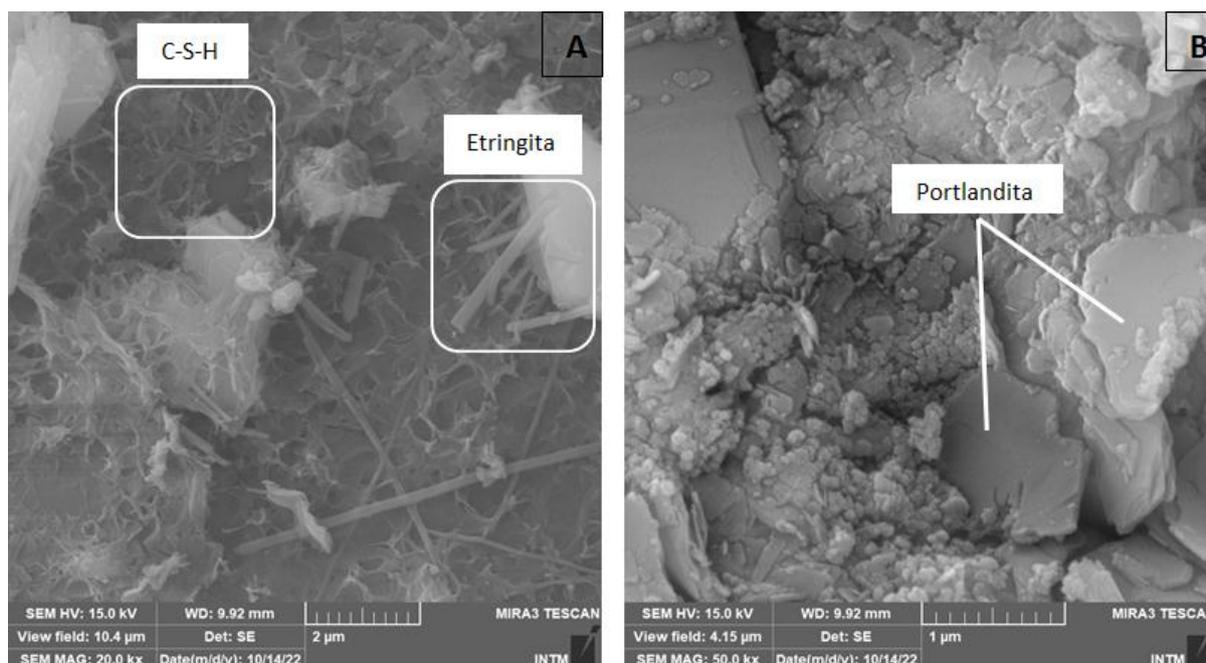
trabalho análogo, Lu e Poon (2018), afirmaram que a superfície lisa do resíduo de vidro enfraqueceu a ligação entre agregado e aglutinante. Como resultado, as argamassas com variadas porcentagens de agregado de vidro apresentaram menor resistência à compressão do que a argamassa apenas com areia natural.

A diminuição nos valores de resistência para as argamassas com resíduo de vidro era esperada, devido à variação da granulometria do resíduo utilizado. A variação nos tamanhos de grão e a presença de grãos relativamente maiores provocam certos defeitos na estrutura como elevado número de contornos de grão e pontos concentradores de tensão acarretando em menores valores de resistência.

5.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As análises MEV foram realizadas em amostras das argamassas de referência e nas argamassas com teor de 20% e 30% de resíduo de vidro. Os resultados obtidos são mostrados nas figuras abaixo (Fig.7 e Fig.8).

Figura 7 - Imagens MEV da argamassa de referência.

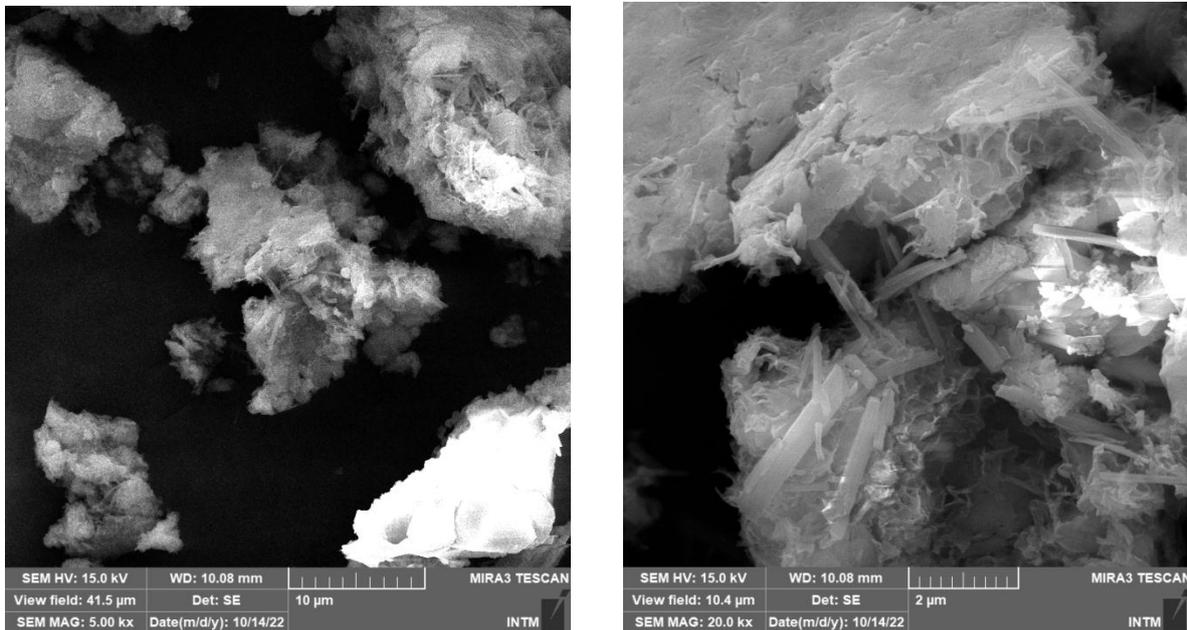


Fonte: A autora (2022).

Nas imagens acima é possível visualizar estruturas de formas hexagonais referentes à portlandita, importante produto de hidratação do cimento. Em A ainda é

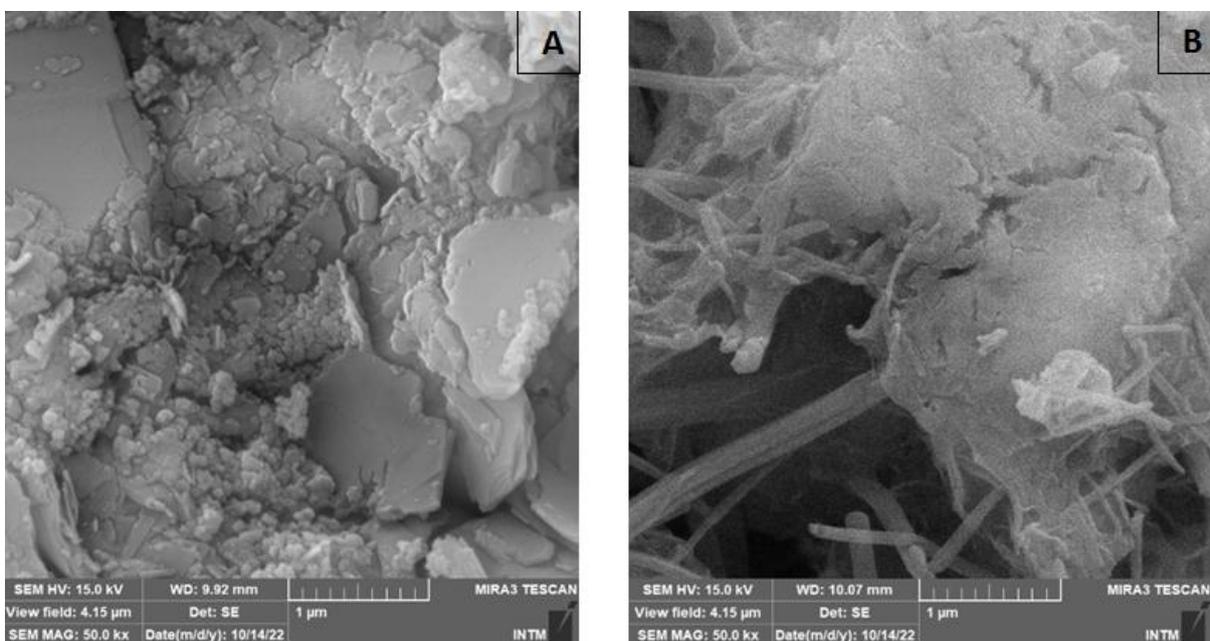
possível notar a presença de etringita, estruturas semelhantes a bastões, e, ao redor dos cristais, a presença de silicatos de cálcio hidratados (*C-S-H*), ambas estruturas decorrentes do processo de hidratação do cimento. Em B, a estrutura da portlandita está melhor destacada, também percebe-se com clareza os silicatos (*C-S-H*) presentes ao redor da portlandita.

Figura 8 - Imagens MEV da argamassa com 20% de resíduo de vidro.



Fonte: A autora (2022).

Figura 9 - Imagens MEV da argamassa com 30% de resíduo de vidro.



Fonte: A autora (2022).

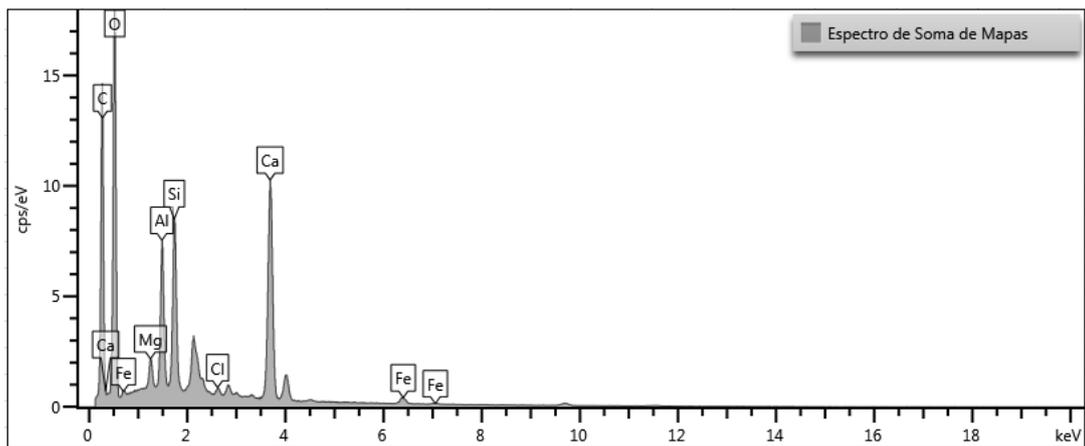
A partir das imagens acima é possível observar que a introdução do resíduo de vidro torna a argamassa mais densa, havendo diminuição na porosidade e maior uniformidade na estrutura. Wang (2011) teve conclusões similares em seu trabalho, onde analisou argamassas com resíduo de vidro como substituinte do cimento.

Em seu trabalho de 2020, Trentin *et al.*, analisaram a utilização de resíduo de vidro como substituto parcial do agregado miúdo em argamassas. Nas análises MEV foi possível notar uma disparidade nas formas apresentadas pelos grãos do resíduo, contendo partículas de tamanhos irregulares. De acordo com os autores, a estrutura desordenada e sem forma definida do resíduo de vidro o torna favorável para combinações com os demais componentes da argamassa.

5.4 Espectroscopia por dispersão de energia (EDS)

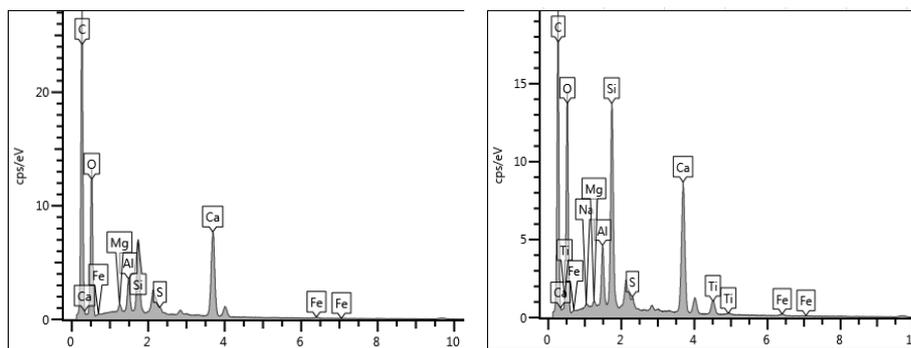
A partir da análise EDS foram obtidos os espectros apresentados nas figuras 9 e 10. Tanto no espectro de EDS referente à argamassa de referência (Fig.9) quanto nos espectros referentes às argamassas com concentrações de resíduo de vidro (Fig.10) são mostrados picos bastante acentuados dos elementos oxigênio, sílica, alumínio, carbono e cálcio. Esses elementos, provenientes de compostos como óxidos de ferro e de cálcio (Fe_2O_3 , CaO), sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) estão presentes em grandes quantidades, sendo maioria na composição dos materiais precursores - cimento, cal, areia e resíduo de vidro. Outros elementos reportados são decorrentes da presença de demais óxidos nos materiais, uma vez que não são completamente puros. Como exemplo desses óxidos complementares estão o óxido de magnésio (MgO), óxido de sódio (Na_2O) e óxido de titânio (TiO_2).

Figura 10 - Resultado do EDS referente à argamassa de referência.



Fonte: A autora (2022).

Figura 11 - Resultados EDS referente à argamassa com 20% RV (esquerda) e 30% RV (direita).



Fonte: A autora (2022).

As tabelas abaixo mostram os dados obtidos através do espectro de EDS, de forma quantitativa, para todas as argamassas analisadas.

Tabela 4 - Dados quantitativos obtidos através do espectro EDS, para a argamassa de referência.

Elemento	Concentração aparente	Peso (%)
O	30,64	42,86
Mg	0,76	0,86
Al	3,75	4,00
Si	4,39	4,67
Cl	0,37	0,4
Ca	13,27	13,84
Fe	1,14	1,51
C	11,65	31,87

Fonte: A autora (2022).

Tabela 5 - Dados quantitativos obtidos através do espectro EDS, para a argamassa contendo 20% RV.

Elemento	Concentração aparente	Peso (%)
O	24,98	35,71
Mg	0,42	0,42
Al	1,83	1,74
Si	4,04	3,8
Ca	11,3	10,8
Fe	0,34	0,41
C	24,27	47,13

Fonte: A autora (2022).

Tabela 6 - Dados semi quantitativos obtidos através do espectro EDS, para a argamassa contendo 30% RV.

Elemento	Concentração aparente	Peso (%)
C	16,41	39,9
O	26,17	36,57
Na	0,18	0,15
Mg	0,2	0,2
Al	2,33	2,19
Si	7,87	7,33
S	0,21	0,2
Ca	11,68	11,02
Ti	1,64	1,94
Fe	0,42	0,5

Fonte: A autora (2022).

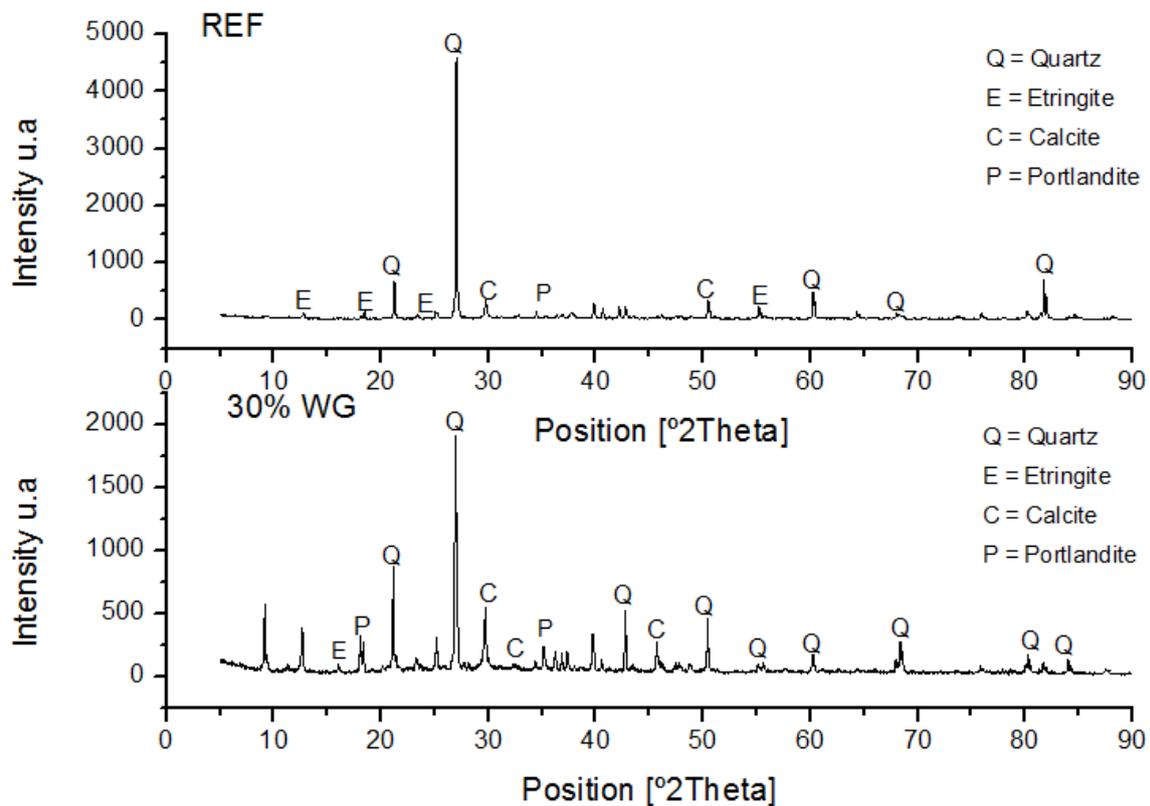
As tabelas acima representam os valores semi quantitativos dos elementos presentes nas argamassas de referência, com 20% de resíduo de vidro e com 30% de resíduo de vidro, respectivamente. Esses dados auxiliam na análise comportamental das argamassas, visto que possibilita uma noção dos elementos presentes devido contaminação, que possam vir a interferir nas propriedades finais das argamassas.

5.5 Difração de Raios-X

Foram realizados análises de DRX em amostras da argamassa de referência e da argamassa com 30% de resíduo de vidro. Os difratogramas de raios X das amostras são mostrados na Figura 11. Neles foram encontradas as fases de quartzo (SiO_2), etringita, silicatos de cálcio hidratados (*C-S-H*) e o carbonato de cálcio (calcita). Também foram encontrados compostos de alumínio, presentes na fração fina do solo, sendo os componentes que fornecem sua característica plástica, pois tem maior capacidade de retenção de água quando comparada às frações do quartzo, favorecendo a trabalhabilidade da mistura. A formação da calcita provavelmente se deve pelo contato da portlandita com o CO_2 da atmosfera durante a fabricação dos corpos de prova. A portlandita foi consumida quase que

inteiramente explicando a ausência de picos consideráveis dessa fase no difratograma.

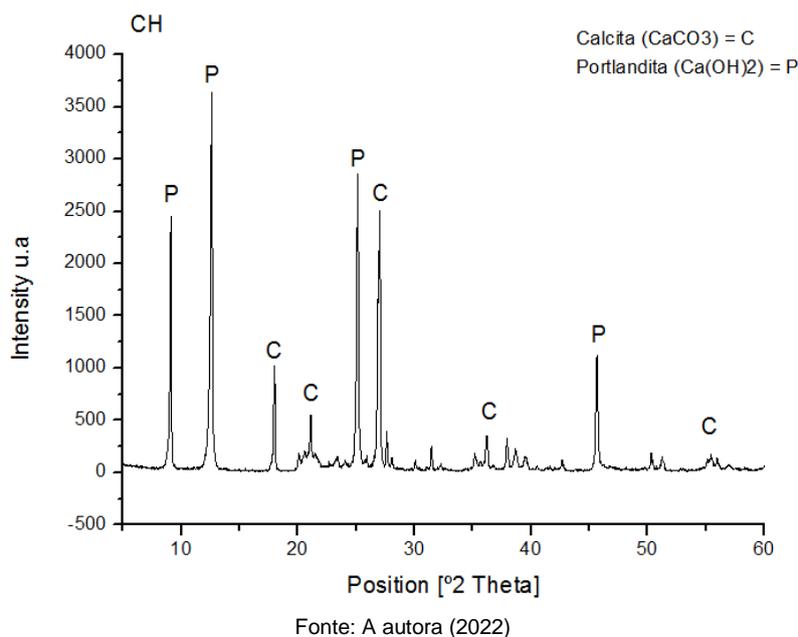
Figura 12 - Difratogramas de raios X das argamassas de referência e com 30% de resíduo de vidro após a cura.



Fonte: A autora (2022).

Também foi realizada análise DRX na cal hidratada utilizada na fabricação dos corpos de prova. Como resultado, foi apresentado nos difratogramas, já esperados como a portlandita, ou hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), e calcita, ou carbonato de cálcio (CaCO_3). O DRX também apresentou picos de menores intensidades referentes aos elementos alumínio e silício. Tal acontecimento pode estar relacionado com o grau de pureza da cal utilizada, podendo contar com materiais não calcinados e impurezas de rochas.

Figura 13 - Difratoograma de raios X da cal hidratada utilizada na produção das argamassas.

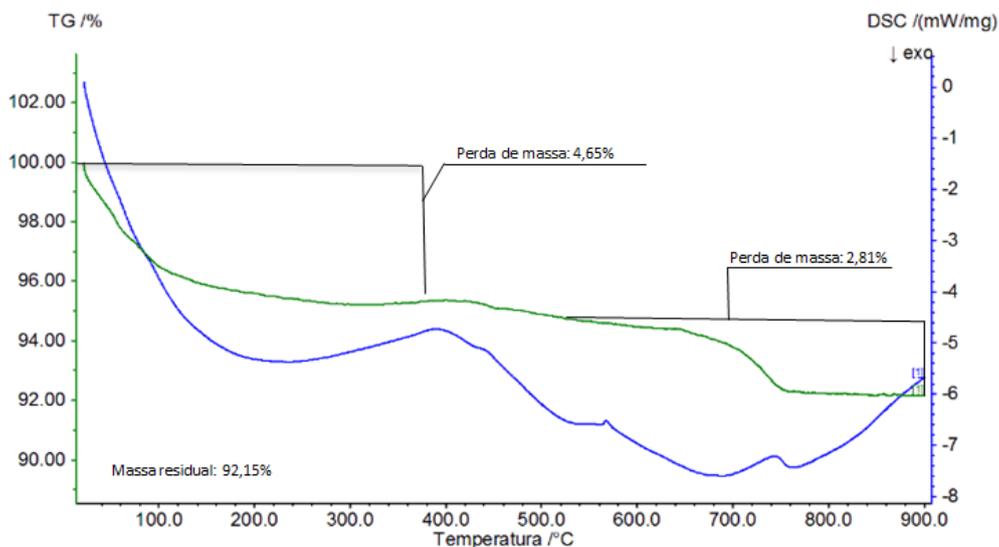


5.6 Termogravimetria

As análises de termogravimetria (TGA/DSC) foram realizadas em amostras da argamassa de referência, na argamassa contendo 30% de resíduo de vidro e na cal. O intuito foi de analisar o comportamento desse material e como ele influi no produto final, no caso da cal, e também analisar qual a influência da adição de RV na argamassa, por isso a escolha da maior concentração de resíduo na argamassa. A análise TGA/DSC também permite quantificar o teor de compostos hidratados formados, o teor de portlandita remanescente na matriz hidratada e, também, o teor de carbonato de cálcio.

Os termogramas apresentados nas Figuras 14 e 15, a seguir, mostram os resultados da análise de TGA/DSC nas três amostras mencionadas.

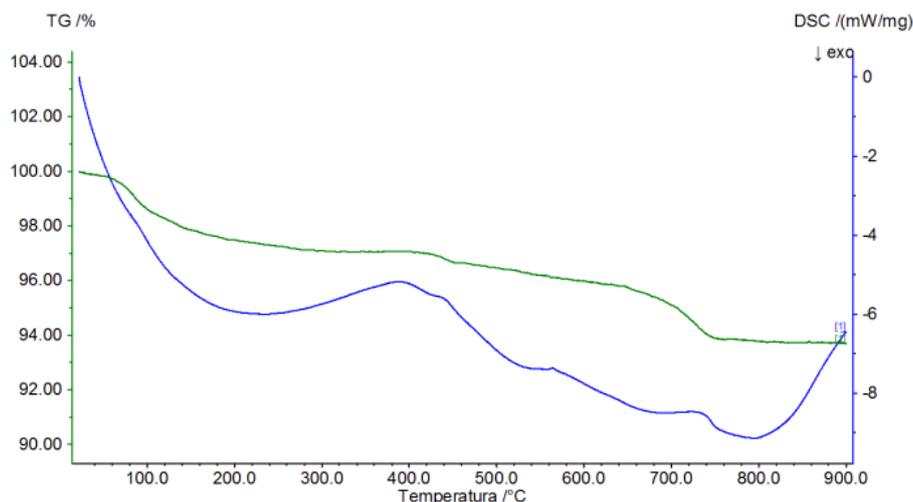
Figura 14 - Análise termogravimétrica (TGA/DSC) da argamassa de referência, após 28 dias de cura úmida.



Fonte: A autora (2022).

A Figura 14 apresenta a análise termogravimétrica da argamassa de referência, composta por cimento Portland CP II - Z, cal e areia. O teor de água quimicamente combinada relacionada à formação de *C-S-H* e das fases aluminato hidratadas é representado pela perda de massa de 4,65%, ocorrida entre aproximadamente 35°C e 385°C. A água de composição do hidróxido de cálcio, identificada pela TGA associada aos picos endotérmicos DSC, quantificada na faixa de temperatura de 385°C a 485°C, representa um teor baixo de 0,38% e a volatilização da água de composição do carbonato de cálcio entre 485°C e 900°C, apresentando uma diminuição de 2,81% de massa. Outros processos ocorrem simultaneamente como perda de água livre até 80°C e a desidroxilação da Ca(OH)_2 entre 400°C e 550°C.

Figura 15 - Análise termogravimétrica da argamassa com 30% de resíduo de vidro, após 28 dias de cura úmida.



Fonte: A autora (2022).

Analisando a curva TGA/DSC da argamassa com 30% RV, percebe-se que é bastante similar à curva da argamassa de referência. Há uma pequena diferença no percentual de massa perdido, tendo a argamassa com RV perdido apenas 3,65% da massa total. A argamassa de referência perdeu 7,85% da massa total.

Uma justificativa para a diminuição da perda de massa total da argamassa com resíduo de vidro é o fato de a variação percentual mássica ser inversamente proporcional à fixação da cal no sistema, ou seja, quanto menor a variação, maior a fixação da cal. Brito (2021), em seu estudo, observou um pequeno aumento da fixação de cal no traço com 3% de incorporação de vidro em relação ao traço de referência aos 28 dias e pastas contendo elevada quantidade de material pozolânico (5, 10 e 15% de vidro) apresentam maior fixação da cal em idades mais avançadas, devido à reação da atividade pozolânica ser mais lenta que a reação de hidratação do cimento. Estes resultados mostram que a adição de vidro altera a reação aglomerante, resultando em reações químicas entre a cal e o resíduo de vidro incorporado (Brito, 2021).

6 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Considerando a relevância do tema, sua importância ambiental e interdisciplinaridade, a pesquisa sobre reutilização de resíduo de vidro, nesse caso específico em um material cimentício, garante conhecimento para gerações futuras e demonstra a pertinência do assunto.

Como propostas para continuidade desta pesquisa, podem ser citadas:

- Aplicação das argamassas em alvenaria, para efetivamente analisar suas propriedades adesivas;
- Realizar MEV após o ensaio de resistência à aderência, para estudar a região de ruptura;
- Estudar a quantidade de água a ser utilizada, variando a relação água/cimento, visando uma melhora para as argamassas e possibilitar eficiência com relação às reações de hidratação envolvidas na fabricação das argamassas;
- Padronizar a granulometria do resíduo de vidro utilizado para obter maior homogeneidade da massa e, também, trabalhar com granulometrias mais finas, apesar de que a utilização de resíduo de vidro moído com uma granulometria mais variada é interessante, pois facilita na etapa de moagem assim como sua aplicação;
- Avaliar a resistência à compressão dos blocos em idades avançadas.

7 CONCLUSÕES

As argamassas produzidas, tanto a de referência quanto as com concentrações variadas de resíduo de vidro, apresentaram comportamento mecânico semelhante. Foi reportada uma diminuição nos valores de resistência à compressão em todas as argamassas com resíduo de vidro, contudo a maior diferença foi de apenas 1,6 MPa tanto para os CPs rompidos após 7 dias quanto para os rompidos após 28 dias - argamassa com 20% e 30% RV, respectivamente. Na proporção de 10%, após 28 dias, a substituição do agregado natural pelo resíduo de vidro resultou numa queda de 5,6% na resistência à compressão em comparação à argamassa de referência. A diminuição nos valores de resistência nas argamassas com resíduo de vidro era esperada, visto que a granulometria do resíduo utilizado atingiu 2,36 mm, como explicado na metodologia do trabalho. Variações nos tamanhos de grão e a presença de grãos maiores provocam defeitos na estrutura, acarretando em menores valores de resistência.

No que diz respeito às caracterizações químicas das argamassas os resultados obtidos foram bastante satisfatórios, de forma que confirmaram a presença de elementos e compostos esperados e necessários para comprovar as etapas da reação de hidratação do cimento e demais ligações envolvendo a cal e o resíduo de vidro, além de deixar explícita a presença de elementos não convencionais de materiais cimentícios, facilitando a compreensão de possíveis alterações. Em sua composição, as argamassas possuem estruturas como etringita, calcita, quartzo, entre outros silicatos hidratados. Durante o processo de caracterização também foi observado a presença de elementos como magnésio e sódio nas argamassas com resíduo de vidro, isso se deve à composição do vidro e a possíveis contaminações.

As análises das imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) possibilitaram o entendimento da microestrutura das argamassas e contribuiu para a compreensão dos resultados de resistência à compressão das argamassas. As imagens MEV mostram a morfologia dos materiais estudados, especificidades como quantidade e tamanho de poros, tamanhos de grãos e possibilita relatar diferenças em áreas específicas.

Finalmente, a partir dos resultados obtidos pode-se considerar que a utilização de resíduo de vidro como substituição de areia em argamassas é positiva, favorecendo uma redução nos impactos ambientais e econômicos provocados pelos elevados índices desse resíduo em lixões e aterros sanitários. Apesar da diminuição nos valores de resistência à compressão notificada, os resultados seguiram satisfatórios. Visto que o resíduo de vidro foi utilizado como um *filler* substituindo o agregado miúdo, ter resultados aproximados é um parâmetro importante para viabilizar seu uso no mercado da Construção Civil.

REFERÊNCIAS

ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia Básico de Utilização do Cimento Portland**. 7 ed. São Paulo: ABCP, 2002. p. 28.

ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Uma breve história do cimento Portland**. 2009. Disponível em: <<https://abcp.org.br/basico-sobre-cimento/historia/uma-breve-historia-do-cimentoportland/>>. Acesso em 21 de outubro de 2021.

ABRAVIDRO – Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos. **Como fazer o descarte do vidro? Nós mostramos!** Abravidro, São Paulo/SP, 2017. Disponível em: <<https://abravidro.org.br/punoticias/como-fazer-o-descarte-do-vidro-nos-mostramos/>>. Acesso em: 06 ago. 2022.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019**. Abrelpe, São Paulo/SP. Disponível em: < <http://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: 06 ago. 2022.

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

ANDRADE, C. **Evaluation of the degree of carbonation of concretes in three environments**. Construction and Building Materials, 230. 2020.

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, São Paulo. Anais... São Paulo: ANTAC, 2003.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13528. **Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração.** Rio de Janeiro - RJ, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6508. **Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro - RJ, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7211. **Agregado para concreto.** Rio de Janeiro - RJ, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7175: **Cal hidratada para argamassas.** Rio de Janeiro - RJ, 2003.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM ISO 3310-1: Peneiras de ensaio - **Requisitos técnicos e verificação. Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico (ISO 3310-1:2000, IDT).** Rio de Janeiro - RJ, 2011.

BERTOLINI, L. **Materiais de construção, patologia, reabilitação e prevenção.** São Paulo: Oficina de textos, 2010.

BRITO, B.R. **Efeito da incorporação de vidro de garrafas não retornáveis em matriz cimentícia.** Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia de Materiais), Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente, p.172. 2021.

BULLARD, J.W., JENNINGS, H.M., LIVINGSTON, R.A., NONAT, A., SCHERER, G.W., SCHWEITZER, J.S., SCRIVENER, K.L., THOMAS, J.J. **Mechanisms of cement hydration.** Cement and Concrete Research, 41 (2011), 1208–1223.

CALLISTER, W.D.; RETHWISCH, D.G. (Orgs.). **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** 9a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. p. 912.

CARASEK, H. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo, IBRACON, 3ed, 2017.

CARASEK, H.; CASCUDO, O. **Descolamento de Revestimentos de Argamassa Aplicados sobre Estruturas de Concreto – Estudos de casos brasileiros**. Anais II Congresso Nacional de Argamassas de Construção. Parque das Nações, Lisboa, 2007.

CARASEK, H.; CASCUDO, O.; SCARTEZINI, I.M. **Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassa**. In: Simpósio Brasileiro De Tecnologia Das Argamassas, 4, São Paulo, 2001. Anais. Brasília: Unb/ANTAC, 2001. p. 43-60.

CARDOSO, J.J., PACHECO, A.D.C., BARROS JUNIOR, A.P., REIS-NETO, A.F. **Resíduos sólidos domiciliares e suas consequências para famílias rurais paranaenses**. In: MELO, D. P.; EL-DEIR, S. G.; SILVA, R. C. P.; SANTOS, J. P. O. (Orgs.). Resíduos sólidos:gestão pública e privada. 1ª ed. Recife:EDUFRPE, 2018. p. 319-330.

CARNEIRO, A.M.P. **Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas**. São Paulo, 1999. 203 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CARNEIRO, A.M.P.; CINCOTTO, M.A. **Dosagem de argamassas através de curvas granulométricas**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999. Boletim Técnico n. 237.

CARNEIRO, A.M.P.; CINCOTTO, M.A.; JOHN, V.M. **A massa unitária da areia como parâmetro de análise das características de argamassa**. Ambiente Construído, São Paulo, v. 1, n. 2, p. 37-44. 1997.

CARTAXO, A.E.; SOUSA, C.R.C.; SANTOS, R.J.; ROCHA, A.L. **Gerenciamento de resíduos semi sólidos oriundos de oficinas mecânicas da cidade de Pau dos Ferros–RN**. In: MELO, D. P.; EL-DEIR, S. G.; SILVA, R. C. P.; SANTOS, J. P. O.

(Orgs.). **Resíduos sólidos: gestão pública e privada**. 1ª ed. Recife: EDUFRPE, 2018. p. 303-318.

CASCUDO, O., PIRES, P., CARASEK, H., CASTRO, A., LOPES, A. **Evaluation of the pore solution of concrete with mineral addition subjected to 14 years of natural carbonation**. Cement and Concrete Composites, 115. 2021.

CASCUDO, O.; CARASEK, H.; CARVALHO, A. **Controle de argamassas industrializadas em obra por meio do método de penetração do cone**. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas - SBTA, 6., Florianópolis, 2005. Anais. UFSC/ANTAC, p. 83-94.

CASCUDO, O; CARASEK, H. **Ação da carbonatação no concreto – Concreto: Ciência e Tecnologia**. – São Paulo: IBRACON, 2011. V1. p. 849-883.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Ministério do Meio Ambiente**. Resolução nº 307 de 05 de julho de 2002 – CONAMA. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama>>. Acesso em: 09 de agosto de 2022.

DAL MOLIN, D.C.C. **Adições Minerais para Concreto Estrutural**. In: **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, p. 345-379. 2005.

DAL MOLIN, D.C.C. **Adições Minerais**. In: ISAIA, G.C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, v. 1, p. 261–310, 2011.

DISFANI, M.M., ARULRAJAH, A., BO, M.W., HANKOUR, R. **Recycled crushed glass in road work applications**. Waste Management (Oxford), 31 (2011) 2341–2351.

FERNANDES, S.C.; BARROS, R.P.; FERREIRA, A. de S.; BARROS, L.M. **Production of high strength concrete using superplasticizer and addition of microsilica**. Research, Society and Development, [S. l.], v. 9, n. 12, p. e44991211380, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i12.11380. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/11380>. Acesso em: 22 ago. 2021.

FONSECA, G.C. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

FRAGATA, A., VEIGA, M.R., VELOSA, A.L., FERREIRA, V.M. **Incorporação de resíduos de vidro em argamassas de revestimento - avaliação da sua influência nas características da argamassa.** Anais do II Congresso Nacional de Argamassas de Construção. Parque das Nações, Lisboa. 2007.

GOMES, A.O.; NEVES, C.M.M. **Proposta de método de dosagem racional de argamassas contendo argilominerais.** Revista Ambiente Construído. Volume 2, P. 13-30, 2002.

GOUVEIA, N. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectivas de manejo sustentável e inclusão social. **Ciência e Saúde Coletiva.** v. 17, n. 6, p. 1503-1510, 2012.

HOPPE FILHO, J., **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto.** Tese de D.Sc., Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, SP, Brasil, 2008.

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

IEA. **Global Status Report for Buildings and Construction 2019**; IEA: Paris, France, 2019. Available online: <https://www.iea.org/reports/global-status-report-for-buildings-and-construction-2019> (accessed on 12 May 2020).

ILIESCU, M. **Adesão aos substratos de concreto e argamassa.** 28 nov. 2016. Apresentação do PowerPoint. Disponível em: <http://www.iliescu.com.br/palestras/adesao_aos_substratos_de_concreto_e_argamassa.pdf>. Acesso em 20 de agosto de 2021.

ISAIA, G.C. **Concreto: Ciência e Tecnologia.** 1. ed. São Paulo, IBRACON, 2011. 2v.

JIANG, Y., LING, T., MOB, K.H., SHI, C. **A critical review of waste glass powder: Multiple roles of utilization in cement-based materials and construction products.** Journal of Environmental Management, 242 (2019) 440–449, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.098>.

KANAN, M.I. **Manual de conservação e intervenção em argamassas e revestimentos à base de cal.** Programa Monumenta. Cadernos técnicos 8. 2008.

KHAN, M.N.N., SAHA, A.K., SARKER, P.K. **Reuse of waste glass as a supplementary binder and aggregate for sustainable cement-based construction materials: a review.** Journal of Building Engineering, 28 (2020).

KHAN, M.N.N., SAHA, A.K., SARKER, P.K. **Reuse of waste glass as a supplementary binder and aggregate for sustainable cement-based construction materials: a review.** Journal of Building Engineering, 28 (2020) 101052.

KHAN, Md.N.N., SAKER, P.K. **Effect of waste glass fine aggregate on the strength, durability and high temperature resistance of alkali-activated fly ash and GGBFS blended mortar.** Construction and Building Materials, 263. 2020.

KIM, S., CHOI, S.Y., YANG, E.I. **Evaluation of durability of concrete substituted heavyweight waste glass as fine aggregate.** Construction and Building Materials. 184 (2018) 269–277.

LARA, D.; NASCIMENTO, O.; MACEDO, A.; GALLO, G.; PEREIRA, L.; POTY, E. **Dosagem das argamassas.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, I., 1995, Goiânia. Anais... Goiânia: ANTAC, 1995. p. 63-72.

LAWRENCE, P., CYR, M., RINGOT, E. **Mineral admixture in mortars. Effect of inert materials on short-term hydration.** Cement and Concrete Research, v. 33, n. 12, pp. 1939-1947, December 2003.

LIMA, L.C., CARDOSO, M.F.M. Análise do gerenciamento de resíduos sólidos públicos em vias comerciais da cidade de Caruaru-PE. (Orgs.). **Resíduos sólidos: Impactos socioeconômicos e ambientais.** 1a ed. Recife:EDUFRPE, 2018. p. 277-278.

LORYUENYONG, V., PANYACHAI, T., KAEWSIMORK, K., SIRITAI, C. **Recycled crushed glass in road work applications.** Waste Management (Oxford), 29 (2009) 2717– 2721.

LU, J.-X., POON, C.S. **Use of waste glass in alkali activated cement mortar.** Construction and Building Materials, 160 (2018) 399–407.

MALHOTRA, V.M., MEHTA, P.K. **High performance, high-volume fly ash concrete: materials, mixture proportioning, properties, construction practice, and case histories.** Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc., Ottawa, 2002.

MARQUES, S.M.F. **Estudo de Argamassas de Reabilitação de Edifícios Antigos.** 2005. 148f. Dissertação Mestrado – Universidade de Aveiro, Portugal.

MEDINA, E.A., **Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálcio.** Dissertação de M.Sc., Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, SP, Brasil, 2011.

MEHTA, A.,. ASHISH, D.K. **Silica fume and waste glass in cement concrete production: a review.** Journal of Building Engineering, (2019), <https://doi.org/10.1016/j.jobe.100888>.

MENEZES, R.R., FARIAS FILHO, J., FERREIRA, H.S., NEVES, G.A., FERREIRA, H.C. **Reciclagem de resíduos da construção civil para a produção de argamassas.** Cerâmica, 55, 2009. p. 263-270.

MEYER, C. **The greening of the concrete industry.** Cement Concrete Composite. 2009, 31, 601–605.

MINERAIS DO PARANÁ S.A – MINEROPAR. **Plano Diretor de Mineração para a Região Metropolitana de Curitiba.** Curitiba: MINEROPAR, 2004. 288 p.

MOROPOULOU, A., CAKMAK, A.S., BISCONTIN, G., BAKOLAS, A., ZENDRI, E. **Advanced Byzantine cement based composites resisting earthquake stresses: the crushed brick/lime mortars of Justinian’s Hagia Sophia.** Construction and Building Materials. 16 (8) (2002) 543–552.

NASSAR, R.U.D., SOROUSHIAN, P. **Green and durable mortar produced with milled waste glass.** Magazine of Concrete Research, 2012, 64, 605–615.

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

NEŽERKA, V.; BÍLÝ, P.; HRBEK, V.; FLÁDR, J. (2019). **Impact of silica fume, fly ash, and metakaolin on the thickness and strength of the ITZ in concrete.** Cement and Concrete Composites. doi:10.1016/j.cemconcomp.2019.05.012 .

OKSRI-NELFIA, L., MAHIEUX, P-Y., AMIRI, O., TURCRY, Ph., LUX, J. **Reuse of recycled crushed concrete fines as mineral addition in cementitious materials.** Materials and Structures. 2016. DOI 10.1617/s11527-015-0716-1.

ORTEGA, J.M., LETELIER, V., SOLAS, C., MIRÓ, M., MORICONI, G., CLIMENT, M.A., SÁNCHEZ. I. **Influence of waste glass powder addition on the pore structure and service properties of cement mortars.** Sustainability, v.10, 842, 2018.

PARK, S.B., LEE, B.C., KIM, J.H. **Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate.** Cement and Concrete. Research, 34 (2004) 2181–2189.

PAUL, S.C., SAVIJA, B., BABAFEMI, A.J. **A comprehensive review on mechanical and durability properties of cement-based materials containing waste recycled glass.** Journal of Cleaner Production, 198 (2018) 891–906.

PENGFEI, L., RAN, J., NIE, D., ZHANG, W. **Improvement of mix design method based on paste rheological threshold theory for self-compacting concrete using different mineral additions in ternary blends of powders.** Construction and Building Materials, 276. 2021.

POLICARPO, M.C., FARIAS, A.S.D. (Orgs.). **Gerenciamento Logístico em uma Empresa Fornecedora de Resíduos Sólidos para Processos de Reciclagem.** 1° ed. Recife: EDUFRPE, 2018. p. 253.

RAGO, F.; CINCOTTO, M. A. **Influência do tipo da cal hidratada na reologia de pastas**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999. Boletim Técnico n. 233.

RAISDOFFER, J.W. **Influência da adição ou substituição de adições minerais ao cimento portland: efeitos na carbonatação, absorção capilar e resistividade de concretos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

RASHAD, A.M. **Recycled waste glass as fine aggregate replacement in cementitious materials based on Portland cement**. Construction and Building Materials, 72 (2014) 340–357, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.092>.

RECENA, F.A.P. **Conhecendo Argamassa**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2ª ed. 2012.

RODRIGUES, P.N. **Caracterização das argamassas históricas da ruína de São Miguel Arcanjo/RS**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS, 2013.

ROMANO, R.C.O., SCHREURS, H., JOHN, V.M., PILEGGI, R.G. **Influência da técnica de dispersão nas propriedades de sílica ativa**. Cerâmica, 54. 2008.

SABBATINI, F.H. **O processo construtivo de edifícios de alvenaria estrutural sílico-calcária**. São Paulo. 1984. 298 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SAHA, A.K; SARKER, P.K. **Sustainable use of ferronickel slag fine aggregate and fly ash in structural concrete: mechanical properties and leaching study**. Journal of Cleaner Production, 162 (2017) 438–448.

SANTOS, D.S., SAMPAIO, J.A., VILAS BOAS, D.C. **Estabilização solo melhorado com cimento e resíduo da lapidação do vidro para pavimentação. Resíduos sólidos: Educação e meio ambiente**. 1a ed. Recife: EDUFRPE, 2021. p. 429-432.

SANTOS, D.S., SAMPAIO, J.A., VILAS BOAS, D.C. **Estabilização solo melhorado com cimento e resíduo da lapidação do vidro para pavimentação. Resíduos sólidos: Educação e meio ambiente**. 1a ed. Recife: EDUFRPE, 2021. p. 429-432.

SANTOS, Í, M, R.; RAISDORFER, J. W.; HOFMMANN, L.; MEDEIROS, M. H. F. **Influência da adição de nanotubos de carbono e de cinza volante no calor de hidratação do concreto** – ALCONPAT BRASIL, Anais do 1o Congresso Brasileiro de Patologia das Construções, Foz do Iguaçu, Paraná, 2014.

SANTOS, S.F., MOREIRA, L.A., GOMES, C.L., OLIVEIRA, R.M., SALLES, P.V., JUNIOR, L.A.S. **Caracterização da cinza de casca de arroz como adição mineral ao concreto**. Research, Society and Development, vol. 8, núm. 3, 2019.

SELMO, S.M.S. **Dosagem de argamassas de cimento e cal para revestimento externo de fachada de edifícios**. São Paulo: USP, 1989. 187p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil), Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

SHACKELFORD, J.F. **Ciência dos materiais**. 6. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2008.

SHARIFI, Y., AFSHOON, I., ASAD-ABADI, S., ASLANI, F. **Environmental protection by using waste copper slag as a coarse aggregate in self-compacting concrete**. Journal of Environmental Management, 271 (2020) 111013.

SHARIFI, Y., AFSHOON, I., FIROOZJAIE, Z. **Fresh properties of self-compacting concrete containing ground waste glass microparticles as cementing material**. Journal of Advanced Concrete Technology, 13 (2) (2015) 50–66.

SHARIFI, Y., AFSHOON, I., FIROOZJAIE, Z., MOMENI, M. **Utilization of waste glass microparticles in producing self-consolidating concrete mixtures**. International Journal of Concrete Structures and Materials, 10 (3) (2016) 337–353.

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

SIDDIQUE, S; SHRIVASTAVA, S; CHAUDHARY, S. **Influence of ceramic waste as fine aggregate in concrete: Pozzolanic, XRD, FT-IR, and NMR investigations**. Journal of Materials and Civil Engineering, 30 (2018) 1–12.

SIKORA, P., AUGUSTYNIAK, A., CENDROWSKI, K., HORSZCZARUK, E., RUCINSKA, T., NAWROTEK, P., MIJOWSKA, E. **Characterization of mechanical and bactericidal properties of cement mortars containing waste glass aggregate and nanomaterials.** *Materials* 2016, 9, 701; doi:10.3390/ma9080701.

SILVA, J.P.; DAMO, J. **Reaproveitamento de pneus: plano de negócios para implantação de uma usina recicladora de pneus.** In: SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA, 11. Resende. *Anais...*Resende: 2014.

SOLIMAN, N.A., TAGNIT-HAMOU, A. **Using glass sand as an alternative for quartz sand in UHPC.** *Construction and Building Materials*, 145 (2017) 243–252.

TAHA, B., NOUNU, G. **Properties of concrete containing mixed color waste recycled glass as sand and cement replacement.** *Construction and Building Materials*, 22 (5) (2008) 713–720.

TAN, K.H., DU, H. **Use of waste glass as sand in mortar: Part I – fresh, mechanical and durability properties.** *Cement and Concrete. Composite*, 35 (2013) 109– 117.

TAYLOR, H.F.W. *Enciclopedia de la química industrial - la química de los cementos.* v. 1. Bilbao-Espanha: URMO, 1967.

TRENTIN, P.O., MANICA, J., VANZETTO, S.C., MARANGONI, B., ZALESKI, A. **Partial replacement of small aggregate by ground glass residue in the production of mortar.** *Matéria*, 25 (1). Rio de Janeiro, 2020.

VIEIRA, P.L.; BELTRAME, L.T.C. *Educação Ambiental: a resposta para os problemas de resíduos sólidos.*In: TULLIO, L. (Org.).**Gestão de resíduos sólidos 3.** Ponta Grossa: Antena Editora, 2019. p. 13-23.

WANG, C.C., WANG, H.Y. **Assessment of the compressive strength of recycled waste LCD glass concrete using the ultrasonic pulse velocity.** *Construction and Building Materials*, 137 (2017) 345–353.

WANG. H. **The effect of the proportion of thin film transistor-liquid crystal display (TFT-LCD) optical waste glass as a partial substitute for cement in cement mortar.** Construction and Building Materials, 2011. p. 791-797.

XAVIER, M.A., MOREIRA, Y.S., SILVA, A.J.M. **Patologias em argamassas de revestimento.** Repositório Alfaunipac. Disponível em: <https://repositorio.alfaunipac.com.br/publicacoes/2020/507_patologias_em_argamassa_de_revestimento.pdf>. Acesso em: 10 de janeiro de 2023.