Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Klauss Henrique Morais Pontes

Incorporação de resíduos de vidro moído em betões: uma alternativa às cinzas volantes?

Maio de 2023

Incorporação de resíduos de vidro moído em argamassas: uma alternativa às cinzas volantes?
Klauss Henrique Morais Pontes
UMinho | 2023

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Klauss Henrique Morais Pontes

Incorporação de resíduos de vidro moído em argamassas: uma alternativa às cinzas volantes?

Dissertação de Mestrado em Construção e Reabilitação Sustentáveis

Trabalho efetuado sob a orientação do(a)

Professor Doutor Aires Camões

Doutora Raphaele Lira Meireles Castro Malheiro

Maio de 2023

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicado.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositórioUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações
CC BY-NC-ND

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que me sustentou, me guiou, orientou até à conclusão deste trabalho. Somente através dele, tive a oportunidade de estar na Universidade do Minho estudando tão necessário tema para a engenharia civil e a sustentabilidade no uso dos materiais de contrução.

Agradeço à equipa de engenheiros composta pelo Professor Dr. Eng. Aires Camões, meu orientador, que esteve sempre disposto a ajudar e a balizar o desenvolvimento do trabalho e os questionamentos teóricos que surgiam; pela Dra. Eng. Raphaele Malheiro, co-orientadora, sempre disposta a ajudar e aconselhar na estrutura da dissertação, realizando as correções parciais; pelo técnico do laboratório de materiais, Eng. Carlos Jesus, que foi meu orientador nos trabalhos laboratoriais e com quem fiz todos os trabalhos de moagem do vidro, caracterização de materiais, testes e aquisição de suprimentos, bem como a maior parte das discussões teóricas, e viabilização de equipamentos, utilizando sua experiência superior a 25 anos no Laboratório de Materiais de Construção; pelo Eng. Jia Zhyong que muito nos ajudou nas misturas, na preparação de materiais e moldes e apoio em geral.

Agradeço à colaboração do Eng. Carlos Palha que gentilmente sempre esteve disponível.

Agradeço com muito apreço o auxílio do Professor Dr. Eng. Manuel Ribeiro que nos apoiou no Instituo Politécnico de Viana do Castelo (IPVC) com o laboratório local, assim como com sua profunda *expertise* em análise microestrutural e grande conhecimento da química do cimento. E destaco profunda gratidão e admiração pelo conhecimento e presteza da Dra. Élia Fernandes, Técnica Superior do IPVC, quem além de muito nos ajudar nos ensaios, representava um apoio fundamental nos questionamentos químicos, portadora de um conhecimento admirável.

Agradeço aos meus pais que, com seus esforços, viabilizaram minha construção acadêmica, pessoal e profissional. À minha namorada e sogra que me acompanharam ao longo do processo. À minha irmã, cunhado e sobrinhos pelo suporte familiar. Agradeço aos meus colegas de mestrado que, com o alto nível da turma, me elevaram como profissional. E, por fim, agradeço ao Professor Dr. Luís Bragança e aos professores do primeiro ano pela generosidade na troca de conhecimento e pela excelente gestão no ensino acadêmico.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

RESUMO

O cenário global atual é de grande preocupação com o aquecimento global e seus efeitos, bem como com a insustentabilidade do mundo. No intuito de diminuir as emissões de carbono e gases de efeito estufa, a Comissão Europeia tomou uma série de medidas com prazos estabelecidos. Uma das medidas é o encerramento de todas as usinas termoelétricas da Europa até 2030. Com esta medida, a oferta de cinzas volantes, originada de resíduos destas da queima do carvão nestas usinas, terá extrema redução, suscitando estudos que analisem materiais alternativos. Neste estudo, visou-se substituir parcialmente, em volume, o cimento usado em argamassas, pela percentagem de 25% de pó de vidro, mesma percentagem normalizada para incorporação de cinzas volantes para ser possível fazer uma comparação direta. Considerando que essa substituição reduz em 25% o uso do cimento, um dos materiais líderes em emissões de CO_2 no mundo. Neste trabalho, o principal interesse é de analisar o impacto de substituições parciais do cimento por pó de vidro em diferentes percentagens no comportamento mecânico das argamassas resultantes. Estas argamassas serão comparadas às argamassas com cinzas volantes no sentido de investigar o potencial do pó de vidro como substituto destas cinzas em materiais cimentícios. Os resultados apresentados apontam para um comportamento mecânico satisfatório para as argamassas com pó de vidro. Quando comparadas as argamassas com cinzas volantes, considerando as mesmas percentagens de substituição e sob as mesmas condições de ensaio, estas argamassas apresentaram resistências maiores que as argamassas com cinzas volantes. No que diz respeito à sua pozolanicidade, os resultados foram muito satisfatórios, mesmo em teores de substituição superiores a 25%.

Palavras-chave: Pó de vidro, cinzas volantes, resíduos, argamassas, sustentabilidade

ABSTRACT

The current global scenario is one of great concern with global warming and its effects, as well as with the unsustainability of the world. In order to reduce carbon emissions and greenhouse gases, the European Commission has taken a series of measures with established deadlines. One of the measures is the closure of all thermoelectric power plants in Europe by 2030. With this measure, the supply of fly ash, originating from residues of coal burning in these plants, will have an extreme reduction, prompting studies that analyze alternative materials. In this study, the aim was to partially replace, in volume, the cement used in mortars, by the percentage of 25% of glass powder, the same percentage normalized for the incorporation of fly ash in order to be able to make a direct comparison. Considering that this replacement reduces the use of cement by 25%, one of the leading materials in CO_2 emissions in the world. In this work, the main interest is to analyze the impact of partial replacements of cement by glass powder in different percentages on the mechanical behavior of the resulting mortars. These mortars will be compared to mortars with fly ash in order to investigate the potential of glass powder as a substitute for this ash in cementitious materials. The presented results point to a satisfactory mechanical behavior for mortars with glass powder. When comparing mortars with fly ash, considering the same replacement percentages and under the same test conditions, these mortars showed greater resistance than mortars with fly ash. With regard to its pozzolanicity, the results were very satisfactory, even at substitution levels greater than 25%.

Keywords: Glass powder, fly ash, waste, mortar, sustainability

ÍNDICE

Agradecimentos ii

Resumo iv

Abstract v

Índice vi

Índice de Figuras ix

Índice de Quadros xii

Acrónimos e Nomenclaturas xiv

1 Introdução 1

1.1 Motivação 1

1.2 Contexto Geral 1

1.2.1 Efeito de Estufa 1

1.2.2 Impacto das Construções no Ambiente 3

1.2.3 Pacto Ecológico Europeu *(Green Deal)* 4

1.2.4 Impactos da Utilização do Cimento Portland 5

1.3 Objetivos da pesquisa 6

1.3.1 Objetivo Geral 6

1.3.2 Objetivos específicos 6

1.4 Estrutura da dissertação 7

2 Estado do Conhecimento 8

2.1 Cimento Portland 8

2.1.1 Composição do cimento CEM I 9

2.1.2 A hidratação do cimento Portland 9

2.1.3 Cinzas volantes 11

2.1.4 Betões com cinzas volantes 12
2.2 Vidro 13
2.2.1 Produção, Reciclagem e Disponibilidade 13
2.2.2 Tipos de Vidro 14
2.2.3 Vidro de Garrafas (vidro sodo-cálcico) 15
2.2.4 O Pó de Vidro Como Alternativa às Cinzas Volantes 17
2.2.5 Principais diferenças entre o vidro moído e as cinzas volantes 17
2.3 Panorama das Pesquisas Com incorporação de Vidro Moído 19
2.3.1 Risco da Expansão por Reação Álcali-Sílica (RAS) 19
2.3.2 Influência do tamanho das partículas na reatividade 20
2.3.3 Substituição parcial do cimento por pó de vidro 21
3 Metodologia 24
3.1 Introdução e organização do trabalho 24
3.2 Procedimentos e materiais comuns às duas etapas da metodologia 24
3.2.1 Caracterização do cimento e das cinzas volantes 24
3.2.2 Obtenção, lavagem e secagem do vidro 27
3.3 Etapa 1: Estudos preliminares 28
3.3.1 Objetivo 28
3.3.2 Caracterização do agregado miúdo da etapa 1 28
3.3.3 Moagem do vidro na etapa 1 29
3.3.4 Peneiramento 30
3.3.5 Amassaduras 31
3.3.6 Resistência à compressão 32
3.4 Etapa 2: Substituições de cimento por pó de vidro e cinzas volantes 33

3.4.1 Objetivo 33
3.4.2 Definições obtidas da etapa 1 33
3.4.3 Caracterização do agregado miúdo da etapa 2 33
3.4.4 Refinamento no processo de moagem dos vidros 34
3.4.5 Caracterização do pó de vidro 36
3.4.6 Amassaduras 36
3.4.7 Trabalhabilidade da argamassa no estado fresco (espalhamento) 37
3.4.8 Resistência à compressão de diferentes teores de incorporação 38
3.4.9 Índice de Atividade 38
4 Apresentação e análise de resultados 40
4.1 Resultados da Etapa 1 (Estudos preliminares) 40
4.1.1 Finura do pó de vidro 40
4.1.2 Resistência à compressão 44
4.1.3 Conclusão dos estudos preliminares 47
4.2 Resultados da Etapa 2 (Substituições) 48
4.2.1 Caracterização do ligante 48
4.2.2 Comportamento no estado fresco 49
4.2.3 Resistência à compressão no estado endurecido 50
4.2.4 Índice de atividade 54
5 Conclusões e desenvolvimentos futuros 57
5.1 Conclusões 57
5.2 Desenvolvimentos futuros 58
Referências 60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Evolução da temperatura entre 1880 e 2012, a); Previsão da evolução da temperatura Global Até 2100, b) [8] 2

Figura 1.2 – Contributo por país da UE nas emissões de GEE em 2019[7] 2

Figura 1.3 – Exigência energética por sector no mundo[10] 3

Figura 1.4 – Emissões de CO_2 por sector no mundo[10] 4

Figura 1.5 – Objetivos do Pacto Ecológico Europeu 5

Figura 2.1 - Grão de cimento[19] 8

Figura 2.2 – Produtos do cimento hidratado: (a) Portlandita e tobermorita [19]; (b) – Etringita [22] 10

Figura 2.3 - Ciclo infinito do Vidro[29] 14

Figura 2.4 - Garrafas de vidro sodo-cálcico [32] 15

Figura 2.5 - Esferas das cinzas volantes (1.000x de ampliação) [38] 18

Figura 2.6 - Partículas de vidro (400x de ampliação) [39] 18

Figura 2.7 - Resistências à compressão aos 28 dias de finuras diferentes de Vidro verde (Vv)[40] 20

Figura 2.8 - Índice de Atividade aos 23 graus Celsius [40] 21

Figura 2.9 - Resistências à compressão aos 28 dias (Malheiro *et al.* 2022 [34]) 22

Figura 2.10 - Resistências à compressão no estudo de Matos [43] 23

Figura 3.1 – Resistência à compressão CEM I 42,5 R SECIL 26

Figura 3.2 - Garrafas prontas para moagem 27

Figura 3.3 - Curva granulométrica da areia fina usada na etapa 1 29

Figura 3.4 - Moinho *Los Angeles* com as 20 esferas de aço e 5kg de vidro moído 30

Figura 3.5 - Moinho "*Los Angeles*" (vista externa) [1] 30

Figura 3.6 - Pesagem da porção a ser moída 30

Figura 3.7 - Pesagem de massa abrasiva 30

Figura 3.8 – Peneiramento em 63 μm de pó de vidro âmbar de diversas finuras 31

Figura 3.9 - Peneiro de 63 μm com pó de vidro verde 31

Figura 3.10 – Provetes com diferentes finuras de pó de vidro 32

Figura 3.11 - Moinho de mandíbulas à esquerda e ao lado direito, o moinho de martelos .. 34

Figura 3.12 – Análise granulométrica das moagens realizadas nos moinhos de mandíbulas e martelos 35

Figura 3.13 - Medição de espalhamento de argamassa em estado fresco 38

Figura 4.1 - Gráfico de passados das três cores de vidro no peneiro de 63 μm 40

Figura 4.2 – Curvas granulométricas dos diferentes tempos de moagem, juntamente com a cinzas volantes e o cimento 42

Figura 4.3 – Alteração do D50 (mm) com os diferentes tempos de moagem do vidro 42

Figura 4.4 – Variação do aumento da Superfície Específica do Blaine (m^2/kg) com o aumento da moagem do vidro 43

Figura 4.5 – Relação da dimensão média D [50] [μm] com a superfície específica do Blaine (m^2/kg) com o aumento do tempo de moagem do vidro 43

Figura 4.6 - Tensão à compressão (aos 28 dias) dos provetes com pó de vidro verde e 25% de substituição 45

Figura 4.7 - Tensão à compressão (aos 28 dias) dos provetes com pó de vidro branco e 25% de substituição 46

Figura 4.8 - Tensão à compressão (aos 28 dias) dos provetes com pó de vidro âmbar e 25% de substituição 47

Figura 4.9 - Resistência à compressão dos provetes de argamassa aos 28 dias 50

Figura 4.10 - Resistência à compressão aos 90 dias 52

Figura 4.11 - Crescimento da resistência à compressão entre 28 dias e 90 dias de idade.... 53

Figura 4.12 - Índice de atividade dos provetes com 28 dias de idade..... 55

Figura 4.13 - Índice de atividade dos provetes com 90 dias de idade..... 56

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Composição química do clínquer no cimento Portland seco [21] 9

Quadro 2.2 - Produtos do Cimento Hidratado [21] 10

Quadro 2.3 - Composição química das cinzas volantes [1] 11

Quadro 2.4 - Dosagem mínima de ligante para betões com e sem cinzas volantes [26] 12

Quadro 2.5 - Composição química dos vidros sodo-cálcicos [33] 15

Quadro 2.6 - Adições químicas para coloração do vidro sodo-cálcico [33] 16

Quadro 2.7 - Cinzas Volantes x Pó de Vidro sodo cálcico 19

Quadro 3.1 – Dados relativamente ao CEM I 42.5 R dos ensaios físicos obtidos no laboratório 25

Quadro 3.2 – Dados dos ensaios mecânicos da ficha técnica da Secil [20] 25

Quadro 3.3 – Composição química do cimento e das cinzas volantes 27

Quadro 3.4 - Massas volúmicas CEM I 42,5 R e Cinzas Volantes 27

Quadro 3.5 - Composição química (%) da areia fina [46] 28

Quadro 3.6 - Caracterização granulométrica da areia utilizada 28

Quadro 3.7 - Distribuição de quantidade de materiais (kg) em 1 m^3 de argamassa 32

Quadro 3.8 - Ficha técnica areia normalizada conforme EN 196-1[50] 33

Quadro 3.9 - Resumo do refinamento da moagem do vidro 36

Quadro 3.10 – Dimensionamento, em gramas, das misturas de argamassas 37

Quadro 4.1 - Percentagem de passados no peneiro de 63 µm 41

Quadro 4.2 - Resistência à compressão dos provetes com pó de vidro verde aos 28 dias 45

Quadro 4.3 - Resistências à compressão dos provetes de vidro branco aos 28 dias 46

Quadro 4.4 - Resistências à compressão dos provetes de vidro âmbar aos 28 dias 47

Quadro 4.5 – Comparativo entre os grãos de pó de vidro, cinzas volantes e cimento 49

Quadro 4.6 – Valores do espalhamento dos diferentes tipos de argamassas do estudo..... 50

Quadro 4.7 – Densidade aparente (DA) e dos provetes com 28 e 90 dias de idade..... 54

ACRÓNIMOS E NOMENCLATURAS

Al_2O_2 - Óxido de alumínio ou alumina

ASTM - American Society for Testing and Materials

A/L - Razão água/ligante

B_2O_3 — Trióxido de Boro

CaO – Oxido de Cálcio

CO_2 – Dióxido de Carbono

Cr_2O_3 — Óxido de Cromo (III)

Fe_2O_3 – Óxido de Ferro (III)

kg – Quilograma

K_2O – Óxido de Potássio

LMC – Laboratório de Materiais de Construção

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

m – Metro

MgO – Óxido de Magnésio

mm – Milímetro

MPa – Mega Pascal

NaOH - Hidróxido de sódio

Na_2O – Óxido de Sódio

PbO — Monóxido de Chumbo

RAS – Reação álcalis-sílica

SiO_2 – Dióxido de silício (Sílica)

SO_3 – Trióxido de Enxofre

UE – União Europeia

μm – Micrómetro

°C – graus Celsius

$CaCO_3$ – Carbonato de cálcio

GEE – Gases com Efeito de Estufa

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Em Portugal, o betão com cinzas volantes é amplamente utilizado na construção. Com a abrupta redução na disponibilidade deste material, visto o encerramento das usinas termoelétricas no país, a de Sines em janeiro de 2021 e a de Pego em novembro de 2021[1], devido ao contexto ambiental em que medidas governamentais estabeleceram ações que visam a redução das emissões de CO_2, a ser explicado a seguir, visa-se dar um passo inicial na utilização de pó de vidro em alternativa às cinzas volantes, analisando superficialmente o potencial de produção do pó de vidro para este fim, a viabilidade técnica através da análise comparativa entre as características mecânicas do pó de vidro e das cinzas volantes, uma vez que as cinzas conferem características benéficas e peculiares em sua utilização [2].

O vidro mostra-se viável em termos quantitativos para substituição das cinzas volantes, visto as produções de cinzas volantes pelas usinas de Sines e Pego que eram de cerca de 500 mil toneladas por ano[1]. Portugal tem reciclado cerca de 350 mil toneladas de vidro por ano, correspondente a cerca de 56% do vidro produzido [3]. O potencial de recolha para reciclagem do vidro é de aproximadamente 625 mil toneladas, apresentando-se como material quantitativamente viável.

Esta dissertação de mestrado foi desenvolvida no âmbito do projeto GlassCON “Incorporação de resíduos de vidro moído em betões: uma alternativa às cinzas volantes?", que se encontra em desenvolvimento no Centro de Território, Ambiente e Construção (CTAC) da Universidade do Minho. O projeto GlassCON foca-se na busca de uma alternativa, tecnicamente viável e ambientalmente favorável, para substituição das cinzas volantes em misturas de betão.

1.2 CONTEXTO GERAL

1.2.1 Efeito de Estufa

A média da temperatura global anual está em crescimento. O *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC)[4] prevê um aquecimento maior que 1,5 graus Celsius até 2030 e 2,6 a 4,8 graus Celsius, em comparação com o período pré-industrial, como pode ser observado

na Figura 1.1[5]. Desde a década de 70 do século passado que os cientistas têm alertado, com preocupação, acerca da influência humana nesse processo, apesar do aquecimento global por emissões de CO_2 ter tido seu primeiro cálculo publicado no final do século XIX por *Arrhenius* [6]. Apesar do efeito estufa ser um fenômeno natural, ao qual os gases do efeito de estufa (GEE) acumulam-se na atmosfera terrestre impedindo a dispersão da radiação infravermelha, a contribuição humana intensifica este mecanismo, contribuindo significativamente para o aquecimento global. A queima de combustíveis fósseis é apontada como a grande fonte desta contribuição no atendimento às demandas energéticas. Na Figura 1.2 é possível ter um panorama do contributo de cada país da União Europeia na emissão dos GEE em 2019 sendo o maior emissõr mundial, estando atrás dos EUA e China [7].



a) b)

Figura 1.1 – Evolução da temperatura entre 1880 e 2012, a); Previsão da evolução da temperatura Global Até 2100, b) [8]

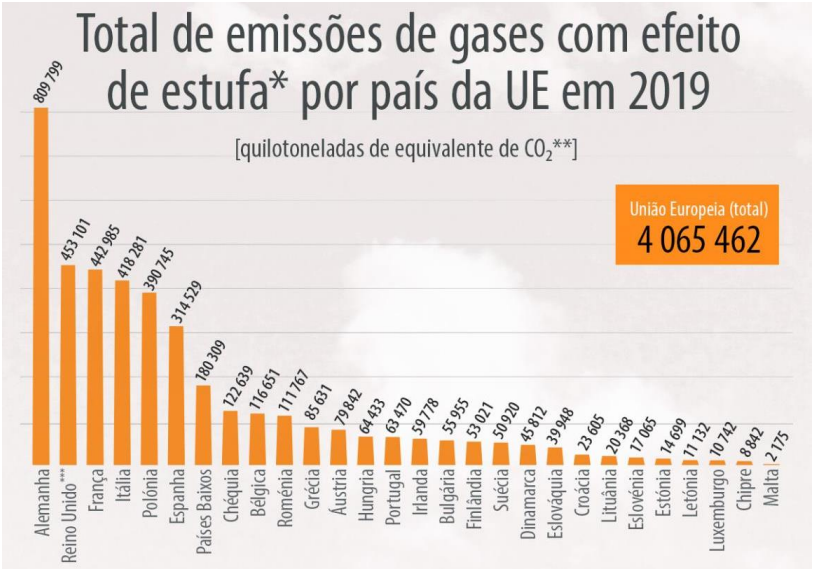


Figura 1.2 – Contributo por país da UE nas emissões de GEE em 2019[7]

Diversos encontros mundiais e acordos foram realizados com metas de descarbonização e redução do ritmo de aquecimento, como em destaque, a Eco 92, o Tratado de Kyoto e o acordo de Paris.

1.2.2 Impacto das Construções no Ambiente

O aquecimento global vem sendo observado desde o século XIX. No entanto, somente em 1992, na conhecida "Eco 92", as nações admitiram oficialmente a influência humana no agravamento crescente do aquecimento global. As construções geram grande impacto ambiental no lançamento de GEE na atmosfera, sendo responsável por aproximadamente 38% das emissões de CO_2 [9], bem como na extração de recursos, na demanda energética e na geração de resíduos. Ao considerar o contexto global, somando a construção e a utilização dos edifícios, a contribuição é de cerca de 40% [5]. As emissões ocorrem na produção dos materiais de construção, no transporte, na construção, na demolição, na reabilitação e na utilização do edificado.

Nas Figuras 1.3 e 1.4 observa-se a distribuição da demanda energética e das emissões de CO_2 no mundo por sector, em gráficos do Relatório do Status Global da ONU de 2017.

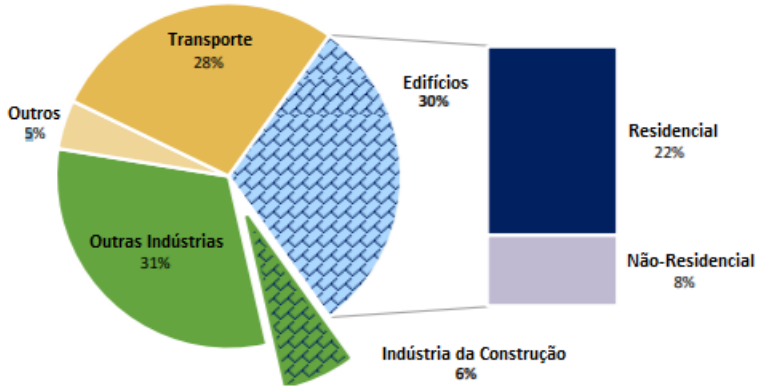


Figura 1.3 – Exigência energética por sector no mundo[10]

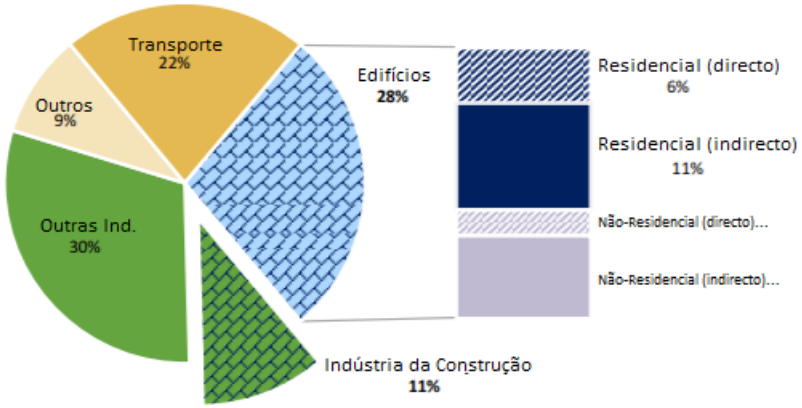


Figura 1.4 – Emissões de CO_2 por sector no mundo[10]

Aproximadamente metade das matérias-primas extraídas do solo possuem o setor construtivo como destino e tanto a atividade construtiva como de demolição são os maiores geradores de resíduos[11].

1.2.3 Pacto Ecológico Europeu *(Green Deal)*

O crescimento sócioeconômico é inevitável e é impossível controlar a oferta energética a quem demanda energia. No entanto, tornar essa demanda mínima possível para o mesmo número de empreendimentos, é criar uma relação de sustentabilidade e eficiência. Neste sentido, atualmente, a descarbonização da Europa tornou-se prioridade para o governo e, com o Pacto Ecológico Europeu (Figura 1.5), a Comissão Europeia estabeleceu ousadas metas para atingir o objetivo totalmente até o ano de 2050. Para obter êxito, o plano prevê investimento em tecnologias limpas, apoio às inovações industriais, tornar os edifícios mais eficientes energeticamente com a utilização de fontes renováveis e limpas de energia e melhoria da envolvente dos edifícios, também a melhoria das normas ambientais e mobilidade urbana com transportes mais limpos e incentivo ao uso coletivo.

O setor de edifícios é considerado chave para o plano pela alta demanda energética mencionada no item 1.2.2. No setor de fornecimento de energia elétrica, está previsto o fecho de todas as centrais à carvão da União Europeia até 2030. Com isso, reduzirá demasiadamente a oferta de cinzas volantes para adicionar ao clínquer (durante o processo

de produção do cimento) e ao betão. Há algum tempo que estudos foram iniciados para avaliar o comportamento do vidro moído em produtos cimentícios como o betão e a argamassa, variando, principalmente, a granulometria e as composições. Apesar destes estudos, há uma grande lacuna a preencher no que diz respeito à possibilidade de substituir as cinzas volantes por pó de vidro na produção de materiais cimentícios.

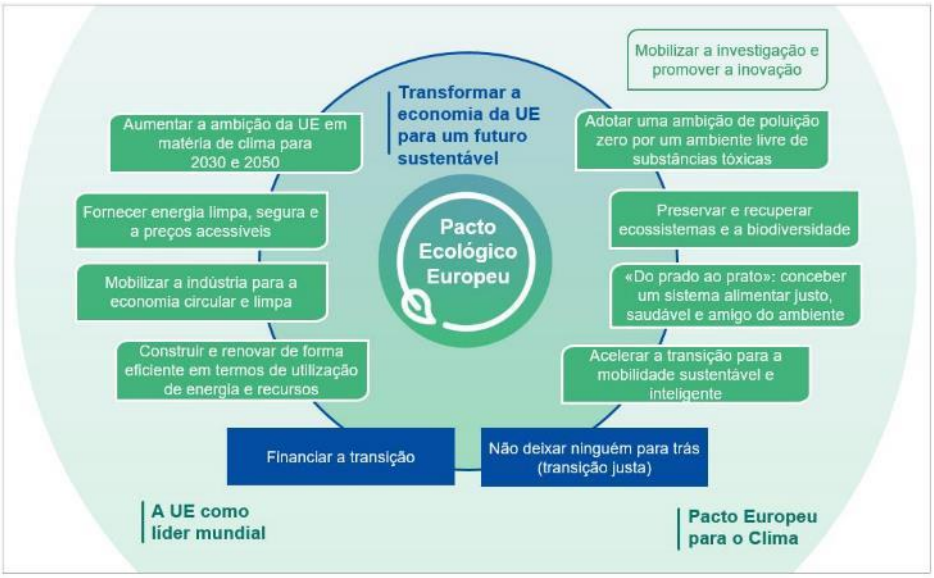


Figura 1.5 – Objetivos do Pacto Ecológico Europeu

1.2.4 Impactos da Utilização do Cimento Portland

Para produzir o clínquer, principal matéria-prima do cimento Portland, demanda-se muita energia em fornos que o entregam a mais de 1.400 graus Celsius, liberando na atmosfera gases resultantes desta queima, principalmente o dióxido de carbono que é resultante da descarbonização do calcário como demonstrada na equação química eq. 1, e representa mais de 99% dessa massa de gases poluentes produzidos [12,13].

$$\mathbf{CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2} \quad \text{(eq.1.1)}$$

A contribuição da produção de clínquer para emissão de dióxido de carbono à atmosfera é relevante, e representa aproximadamente 8% das emissões de CO_2 de todo o mundo na queima de combustíveis fósseis [14]. A razão emissora de tonelada de CO_2 por tonelada de clínquer produzida é de 0,579, segundo estudo de eco-eficiência feito por Torgal [15], ou seja, mais da metade na reação química. A indústria do cimento Portland é apresentada como

a segunda ou terceira maior emissora de GEE no mundo em relatórios do aquecimento global. Com o encerramento de centrais térmicas geradoras de energia e a demanda crescente de cimento Portland, prevista para a ordem de 5.000 milhões de toneladas por ano nos próximos 10 anos, a produção de cimento deve passar a liderar as emissões de CO_2 no mundo entre os materiais que são produzidos[16].

No entanto, inovações tecnológicas têm sido empregadas no setor como adições ao cimento que conferem redução de teor de clínquer e propriedades benéficas à resistência do material.

1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.3.1 Objetivo Geral

Tendo em conta o encerramento das centrais termoelétricas portuguesas e a consequente necessidade de encontrar, com urgência, um substituto para as cinzas volantes frequentemente incorporadas no betão produzido no país e no mundo, este trabalho pretende avaliar o potencial de utilização do resíduo de vidro moído como substituto do cimento, em alternativa às cinzas volantes.

1.3.2 Objetivos específicos

Para atender o objetivo geral desta pesquisa, estabeleceram-se os objetivos específicos discriminados abaixo:

I) Identificar tempo ideal de moagem e relacionar à finura otimizada do vidro para incorporação em argamassas;

II) Selecionar a cor de vidro a utilizar, entre as 3 cores mais correntes (âmbar, verde e branco) através dos testes de resistência e comparação com outras pesquisas;

III) Fazer comparações diretas entre argamassa sem adições, que será utilizada como referência, incorporações de 25% e 35% de cinzas volantes e incorporações de 5%, 15%, 25%, 35%, 50%, 70% e 95% de pó de vidro quanto à resistência à compressão e quanto à pozolanicidade;

IV) Identificar incorporações de pó de vidro que se assemelhem ou que superem o desempenho mecânico das argamassas com incorporação de cinzas volantes.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho é composto por cinco capítulos. No primeiro, na introdução, abordam-se a motivação, os objetivos desta pesquisa, e contextualiza-se ambiental e politicamente o que a motivou, abordando impactos ambientais da construção, medidas europeias de contenção da emissão de CO_2 na atmosfera e a consequente escassez de cinzas volantes em Portugal.

Após, no capítulo do "Estado do Conhecimento", apresenta-se uma revisão bibliográfica focada nos principais materiais desta pesquisa (cimento, cinzas volantes e resíduo de vidro). Este capítulo servirá como base para a definição da metodologia de trabalho e para a consequente análise e discussão dos resultados alcançados.

Na sequência, o capítulo da metodologia mostrará como o trabalho laboratorial foi organizado (dividido em duas etapas) e desenvolvido. Nesse capítulo, disserta-se sobre como se realizaram os ensaios e as normas vinculadas aos mesmos. A caracterização dos materiais é apresentada neste capítulo uma vez que a definição de parte da metodologia a utilizar está relacionada a estas características.

Logo após, apresentam-se os resultados alcançados, juntamente com a sua análise. O trabalho termina com a apresentação das principais conclusões e das referências bibliográficas utilizadas.

2 ESTADO DO CONHECIMENTO

2.1 CIMENTO PORTLAND

O betão é o segundo material mais consumido do mundo [17], sendo o cimento Portland o seu principal constituinte. Como foi mencionado no item 1.1.3, o impacto ambiental do cimento é elevado e as adições fizeram com que houvesse redução do volume deste material a ser utilizado nas misturas de betão e argamassas. Materiais que de resíduos tornam-se subprodutos, as adições, ou seja, foram valorizados, promovendo, assim, a economia circular.

O cimento é um ligante que reage quimicamente através de sua hidratação, gerando novos produtos. É um material fino, bastante reativo, de geometria irregular. Atinge em geral, uma resistência mecânica significativa aos 28 dias de cura, elevando-se no decorrer dos anos, mas muitas das vezes apenas residualmente. Normas técnicas regem seu fabrico no mundo e ao longo do globo terrestre, e outros materiais passaram a ser adicionados a ele. Essas adições variam por tipo e quantidade, principalmente pela disponibilidade geográfica e econômica do material, como explicado acima. As adições reduzem a quantidade de cimento por volume substituído e muitas vezes são resíduos aproveitados como as cinzas volantes que são resíduos dos fornos das termoelétricas. Em Portugal, a NP EN 197-1:2012[18] classifica os tipos de cimento. Neste trabalho será usado somente o CEM I.

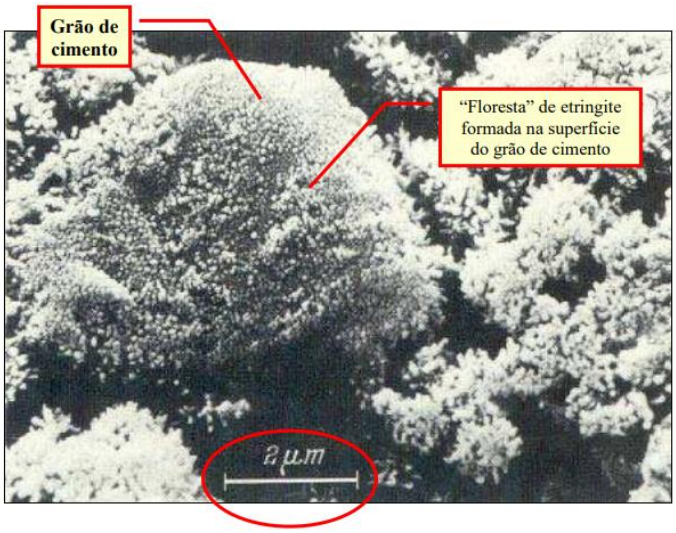


Figura 2.1 - Grão de cimento[19]

2.1.1 Composição do cimento CEM I

O cimento CEM I é composto de, pelo menos, 95% de clínquer e 5% de materiais secundários incluindo o gesso, Ca_2SO_4, para retardar a presa[20]. A composição química do clínquer é demonstrada no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Composição química do clínquer no cimento Portland seco [21]

Componentes	**Teor**
Cal amorfa (CaO)	≈ 67%
Sílica (SiO_2)	≈ 22%
Alumina (Al_2O_3)	≈ 5%
Hematita (Fe_2O_3)	≈ 3 %
Outros	≈ 3 %

Segundo Taylor [16], o cimento contém 4 principais fases, são elas: a alite (Ca_3SiO_5 – silicato tricálcico), belite (Ca_2SiO_4 – silicato dicálcico), aluminato ($Ca_3Al_2O_6$ – aluminato tricálcico) e ferrite (Ca_2AlFeO_5 – aluminoferrite tetracálcico), sendo a alite entre 50 e 70 porcento dessa composição.

2.1.2 A hidratação do cimento Portland

A hidratação do cimento gerará produtos originados das reações químicas com estas fases. Segundo Taylor [21], a alite será a principal responsável pela resistência inicial do cimento hidratado nas idades até 28 dias, reagindo rapidamente com a água.

A belite possui menor contribuição para a resistência inicial, mas será responsável por aumentar a resistência nas idades posteriores aos 28 dias de hidratação. O aluminato e a ferrite sofrem as mudanças moleculares mais significativas e essas mudanças ocorrem maioritariamente nas idades iniciais, ocorrendo residualmente e muito lentamente em idades mais avançadas, como é o caso das indesejadas etringitas tardias (sulfato aluminato de cálcio) que ocorrem patologicamente.

Ainda segundo o autor [16], 70% da alite reage nos primeiros 28 dias de idade e toda sua reação em até 1 ano, sendo seus produtos o hidróxido de cálcio (portlandita) e o silicato de cálcio hidratado (tobermorita). A belite terá os mesmos produtos de reação, no entanto se diferencia no tempo, tendo 90% de suas reações completadas em 1 ano. A etringita forma-se através do aluminato de cálcio, unindo-se aos sulfatos e iniciando o período de presa. São cristais tubulares típicos do enxofre.

Quadro 2.2 - Produtos do Cimento Hidratado [21]

Componentes	Siglas
Tobermorita	CSH
Portlandita	CH
Etringita	CASH

No Quadro 2.2, vê-se os principais produtos do cimento hidratado. As adições, basicamente manipulam esses três produtos, como por exemplo, os cimentos pozolânicos que consomem portlandita (Figura 2.2 a)) e produzem mais tobermoritas (Figura 2.2 a)) através da sílica amorfa presente nesses materiais que produzirão lentamente mais CSH. Na Figura 2.2 b), é possível observar a formação das etringitas (sulfato aluminato de cálcio).

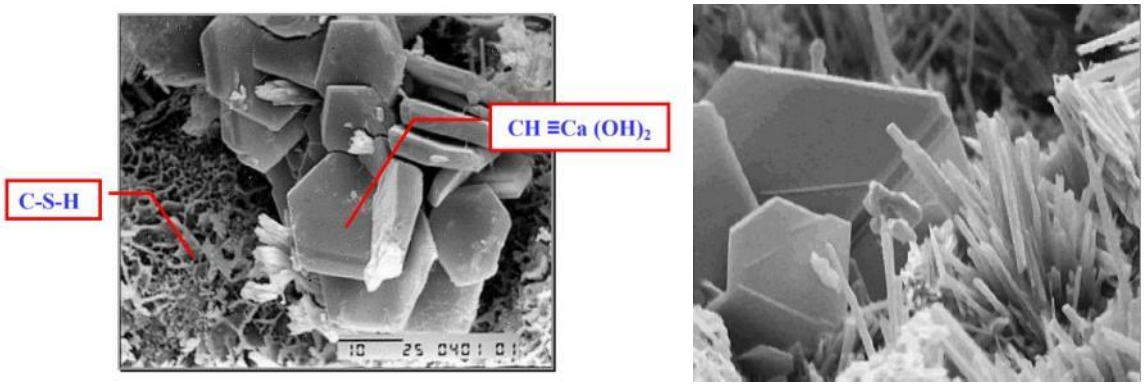


Figura 2.2 – Produtos do cimento hidratado: (a) Portlandita e tobermorita [19]; (b) – Etringita [22]

2.1.3 Cinzas volantes

As cinzas volantes possuem duas origens, natural e artificial. A natural tem origem vulcânica e a artificial e de uso corrente é um aproveitamento de resíduos de fornos de termoelétricas. Em Portugal, eram provenientes das usinas de Pego e Sines e a última a laborar, a do Pego, foi encerrada em novembro de 2021 devido às metas de sustentabilidade como dito anteriormente. Em Portugal, antes dos encerramentos, as usinas de Pego e Sines estavam produzindo cerca de 500 mil toneladas por ano de cinzas volantes[1].

As cinzas volantes possuem elevado teor de sílica e alumina como pode ser visto no Quadro 2.3. A norma portuguesa e europeia NP EN 450 de 1995[23], define as cinzas volantes como um pó fino constituído principalmente por partículas esféricas e vítreas oriundas da queima de carvão pulverizado[2], descrevendo assim a geometria peculiar das cinzas que traz benefícios.

Quadro 2.3 - Composição química das cinzas volantes [1]

Composição e propriedade	**Central termoelétrica**	
	Sines	**Pego**
SiO_2 (%)	50,0 a 54,0	42,2 a 58,5
Al_2O_3 (%)	27,0 a 29,0	21,0 a 32,6
Fe_2O_3 (%)	5,0 a 8,0	3,5 a 9,1
CaO (%)	1,5 a 4,0	1,7 a 9,2
MgO (%)	0,5 a 2,0	0,6 a 2,6
Na_2O (%)	0,5 a 1,0	0,2 a 0,9
K_2O (%)	1,0 a 2,0	1,1 a 3,1
SO_3 (%)	0,5 a 1,0	0,2 a 1,04
Perda ao fogo (%)	2,0 a 4,0	5,6 a 9,3

A ASTM C618 [24] define 2 classes de cinzas volantes: F e C. Elas se diferenciam pelos teores de seus componentes. As cinzas de classe F possuem menor teor de CaO, tendo características mais pozolânicas através do seu teor de sílica. As de classe C possuem teor maior de CaO, fazendo com que as cinzas dessa classe tenham mais hidraulicidade e tendo características aglomerantes [2].

2.1.4 Betões com cinzas volantes

Historicamente, as cinzas volantes foram introduzidas em substituição ao cimento com intuito econômico e sustentável. O uso de cinzas volantes diminui o consumo de cimento, que é um material com a pegada ecológica maior, melhora a trabalhabilidade do betão ou argamassa, dada sua geometria aproximadamente esférica, que favorece a trabalhabilidade dos materiais cimentícios. Outra característica favorável é a pozolanicidade da mistura, gerando proteção química no caso de betão armado, já que materiais pozolânicos produzem betões menos porosos e tendem a reagir beneficamente aos ataques de sulfatos evitando as etringitas (sulfato aluminato de cálcio) tardias, que se formam de aluminato ou ferroaluminato de cálcio residual na hidratação do cimento que se combinam com os sulfatos exógenos [25]. Tudo isso porque materiais pozolânicos produzem silicato de cálcio hidratado extra que é um gel resistente que ocupa espaços na mistura.

Quadro 2.4 - Dosagem mínima de ligante para betões com e sem cinzas volantes [26]

Classes de Exposição		**Sem cinzas volantes**		**Com cinzas volantes**	
		Mínima dosagem de ligante	**Mínima classe de resistência**	**Mínima dosagem de ligante**	**Mínima classe de resistência**
Ataque por cloretos	XS1, XD1, XS2 E XD2	360 kg/m^3	C40/50	320 kg/m^3	C30/37
	XS3 E XD3	380 kg/m^3	C50/60	340 kg/m^3	C35/45
Ataque químico	XA1	340 kg/m^3	C35/45	320 kg/m^3	C30/37
	XA2	360 kg/m^3	C40/50	340 kg/m^3	C35/45
	XA3	380 kg/m^3	C40/50	360 kg/m^3	C35/45

Outra forma de evitar a etringita tardia é um teor menor de aluminato de cálcio.

De acordo com a classificação da NP EN 197-1:2012 [18], em Portugal, os cimentos CEM IV resistentes a sulfatos são adicionados de cinzas volantes e possuem teor menor que 9% de aluminato tricálcico.

O uso das cinzas volantes no betão em Portugal é regulado pelo LNEC através da especificação E 464 a permitir a substituição em parte volumétrica do cimento dos tipos CEM I ou CEM II/A [26]. As dosagens podem ser observadas no Quadro 2.4.

2.2 VIDRO

2.2.1 Produção, Reciclagem e Disponibilidade

O vidro sodo cálcico é o vidro utilizado para a produção de garrafas e será também utilizado para a produção do pó de vidro, utilizado nesta pesquisa. É feito a partir de areia com alto teor de SiO_2, Na_2CO_3 , que é material fundente, para reduzir o ponto de fusão da areia de cerca de 1710 graus Celsius para cerca de 1500 graus Celsius, e CaO [27]. No processo original de produção, para fabricar 1 tonelada de vidro de garrafas ou copos, consome-se 1,2 toneladas de matéria-prima [28]. No processo de reciclagem, para produzir 1 tonelada de vidro, consome-se 1 tonelada de vidro reciclável e menos energia para atingir o ponto de fusão do material. É conhecido como material de reciclagem teoricamente infinita, a poupar energia no fabrico original e a gerar rotatividade no consumo como pode ser visto na Figura 2.3.

Neste sentido, a coleta do vidro reciclável é diferenciada. Em Portugal, a recolha deste material, as embalagens de vidro, é feita em coletores informalmente conhecidos como "vidrões". Mesmo assim, nas centrais de reciclagem é feita uma triagem para separar o vidro de outros materiais como papéis de rótulos, alumínio e até mesmo lixo indiferenciado.

Após a triagem, há uma máquina na central de reciclagem que possui uma esteira onde o material vítreo é depositado de forma bem espalhada e *scanners* identificam as cores do vidro e com sopros de ar comprimido, separam o material.

Em apenas uma central de reciclagem visitada no distrito do Porto, fora informado que se produzia 300 toneladas de resíduo de vidro por mês.

Em Portugal, de acordo com a Sociedade Ponto Verde, refere que foi feita a recolha de 346.327 toneladas de vidro em uma razão de reciclagem/produção de vidro de 0,56, no ano de 2022 [3].



Figura 2.3 - Ciclo infinito do Vidro[29]

2.2.2 Tipos de Vidro

Há diversos tipos de vidro com diferentes estruturas e composições químicas, para diferentes finalidades como, por exemplo, vidro laminado, temperado e cristal.

O vidro borossilicato é um vidro resistente aos químicos e com baixo coeficiente de expansão sendo utilizado em recipientes farmacêuticos e toda utilização que necessite resistência às elevadas temperaturas [30]. O vidro de chumbo é denso e bastante refrativo e tem por finalidade a proteção da radiação [30]. É utilizado em utensílios domésticos como taças, decantadores, copos e demais peças de cristal [31]. O sodo-cálcico é a composição mais comum, incluindo sílica da areia siliciosa, cal viva e carbonato de sódio. Usado para produzir as garrafas de bebidas em geral, e o material utilizado neste estudo [31].

2.2.3 Vidro de Garrafas (vidro sodo-cálcico)

Os vasilhames vítreos são produzidos em diversas cores, sendo as mais correntes a verde, âmbar e branca (Figura 2.4).



Figura 2.4 - Garrafas de vidro sodo-cálcico [32]

Possuem composições diferentes de outros materiais como ecrãs, vidro de automóvel e outros como mencionado no item anterior. A composição química é semelhante entre as diferentes cores produzidas, sendo apresentado no Quadro 2.5 a composição geral das garrafas, onde "outros" são consideradas adições diversas para diferentes fins de coloração e possível proteção de conteúdo como é o caso das garrafas de vinho. É possível observar que os principais componentes são SiO_2 e Na_2O, que são fundamentais na formação de CSH como explicado no item 2.1.2, e o teor de Al_2O_3 é baixo, não aumentando a quantidade desse componente já presente no cimento e responsável pela formação de etringitas, reduzindo o risco de etringitas tardias na exposição aos iões sulfatos exógenos.

Quadro 2.5 - Composição química dos vidros sodo-cálcicos [33]

Vidro Sodo-Cálcicos	**Composição química (%)**						
	SiO_2	**Al_2O_3**	**Na_2O**	**CaO**	**MgO**	**K_2O**	**Outros**
Embalagem	72	2	12,5	11	1,5	1	-------

No Quadro 2.6, a título de curiosidade, observa-se as adições químicas de baixo teor para gerar as diferentes cores no vidro sodo-cálcico, mas que não geram nenhum produto químico em teor relevante. Sobre os vidros mais comuns, pode-se dizer que os vidros verde e marrom são produzidos com adição de óxido de ferro, o âmbar escuro com óxidos de manganês, o âmbar, marrom, com óxidos de carbono e compostos de enxofre e o branco com óxido de antimônio e compostos de estanho para garantir a homogeneidade frente às impurezas presentes na areia a ser fundida [33]. Percebe-se que o autor expõe uma paleta de cores pormenorizada por se tratar de uma pesquisa específica no fabrico de vidros. Para esta pesquisa serão adotadas as nomenclaturas correntes em outras pesquisas como as referenciadas neste trabalho, verde, âmbar e branco[1,34].

Quadro 2.6 - Adições químicas para coloração do vidro sodo-cálcico [33]

Componentes	**Cores**
Óxidos de ferro	Verde e marrom
Óxidos de manganês	Âmbar escuro, ametista, incolor
Óxido de cobalto	Azul escuro
Cloreto de ouro	Vermelho rubi
Compostos de selênio	Tons vermelhos
Óxidos de carbono	Âmbar, marrom
Mistura de manganês, cobalto e ferro	Negro
Óxidos de antimônio	Branco
Óxidos de urânio	Verde amarelado (brilha no escuro)
Compostos de enxofre	Âmbar, marrom
Compostos de cobre	Azul claro, vermelho
Compostos de estanho	Branco
Chumbo com antimônio	Amarelo

2.2.4 O Pó de Vidro Como Alternativa às Cinzas Volantes

O vidro é um material silicioso, tal qual é a cinza volante, e, da mesma forma que as cinzas podem ser utilizadas com função de fíler, ocupando espaços vazios, também podem ser utilizadas como substituição do teor de clínquer, gerando posterior comportamento pozolânico como dito no item 2.2.2 na formação de CSH extra. No entanto, uma diferença importante entre as cinzas volantes e o vidro sodo-cálcico é o baixo teor de aluminato de cálcio e ferroaluminato de cálcio, pois como também visto em 2.2.2, os iões sulfatos exógenos tendem a formar etringitas posteriores justamente com esses componentes que se formam ao se combinarem com CaO. As cinzas possuem alto teor de alumina e ferrite, maiores que o cimento, como apresentado anteriormente no Quadro 2.3. Os estudos com a adição de vidro ao cimento possuem o objetivo de identificar comportamento semelhante, a diferenciarem-se pela granulometria do grão, visto que quanto maior seu diâmetro médio, será testado como agregado [35], e quanto mais fino, será testado quanto à sua reatividade, principalmente. No entanto, partículas de vidro acima de 75 μm geram risco de reação álcali-sílica como indicam alguns estudos [34,36].

As cinzas volantes que são filtradas nas centrais termoelétricas e que são utilizadas como adição ao cimento, possuem diâmetro médio entre 7 a 12μm [1] e superfície específica entre 250 a 550 m^2 /kg [37].

Para substituição de teor de cimento é importante que o material a substituir possua comportamento semelhante ao do substituído, portanto há de ser um material com reatividade semelhante, e composição química semelhante. No caso desta pesquisa, o pó de vidro e as cinzas volantes de classe F (baixo teor de CaO).

2.2.5 Principais diferenças entre o vidro moído e as cinzas volantes

A principal diferença entre o vidro moído e as cinzas volantes é referente à sua geometria como pode ser visto na Figura 2.5 e na Figura 2.6 em fotografias retiradas de microscópio eletrônico. A geometria destes materiais exercem importante influência na trabalhabilidade das argamassas e betões e no efeito "*packing*" e de rolamento. Para tornar esta influência mais clara, pode-se imaginar o espalhamento e acondicionamento de 1 m^3 de bolas de futebol (semelhante às cinzas, Figura 2.6) e 1 m^3 de pedaços de casca de tronco de árvore,

por exemplo, pois espalhar algo que desliza uniformemente e acondicionar um conjunto de objetos com a mesma geometria é mais fácil.

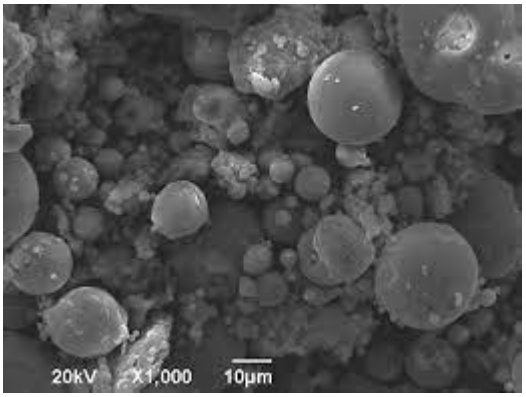


Figura 2.5 - Esferas das cinzas volantes (1.000x de ampliação) [38]

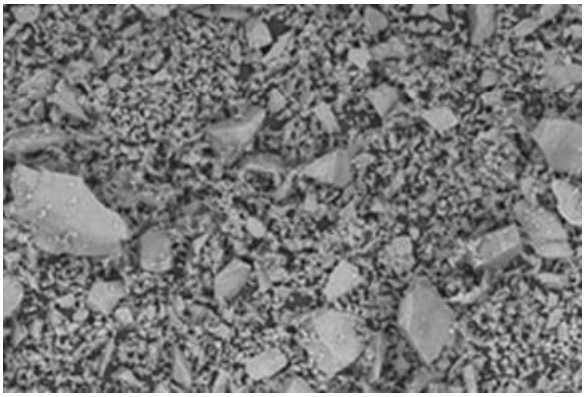


Figura 2.6 - Partículas de vidro (400x de ampliação) [39]

No entanto, ainda que se assemelhem como materiais siliciosos, possuem algumas diferenças. Quanto à origem, sendo as cinzas provenientes de vulcões ou de resíduos de centrais termoelétricas e o vidro vindo dos conhecidos "vidrões" que são coletores de vidros para reciclagem. Como apresentado anteriormente, o vidro possui ciclo de reciclagem teoricamente infinita, podendo passar pelo processo infinitas vezes. As cinzas são reaproveitamento de resíduo gerado pelas fornalhas das centrais e não possuem o mesmo ciclo que o vidro, já que necessitam da queima de novo carvão mineral para gerar novo resíduo.

No Quadro 2.7, podem ser vistas algumas diferenças nas composições químicas das cinzas volantes mais siliciosas e do vidro sodo-cálcico de acordo com suas fontes.

No que diz respeito à composição química, as cinzas possuem menor teor de sílica que o vidro, assim como de óxido de sódio (como pode ser visto no Quadro 2.7). Porém, o vidro sodo-cálcico possui menor teor de alumina. Essa condição faz com que se espere maior pozolanicidade do pó de vidro, e é um fator que motiva a pesquisa, a depender da percentagem amorfa que pode ser encontrada no material. A pozolanicidade também está condicionada ao tamanho da partícula por conta da reatividade do material [40]. O baixo teor

de alumina desfavorece a formação de aluminato de cálcio e a consequente formação de sulfato aluminato de cálcio, a etringita, como explicado no item 2.1.2.

Quadro 2.7 - Cinzas Volantes x Pó de Vidro sodo cálcico

Componentes químicos	**Cinzas Volantes Sines**[1]	**Vidro sodo-cálcico**[33]
SiO_2 (%)	50,0 – 54,0	72,0
Al_2O_3 (%)	27,0 – 29,0	2,0
Na_2O (%)	0,5 – 1,0	12,5
CaO (%)	1,5 – 4,0	11,0
MgO (%)	0,5 – 2,0	1,5
K_2O (%)	1,0	1,0

2.3 PANORAMA DAS PESQUISAS COM INCORPORAÇÃO DE VIDRO MOÍDO

2.3.1 Risco da Expansão por Reação Álcali-Sílica (RAS)

Como o vidro é um material rico em sílica, e também composto por outros álcalis como óxido de sódio e potássio, existe o risco da RAS. Isto porque, para que ocorra a RAS, basta quantidade suficiente de óxidos alcalinos que são encontrados no pó de vidro, como o dióxido de silício, o óxido de sódio e óxido de potássio, agregados reativos (como é o caso do pó de vidro rico em sílica) e humidade suficiente. Em estudos que utilizaram o pó de vidro como agregado, observou-se a formação do gel expansivo. No entanto, para Kamali e Ghahremaninezhad [36], este efeito pode ser controlado com a adição de material pozolânico, que é o caso do pó de vidro, mas a depender do tamanho de suas partículas. Segundo os autores, o pó de vidro com partículas abaixo dos 50 μm, além de não causarem os danos da RAS ainda protege os produtos cimentíceos da expansão. Isso acontece devido à característica pozolânica do pó de vidro com essa finura. Moreira [1] também realizou ensaio analisando RAS em provetes incorporados com pó de vidro 100% das partículas abaixo dos

75 µm e concluiu que não houve o risco, bem como atenuou os efeitos expansivos[1]. Esta dimensão, 75 µm, é corroborada em diversos estudos [1,40,41].

2.3.2 Influência do tamanho das partículas na reatividade

Mirzahosseini [40], constata a influência da finura do pó de vidro na reatividade em materiais cimentícios. Em três gamas diferentes de finura, em µm (0 - 25, 25 – 38, 63 – 75) limitada ao máximo de 75 µm para, também, evitar a reação álcali-sílica, foram feitos diversos ensaios de reatividade e de resistência mecânica aos quais os provetes de maior finura obtiveram melhores resultados. Foi utilizado o vidro verde por possuir mais reatividade que os outros vidros branco e âmbar, segundo o autor, e água destilada.

Na Figura 2.7 , apesar de fazer relação com a taxa de hidratação que não está sendo abordada e sendo o único gráfico de resistência à compressão presente no artigo, é possível observar e comparar a influência do tamanho das partículas nas resistências à compressão aos 28 dias, principalmente no intervalo de 0 a 25 µm do pó de vidro verde que alcançou patamares próximos a 50 MPa.

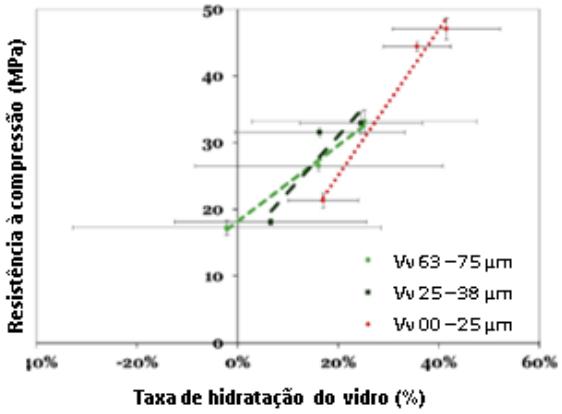


Figura 2.7 - Resistências à compressão aos 28 dias de finuras diferentes de Vidro verde (Vv)[40]

Na Figura 2.8, observa-se, consequentemente, a influência do tamanho das partículas também no índice de atividade que indica a pozolanicidade da mistura.

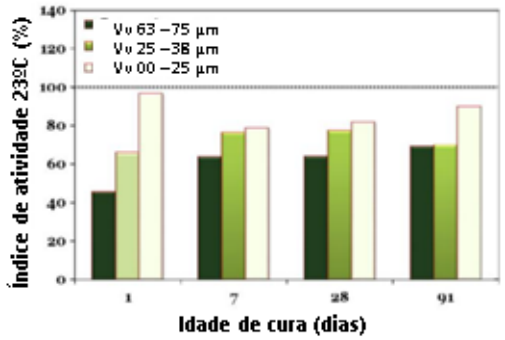


Figura 2.8 - Índice de Atividade aos 23 graus Celsius [40]

2.3.3 Substituição parcial do cimento por pó de vidro

Conforme a bibliografia atual, a maioria dos estudos envolvendo a utilização de resíduo de vidro em materiais cimentícios analisaram o comportamento do vidro moído como agregado [35,39,41,42]. Os estudos relativos à substituição de cimento por teor de pó de vidro documentados na bibliografia foram, em sua maioria, realizados em argamassas [35,39,41,42]. O que foi encontrado em comum foi a viabilidade do uso do material nas duas vertentes, substituição parcial do cimento, apresentando comportamento pozolânico, conferindo proteção aos ataques de sulfatos e também como agregado, apresentando comportamento de fíler, diminuindo a porosidade e aumentando resistências. Apesar disso, ainda há lacunas para preencher no conhecimento sobre a utilização do pó de vidro como substituto parcial do cimento, nomeadamente, sobre a percentagem de substituição. O comportamento mecânico de argamassas com elevadas percentagens de substituição precisa ser melhor explorado.

Malheiro *et al.* [34] estudaram o vidro moído e passado no peneiro de 75 µm com intuito de evitar reação álcali-sílica. Utilizou-se a massa moída passada no peneiro para misturar em argamassas. Substituindo em volume parte do cimento, o pó de vidro foi adicionado às argamassas que produziram provetes cúbicos de aresta de 20mm. A escolha deste tamanho de provete foi devida à demora na moagem do vidro, ensejando um refinamento deste processo em novos estudos. No caso deste, utilizou-se um moinho de esferas de aço, conhecido por "*Los Angeles*" que produziu pó de vidro denominado PV1, e depois, outro

moinho de esferas, porém, cerâmicas, para elevar a finura do material e produzir o PV2. O vidro utilizado foi o sodo-cálcico de cor verde. As substituições volumétricas realizadas ao cimento foram de 5%, 15%, 25%, 35% de PV1 e 25% de PV2. A razão água / ligante foi de 0,5. Neste estudo, destacaram-se os provetes com 15% PV1 e 25% PV2 de substituição. Mecanicamente, os provetes até 25% de substituição, ou seja, todos que não sejam com 35% PV1 e 25% PV1, obtiveram resistências à compressão acima dos 30MPa aos 28 dias como mostra a Figura 2.9. A maior substituição com resultado acima dos 30MPa foi a de 25% PV2.

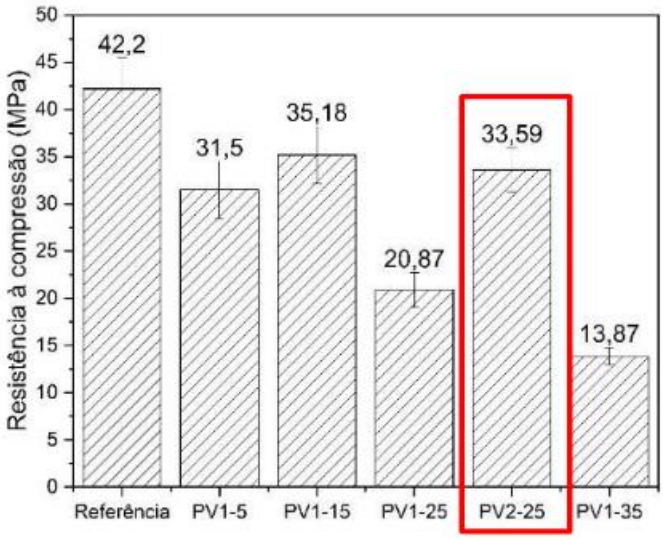


Figura 2.9 - Resistências à compressão aos 28 dias (Malheiro *et al.* 2022 [34])

Quanto à pozolanicidade do material, somente o provete moldado com PV2 obteve índice de atividade acima dos 75% aos 28 dias [23]. Este resultado está de acordo com a literatura que indica o aumento da pozolanicidade de acordo com a elevação da finura [36,40]recordando o refinamento da moagem do PV2 no moinho de esferas cerâmicas.

Matos [43] realizou pesquisa semelhante à Malheiro *et al.* [34] com substituição parcial do cimento por pó de vidro em argamassas[43]. No estudo, a substituição de cimento por pó de vidro foi de 10% e 20%. Também se comparou com provetes incorporados com sílica de fumo a 10%. Concluiu-se a possibilidade da utilização do pó de vidro na substituição de cimento e encontrou-se atividade pozolânica. Foram feitos testes de resistência mecânica de 7, 28, 90 e 180 dias e testes para aferir durabilidade como penetração de iões cloreto, carbonatação, absorção de água por capilaridade, e RAS (Reação Álcali-Sílica). Os provetes com pó de vidro tiveram resistências à compressão menores que os provetes de controlo. No

entanto, as resistências das argamassas incorporadas com vidro nivelaram-se entre elas aos 180 dias de idade como pode ser visto na Figura 2.10, onde CTL são os provetes de controlo, produzidos sem adições, SF de sílica de fumo a 10% de substituição, GP10 de pó de vidro a 10% e GP20 de pó de vidro a 20% e as idades de cura de 7, 28, 90 e 180 dias. A carbonatação foi maior nos provetes com vidro, como normalmente acontece com a inserção de materiais pozolânicos [43]. O pó de vidro utilizado tinha finura semelhante ao do cimento, com diâmetro médio de aproximadamente 10 μm, tendo sido finamente moído em moinho de bolas cerâmicas por 48 h.

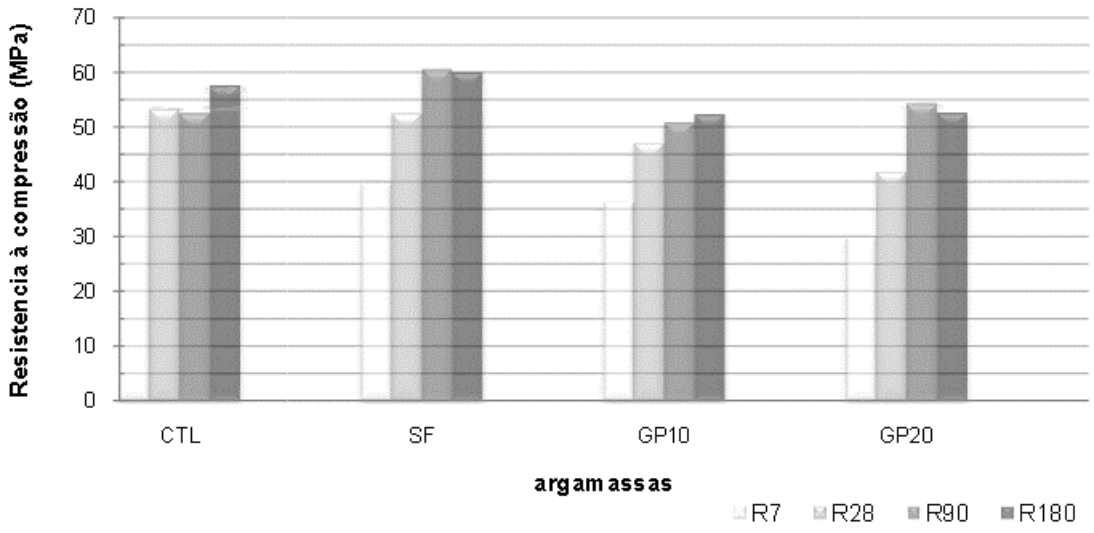


Figura 2.10 - Resistências à compressão no estudo de Matos [43]

3 METODOLOGIA

3.1 INTRODUÇÃO E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A metodologia deste trabalho será dividida em etapas diferentes, pois a primeira etapa é considerada como exploratória a qual visa esclarecer pontos importantes como tempo de moagem, finura otimizada e cor de vidro a utilizar, através da análise de resultados de resistência à compressão, que serão explicados em pormenor mais à frente. No entanto, alguns procedimentos são comuns a todas as etapas e serão apresentados a seguir. A finura do material será caracterizada apenas na segunda etapa, visto o caráter exploratório da etapa 1 apenas para definir tempo de moagem através de resultados de passados no peneiro de 63 μm. Ensaios como caracterização do pó de vidro, índice de atividade, só serão realizados com a fase exploratória concluída. Materiais como cimento e cinzas volantes, comuns a todas as etapas, serão caracterizados antes. A areias, por serem diferentes nas duas etapas, serão caracterizadas nas respetivas etapas.

3.2 PROCEDIMENTOS E MATERIAIS COMUNS ÀS DUAS ETAPAS DA METODOLOGIA

3.2.1 Caracterização do cimento e das cinzas volantes

Neste item, somente o cimento e as cinzas volantes serão caracterizados, pois são comuns a todas as etapas. O vidro será caracterizado na etapa 2, já com os objetivos exploratórios da etapa 1 satisfeitos.

Para a realização do estudo foi utilizado o cimento CEM I 42,5 R cuja caracterização física é apresentada no Quadro 3.1. Este cimento foi certificado segundo a NP EN 197-1[18]. Este tipo de cimento é composto por mais de 95% de clínquer finamente moído e com 90% dos grãos com tamanho inferior a 25 μm. O CEM I 42,5 R permite obter elevada resistência mecânica a curto prazo, elevado calor de hidratação, muito sensível ao processo de cura (no betão), este tipo de cimento permite adições de hidraulicidade latente e além destes fatores é compatível com a utilização de adjuvantes químicos por facilitar a diferenciação do comportamento peculiar do cimento e, depois, o comportamento apresentado após a utilização de adjuvantes estudados como é o caso do pó de vidro e cinzas volantes.

Os resultados dos ensaios físicos auxiliaram no dimensionamento das argamassas do estudo, permitindo comparar os resultados dessas propriedades com as do resíduo de vidro, nomeadamente as mais significativas, o peso específico, a superfície especifica do Blaine.

Quadro 3.1 – Dados relativamente ao CEM I 42.5 R dos ensaios físicos obtidos no laboratório

Norma	Tipo de análise		Valor
NP EN 196-6 [44]	Massa volúmica (g/cm^3)		3,10
NP EN 196-6 [44]	Resíduo de peneiração (%)	45 µm	3,10
		35 µm	9,60
NP EN 196-6[44]	Superfície específica de Blaine (cm^2/g)		3723
NP EN 196-3[45]	Água na pasta normal (%)		29,4
NP EN 196-3[45]	Tempo de presa (min.)	Inicio	183,00
		Fim	265,00
NP EN 196-3[45]	Expansibilidade (mm)		1

De acordo com a sua ficha técnica [20], o cimento em causa deverá apresentar resistências à compressão superiores, aos 2 dias de aproximadamente 30 MPa e aos 28 dias de 42,5 MPa.

Como é mostrado no Quadro 3.2, os valores do cimento apresentados estão inseridos nos valores esperados, assim como, também podemos visualizar no gráfico da Figura 3.1.

Quadro 3.2 – Dados dos ensaios mecânicos da ficha técnica da Secil [20]

Ensaios Mecânicos - CEM I 42,5 R		
Idade	**Resistência (MPa)**	
	Flexão	**Compressão**
2	5,60	31,80
7	7,40	46,00
28	8,50	56,80

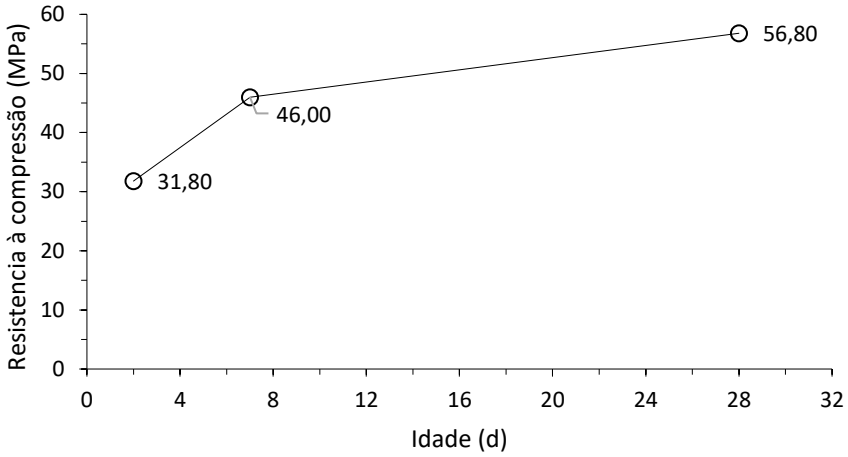


Figura 3.1 – Resistência à compressão CEM I 42,5 R SECIL

O tipo de cimento utilizado neste estudo, é composto, essencialmente e em grande parte, por óxidos de cálcio e silício, havendo outras pequenas percentagens de outros compostos de óxidos, tais como, o alumínio, ferro, magnésio, sulfatos, potássio e sódio.

A cinza volante (CV) usada no presente estudo é proveniente da queima do carvão, e foi fornecida pela Central Termoelétrica Portuguesa do Pego. Para caracterizar a cinza volante do estudo foi necessário efetuar determinados ensaios físicos e químicos, nomeadamente a distribuição granulométrica, teor de inqueimados e reatividade. Também foi abrangido neste tipo de caracterização os ensaios químicos, isto para determinar a composição química.

A determinação da composição química foi realizada pela técnica de Fluorescência de Raios X usando um espectrómetro de Axios Panalytical. Para a determinação dos parâmetros, teor de inqueimados e composição química, as amostras foram previamente moídas e secas a 105 ± 1 ºC. O valor do teor de inqueimados foi determinado num forno de Carbolite, submetendo uma amostra seca de 1,5 g a uma temperatura de 1100 ºC durante 3 h.

Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 3.3 com os valores percentuais dos componentes químicos, a comparar o cimento e as cinzas volantes usadas na pesquisa. O vidro ainda passará por etapas preliminares para determinar tempo de moagem e a cor a ser utilizada. Portanto, será caracterizado somente na última etapa após a última moagem.

Quadro 3.3 – Composição química do cimento e das cinzas volantes

CEM I 42,5 R	(%)	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO	Na_2O	SO_3	SiO_2	-	-
		5,02	60,70	3,14	0,91	2,04	0,22	3,30	21,17	-	-
CV	(%)	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO	Na_2O	SO_3	SiO_2	P_2O_5	TiO_2
		22,70	1,25	12,70	3,46	1,55	1,52	0,79	53,70	0,25	1,60

No Quadro 3.4, vêem-se as massas volúmicas do CEM I 42,5 R e das cinzas volantes da usina de Pego.

Quadro 3.4 - Massas volúmicas CEM I 42,5 R e Cinzas Volantes

CEM I 42,5 R (kg/m³)	**CV Pego (kg/m³)**
3100,0	2364,0

3.2.2 Obtenção, lavagem e secagem do vidro

As principais etapas de preparação do vidro para moagem são apresentadas a seguir. O resultado pode ser visto na Figura 3.2.

I) Obtenção: o vidro sodo-cálcico teve origem em garrafas de vidro que, inicialmente, iriam para reciclagem. As garrafas foram recolhidas em estabelecimentos locais de restauração;

II) Lavagem, secagem e arrefecimento: as garrafas foram colocadas em recipientes com água fria para descolamento dos rótulos. Após descolamento, foram lavadas com água e detergente e depois inseridas em estufas a 110 graus Celsius até secagem total. Depois, ficaram arrefecendo à temperatura ambiente.



Figura 3.2 - Garrafas prontas para moagem

3.3 ETAPA 1: ESTUDOS PRELIMINARES

3.3.1 Objetivo

A primeira etapa teve como principal objetivo definir a cor de vidro a utilizar e o tempo de moagem que conduzirá a resistência e finuras satisfatórias. Nesta etapa, foram testados provetes de argamassa com diferentes substituições parciais de cimento por pó de vidro com diferentes finuras.

3.3.2 Caracterização do agregado miúdo da etapa 1

Na etapa 1, foi utilizada areia fina para que possibilitasse a moldagem de provetes cúbicos de lado 20mm. A utilização destes cubos possibilitou a redução do consumo de todos os materiais, incluindo o pó de vidro que, conforme se irá explicar, o processo de obtenção através da moagem é bastante moroso. A areia utilizada é siliciosa, natural rolada, fina, e com máxima dimensão de 1,0 mm. No Quadro 3.5 é possível observar a caracterização química da areia.

Quadro 3.5 - Composição química (%) da areia fina [46]

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO
99,4	0,05	<0,025	0,02	0,06	0,20	0,02	0,02	0,01	-

No Quadro 3.6, é possível observar a análise granulométrica da areia e na Figura 3.3 observa-se a curva granulométrica.

Quadro 3.6 - Caracterização granulométrica da areia utilizada

Peneiros (mm)	**Retido (%)**	**Acumulado (%)**	**Passado (%)**
1,40	-	-	100,0
1,00	-	-	100,0
0,500	16,2	16,2	84,0
0,250	77,9	94,1	6,0
0,125	5,9	100,0	-
0,063	-	100,0	-
<0,063	-	100,0	-

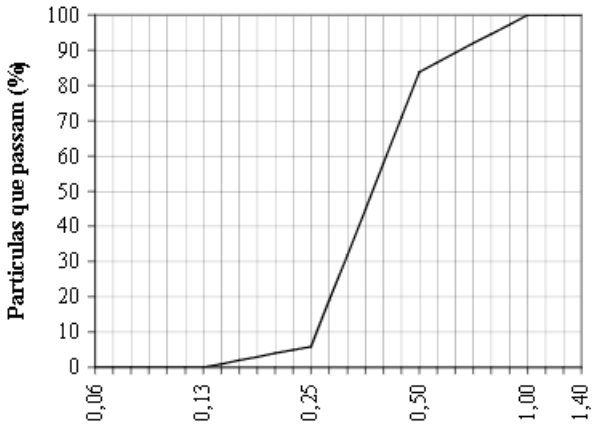


Figura 3.3 - Curva granulométrica da areia fina usada na etapa 1

3.3.3 Moagem do vidro na etapa 1

Nesta etapa do trabalho foram utilizadas garrafas de vidro com as seguintes cores: verde, âmbar e branco. O processo de moagem das garrafas de vidro utilizadas para a obtenção do pó de vidro foi executado considerando os itens a seguir:

I) Equipamento: este equipamento, tem a finalidade original de desgastar agregados para determinação de resistência à fragmentação conforme NP EN 1097-2:2012 [47], geralmente designado como ensaio de *Los Angeles* e foi utilizado para moer o vidro estudado (Figura 3.4 e 3.5). Trata-se de um moinho que realiza tombamento do material a ser moído junto às esferas de aço maciço. Possui rotação de 1700 rpm, potência de 750 W e tensão de 220 V. Giro realizado por motor elétrico [48]

II) Massa moída: 5 kg por moagem, com garrafas de vidro sendo inseridas inteiras no moinho após limpeza, secagem e pesagem (Figura 3.6);

III) Carga abrasiva: 8,411 kg (20 esferas) (Figura 3.7);

IV) Ciclo de moagem: 15 minutos;

V) Tempo de moagem para cada amostra retirada: 75 minutos;

VI) Tempo total de moagem por cor de vidro: 825 minutos



Figura 3.4 - Moinho *Los Angeles* com as 20 esferas de aço e 5kg de vidro moído



Figura 3.5 - Moinho "*Los Angeles*" (vista externa) [1]



Figura 3.6 - Pesagem da porção a ser moída



Figura 3.7 - Pesagem de massa abrasiva

3.3.4 Peneiramento

A cada 75 minutos de funcionamento do moinho, foram retiradas amostras de 100g para passar no peneiro de 63 μm (Figuras 3.8 e 3.9) com a finalidade de verificar em gráfico com quanto tempo de moagem a curva representativa da percentagem de passados começaria a estabilizar, ou seja, não se obtendo relevante crescimento no índice, ou seja, quando o gráfico começasse a tender a uma reta. Esta estabilização deu-se com 825 minutos que divididos por

75 minutos referentes ao período de extração de amostra, resultam em 11 amostras com finuras diferentes. No total, foram 33 amostras, 11 para cada cor de vidro: âmbar, verde e branco. O peneiro de 63 μm foi escolhido porque, como explicado no item 2.3.4, abaixo dos 75 μm elimina-se o risco de RAS e, quanto menor a partícula, maior reatividade. Será feito ensaio de granulometria a laser para verificar diâmetro médio das partículas e auxiliar na determinação do tempo de moagem do vidro com o qual se irá trabalhar.



Figura 3.8 – Peneiramento em 63 μm de pó de vidro âmbar de diversas finuras



Figura 3.9 - Peneiro de 63 μm com pó de vidro verde

3.3.5 Amassaduras

Foram realizadas 11 amassaduras em misturadora automática para cada cor de vidro, totalizando 33 amassaduras. Foi utilizado pó de vidro em substituição de 25% de massa de cimento, com finuras diferentes, correspondentes a diferentes tempos de moagem. Essa substituição foi realizada volumetricamente, ou seja, o volume ocupado por 25% da massa de cimento foi substituído por igual volume de pó de vidro.

Portanto, a distribuição do traço volumétrico ficou de 1 parte de cimento, 2 de areia e razão A/L de 0,5 e pode ser vista por 1 m^3 no Quadro 3.7.

Quadro 3.7 - Distribuição de quantidade de materiais (kg) em 1 m^3 de argamassa

Misturas	Percentagem incorporação de residuos (%)	CEM I 42.5 R	Areia fina	Água	Cinzas Volantes	Resíduo de Vidro		
						Vv	Va	Vb
Ref	-	**719**	1079	360	-	-	-	-
CV	25	539			135	-	-	-
Vv		539			-	149	-	-
Vc		539			-	-	149	-
Vb		539			-	-	-	149

3.3.6 Resistência à compressão

Para estabelecer o tempo de moagem ideal, foram moldados 6 provetes cúbicos de aresta 20 mm para cada amostra de vidro com finuras diferentes (Figura 3.10) recordando que os provetes numerados com o número 1 possuem pó de vidro com menos tempo de moagem (75 minutos) e, de forma crescente, os provetes possuem pó de vidro mais finos, onde os provetes de número 11 possuem maior tempo de moagem (825 minutos). O intuito não foi de identificar o mais resistente, já que se esperava que a amostra mais fina do vidro traria melhor resultado, mas identificar o menor tempo de moagem que traria resistência à compressão satisfatória, a fim de economizar energia e tempo. Na etapa seguinte, com tempo de moagem e cor de vidro estabelecidos, o ensaio de resistência à compressão será realizado em provetes prismáticos conforme NP EN 196-1:2016[49].

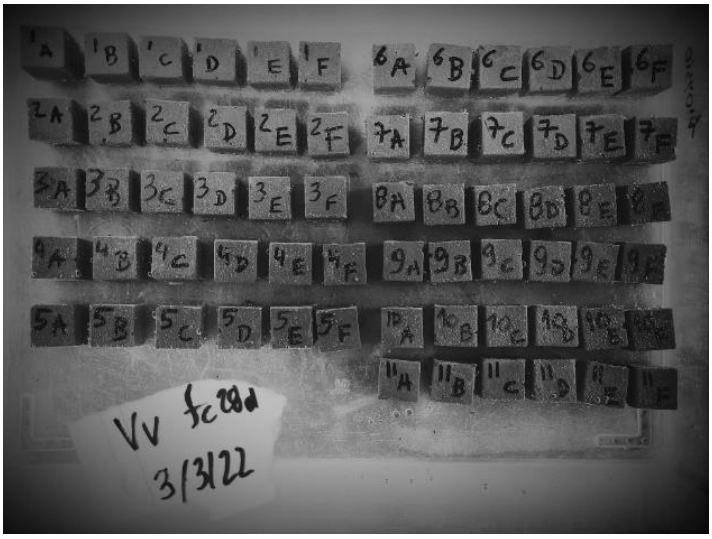


Figura 3.10 – Provetes com diferentes finuras de pó de vidro

Por se tratar da incorporação de um material com potencial pozolânico, espera-se que os resultados aos 90 dias sejam mais significativos. Contudo, considerando a limitação temporal do trabalho em causa, nesta fase, os provetes foram testados à compressão aos 28 dias. Com os resultados, viabiliza-se a execução da etapa 2.

3.4 ETAPA 2: SUBSTITUIÇÕES DE CIMENTO POR PÓ DE VIDRO E CINZAS VOLANTES

3.4.1 Objetivo

Após determinar a cor do vidro a ser trabalhado e tempo de moagem satisfatório, a etapa 2 tem o objetivo de comparar diferentes teores de substituição de cimento por pó de vidro, colocando em comparação, também, provetes com cinzas volantes incorporadas e outros sem nenhuma incorporação, sendo provetes de referência. Comparar quanto à resistência à compressão, espalhamento e pozolanicidade.

3.4.2 Definições obtidas da etapa 1

O pó de vidro a ser utilizado será de cor verde, com tempo de moagem de 675 minutos. Haverá refinamento no processo de moagem com intuito de economizar energia e tornar o pó mais heterogêneo nas fases iniciais de moagem. Os provetes serão moldados em moldes maiores em relação à primeira etapa e rompidos em prensa diferente, conforme pormenorizado nos itens a seguir.

3.4.3 Caracterização do agregado miúdo da etapa 2

A areia utilizada foi a normalizada segundo EN 196-1 [49]. Sua ficha técnica com os parâmetros físicos e químicos podem ser observados no Quadro 3.8.

Quadro 3.8 - Ficha técnica areia normalizada conforme EN 196-1[50]

Parâmetros	Data	Pontual	Min	Máx
Densidade aparente (Mg/m^3) EN 1097-6	11-nov	2,64	-	-
Absorção de água (%) EN 1097-6	11-nov	0,2	-	-
Módulo de finura (%) EN 12620	11-nov	-	2,6	2,7
Fluxo(s) de areia EN 933-6	11-nov	28		-
Teor de água (%)	17-jan	-	0,02	0,07
	17-fev	-	0,01	0,07
	17-mar	-	0,03	0,07
Teor de cloreto (ppm)	17-jan	-	< 50	
	17-fev	-	< 50	
	17-mar	-	< 50	
Teor de sílica (%)	16-jan	98,05	-	-
Teor de alumina (%) ISO 29581-2	16-jan	0,54	-	-
Teor de ferrite (%) ISO 29581-2	16-jan	0,07	-	-
Perda ao fogo 950º C EN 196-2	16-jan	0,16	-	-
Teor de fosfato (%) ISO 29581-2	16-jan	-	-	-

3.4.4 Refinamento no processo de moagem dos vidros

Com o objetivo de reduzir o tempo de moagem, sem perda das características alcançadas para o pó de vidro, optou-se por otimizar o processo de moagem utilizando, também, o moinho de mandíbulas e o de martelos (Figura 3.11). Como a finura selecionada do pó de vidro foi com 675 minutos de moagem no *Los Angeles*, decidiu-se fazer uma etapa de pré-moagem nesses 2 tipos de moinho desgastadores de agregados, com o objetivo de transformar as garrafas em cacos, tornando mais eficiente a moagem no *Los Angeles*. Passou-se o vidro duas vezes no moinho de mandíbulas, que é originalmente utilizado para desgaste de agregados através de duas placas de aço com mandíbulas que afunilam à jusante e que vibram, e duas vezes no moinho de martelos que possui uma intensidade de desgaste mais fino, visto que martelos giram através do motor central que desgasta o agregado em superfície rugosa. Esses ciclos de pré-moagem, para moer 5 kg de vidro, levam aproximadamente 10 minutos por ciclo nas mandíbulas e um minuto por ciclo nos martelos.

É possível visualizar a diferença da dimensão do vidro pré-moído nas mandíbulas por 2 ciclos, antes de ir ao moinho de martelos e ao *Los Angeles*. Com o procedimento adotado de passar a amostra, primeiro no moinho de mandibulas e posteriormente no moinho de martelos, tornou o processo de moagem no global mais eficaz, isto é, reduzindo significativamente o grão do vidro, como podemos observar nas diferentes curvas no gráfico da Figura 3.12 .



Figura 3.11 - Moinho de mandíbulas à esquerda e ao lado direito, o moinho de martelos

No final dos dois ciclos de moagem no moinho de mandíbulas, obteve-se um grão medio da partícula de 1,1 mm. Após a passagem de 2 ciclos de moagem no moinho de martelos, após

passar pelas mandíbulas e antes de ir ao *Los Angeles,* adquiriu um diâmetro médio próximo de 0,6 mm, havendo uma redução na ordem dos 40 a 50% de um moinho para outro, fazendo com que haja redução de tempo de moagem no L.A e entregando um pó mais homogêneo.

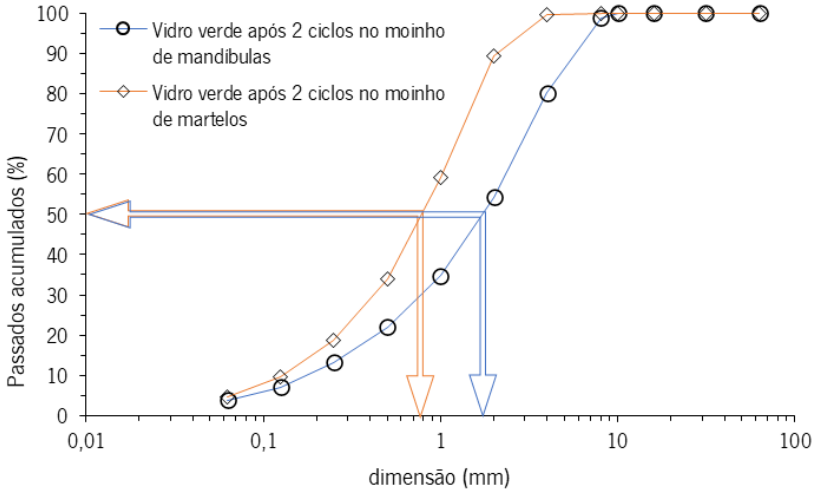


Figura 3.12 – Análise granulométrica das moagens realizadas nos moinhos de mandíbulas e martelos

Após a pré-moagem, pesou-se o produto desta pré-moagem para que fossem separados 5 kg dessa massa moída, para inserir no *Los Angeles*. Ao longo, das moagens no *Los Angeles*, por amostragem, era retirada amostra para passar no peneiro de 63µm com o intuito de identificar com quantos minutos de moagem no *Los Angeles*, neste processo que inclui a pré-moagem, terá a mesma percentagem de passados no mesmo peneiro, aos 675 minutos, no processo da Etapa 1 que excluía a pré-moagem. Ou seja, como na Etapa 1, aos 675 minutos de moagem obteve-se 80% de passados no peneiro, na Etapa 2, com a pré-moagem, se quis identificar com quantos minutos no *Los Angeles* o pó de vidro verde teria o mesmo índice de 80% de passados. Isto ocorreu aos 555 minutos. Assim, a inclusão da pré-moagem tornou o processo mais eficiente, reduzindo o tempo de moagem em 120 minutos no *Los Angeles*.

O processo final de moagem da etapa 2 ficou composto por 2 ciclos do vidro verde no moinho de mandíbulas, mais 2 ciclos no moinho de martelos, mais 555 minutos no moinho *Los Angeles*, como pode ser visto no resumo do Quadro 3.9.

Quadro 3.9 - Resumo do refinamento da moagem do vidro

Etapa 1		Etapa 2	
Equipamentos	**Tempo**	**Equipamentos**	**Tempo / Ciclo**
Los Angeles	675 minutos	Mandíbulas	10 minutos/ 2 ciclos
		Martelos	1 minuto/ 2 ciclos
		Los Angeles	555 minutos/ 37 ciclos

O pó de vidro verde, após o refinamento conforme apresentado no Quadro 3.9, será chamado de "Vv_f" quando for reduzido à sigla, que significa pó de vidro final.

3.4.5 Caracterização do pó de vidro

A granulometria da massa moída final foi realizada a laser, conforme ISO13320:2020[51]. Os tamanhos das partículas são medidos através da difração do laser bem como sua distribuição. Partículas grandes tendem a gerar uma difração angular pequena do laser e distribuição de tamanho pequeno devida à pequena área de contacto entre as partículas, ou superfície específica pequena. Já as partículas pequenas tendem a gerar ângulos maiores e ampla distribuição do seu tamanho devida à grande área de contacto entre as partículas, ou superfície específica grande.

Para caracterização dos materiais, em relação às massas volúmicas reais de cada, foi utilizada a técnica normalizada pela NP EN 1097-6:2004[52] com a utilização de um balão volumétrico e gasolina. Dessa forma, é possível relacionar o volume ocupado por determinada massa do grão no material avaliado.

3.4.6 Amassaduras

Nesta etapa, as amassaduras são voltadas a análises mecânicas e químicas de diferentes teores de incorporação do pó de vidro, de uma só cor, e com a finura baseada em um só tempo de moagem, todos definidos pela análise dos resultados da etapa 1 e pormenorizados no capítulo de resultados.

Assim sendo, decidiu-se fazer incorporação de 25% e 35% de vidro verde, para haver comparação com substituição normalizada e corrente de cinzas volantes. Para ampliar o

campo analítico foram também avaliadas as seguintes taxas de substituição: 5%, 15%, 50%, 70% e 95%.

Então, totalizou-se em 10 amassaduras, sendo elas: REF (sem incorporação), 25% e 35% de cinzas volantes e 5%, 15%, 25%, 35%, 50%, 70% e 95% de vidro verde final (Vv_f) com a finura correspondente ao processo de moagem explicado no item 3.4.4 As composições das misturas para provetes de 40 mm x 40 mm x 160 mm podem ser consultadas no Quadro 3.10.

Relembra-se que a contabilização do cimento a substituir foi efetuada em massa. Mas, o volume correspondente à massa de cimento a substituir foi calculado e foi reposto igual volume de cinzas volantes ou vidro verde. É por isso que as massas de Vv_f e de CV apresentadas no Quadro 3.10 para 25 e 35% de substituição de cimento não coincidem, uma vez que as massas volúmicas do Vv_f e das CV são diferentes.

Quadro 3.10 – Dimensionamento, em gramas, das misturas de argamassas

Misturas	CEM I 42,5	Areia	Água	CV	VV_f
Ref	450	1350	225	-	-
25CV	338	1350	225	85	-
35CV	293	1350	225	119	-
5 Vv_f	428	1350	225	-	19
15 Vv_f	383	1350	225	-	56
25 Vv_f	338	1350	225	-	93
35 Vv_f	291	1350	225	-	132
50 Vv_f	225	1350	225	-	186
70 Vv_f	135	1350	225	-	261
95 Vv_f	23	1350	225	-	354

3.4.7 Trabalhabilidade da argamassa no estado fresco (espalhamento)

O ensaio de espalhamento foi feito para avaliar a trabalhabilidade da argamassa. Este ensaio é muito útil para determinar se a argamassa será fácil ou difícil de aplicar, ou de moldar. Quanto mais a massa espalhar, significa que mais plástica é a argamassa, observando seu limite de plasticidade para não atingir o limite de liquidez e segregar. Mais fácil de espalhar, de moldar e de manusear. Quanto menor for o espalhamento, mais difícil é de manusear a argamassa, de aplicá-la em cantos, de moldar. Espera-se que a argamassa com substituição parcial de cimento por cinzas volantes seja mais trabalhável que a argamassa de referência

(não substituída), por já ser um comportamento conhecido e bem estudado na incorporação deste material, já que as cinzas volantes possuem geometria esférica [53]. Diferente das cinzas volantes quanto à geometria, o pó de vidro possui geometria bastante angulada. Por ser moído com bastante finura, espera-se alta superfície específica, maior trabalhabilidade que a referência, mas menor que as argamassas incorporadas com cinzas, por conta da diferença geométrica do grão.

Para realizar esse ensaio será utilizado o método descrito na EN 1015-3[54]. A medição final do espalhamento é determinada através de duas medidas perpendiculares entre si, como mostra a Figura 3.13.



Figura 3.13 - Medição de espalhamento de argamassa em estado fresco

3.4.8 Resistência à compressão de diferentes teores de incorporação

O procedimento a adotar será o mesmo adotado na etapa 1, descrito no item 3.3.6, mas com provetes com diferentes incorporações de pó de vidro, cinzas volantes e sem incorporação, referência.

3.4.9 Índice de Atividade

Conforme a NP EN 450-1:2012 [23], com os dados de resistência à compressão, consegue-se calcular indiretamente o índice de atividade pozolânica, definido como a comparação percentual da resistência à compressão do provete desejado (com 25% de substituição do cimento pelo material a estudar) em relação ao provete de referência. No caso desta pesquisa, comparar os provetes incorporados aos de referência, sem incorporação de adições, conforme a equação 3.1 .

$$IA = \frac{fck\ elemento\ amostral}{fck\ ref.} X\ 100 \quad \text{(eq. 3.1)}$$

De acordo com a NP EN 450-1, um resultado satisfatório é quando o elemento amostral apresentar valores percentuais acima de 75% de índice de atividade aos 28 dias para considerar o material incorporado, pozolânico. Aos 90 dias, para ser considerado pozolânico, necessita indicar percentual superior a 85% de índice de atividade.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 RESULTADOS DA ETAPA 1 (ESTUDOS PRELIMINARES)

Como a etapa 1 tem a finalidade de estudar diferentes finuras de pó de vidro e o seu impacto nas resistências mecânicas das argamassas, os itens subsequentes apresentarão gráficos de peneiramento e resistência à compressão das 3 cores de vidro em função dos tempos de moagem.

4.1.1 Finura do pó de vidro

Com a moagem realizada apenas no moinho *Los Angeles*, verificou-se o início da estabilização da dimensão das partículas a partir aproximadamente dos 600 minutos de moagem (Figura 4.1) com a percentagem de passados no peneiro de 63 µm. À medida que se realizava mais tempo de moagem, dos diferentes tipos de vidros, verificava-se um aumento acentuado da estabilização, tal como se nota no comportamento das curvas na Figura 4.11. Com um comportamento bastante semelhante entre todos vidros e com uma tendência para estabilização verificada, optou-se por encerrar a moagem aos 825 minutos, como explicado no capítulo 3.

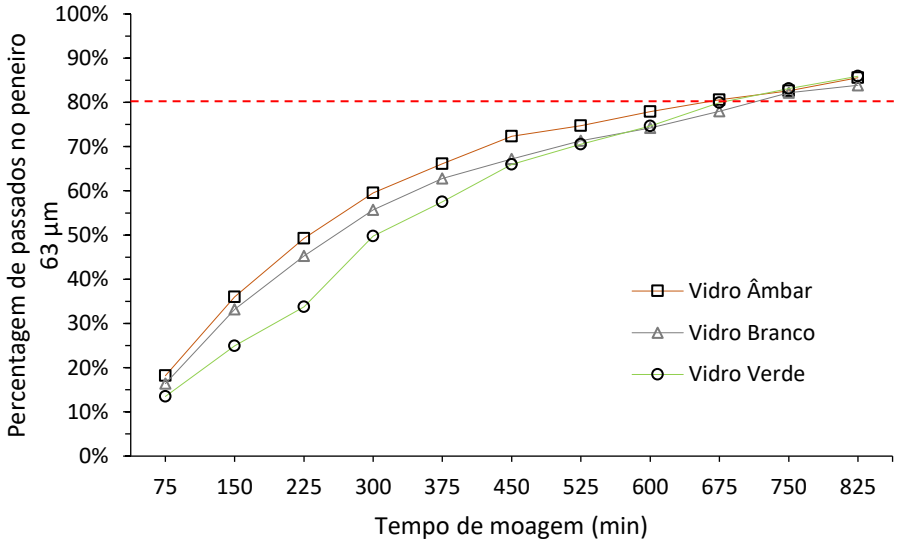


Figura 4.1 - Gráfico de passados das três cores de vidro no peneiro de 63 µm

Pode ser observado o comportamento dos três tipos de vidros ao longo da moagem. Os três vidros possuem praticamente a mesma evolução de passados no peneiro de 63 µm, tal como verifica-se graficamente nas curvas presentes na Figura 4.1. No entanto, o vidro verde destaca-se com uma mais ligeira rigidez, uma maior dificuldade em partir nos tempos iniciais, verificada ao longo da moagem. No Quadro 4.1, vêem-se os valores obtidos.

Quadro 4.1 - Percentagem de passados no peneiro de 63 µm

Tempo Moagem (min)	Passados por cor de vidro		
	Vv	Vb	Va
75	13,5%	16,4%	18,2%
150	24,9%	33,2%	36,0%
225	33,1%	45,4%	49,3%
300	49,0%	55,7%	59,5%
375	58,5%	62,8%	66,1%
450	66,0%	67,2%	72,3%
525	70,5%	71,3%	74,7%
600	74,6%	74,2%	77,9%
675	79,2%	78,0%	80,6%
750	83,0%	82,2%	82,6%
825	86,0%	83,9%	85,6%

Na Figura 4.2, tal como era esperado, verificamos pelas curvas granulométricas do vidro verde, uma diminuição do tamanho da partícula à medida que aumentava o tempo de moagem do material. As curvas granulométricas do CEM I e das cinzas volantes são, também, apresentadas na Figura 4.2 como referência.

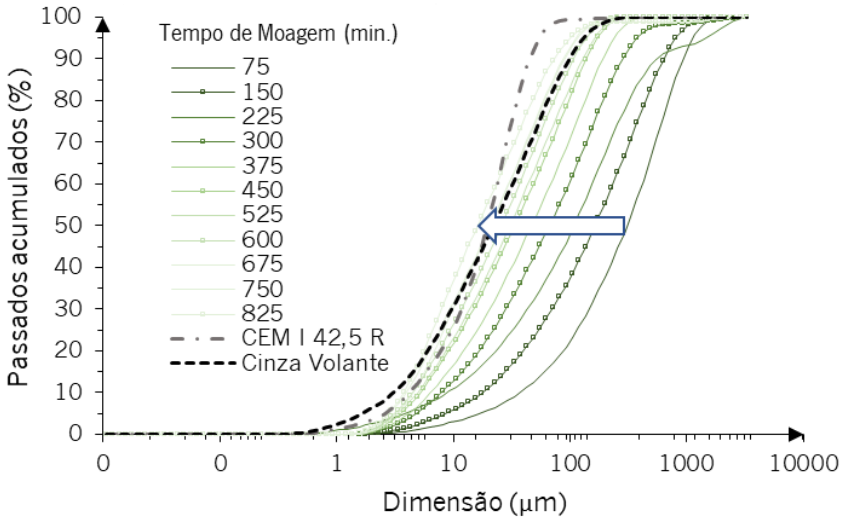


Figura 4.2 – Curvas granulométricas dos diferentes tempos de moagem, juntamente com a cinzas volantes e o cimento

Em termos percentuais, desde o tempo 75 até aos 825 minutos, houve uma diminuição da partícula na ordem do 93,93%, isto é, diminui de 321,00 µm até 19,50 µm em termos de diâmetro médio (D50), como pode ser visto na Figura 4.3.

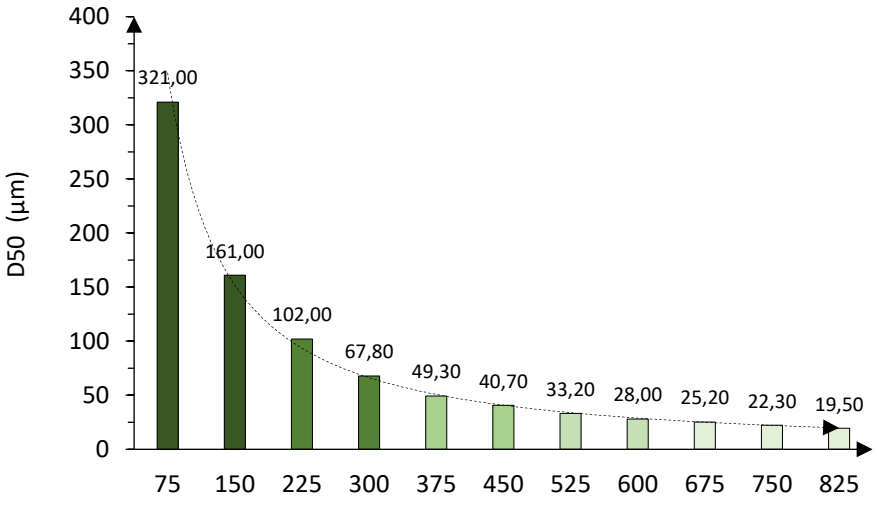


Figura 4.3 – Alteração do D50 (mm) com os diferentes tempos de moagem do vidro

Na Figura 4.4, pode-se observar o aumento da superfície específica do vidro verde ao longo do tempo de moagem e a diminuição do diâmetro médio. É curioso que na passagem de 150 a 225 minutos de moagem, ao invés da superfície específica do pó de vidro crescer, reduz.

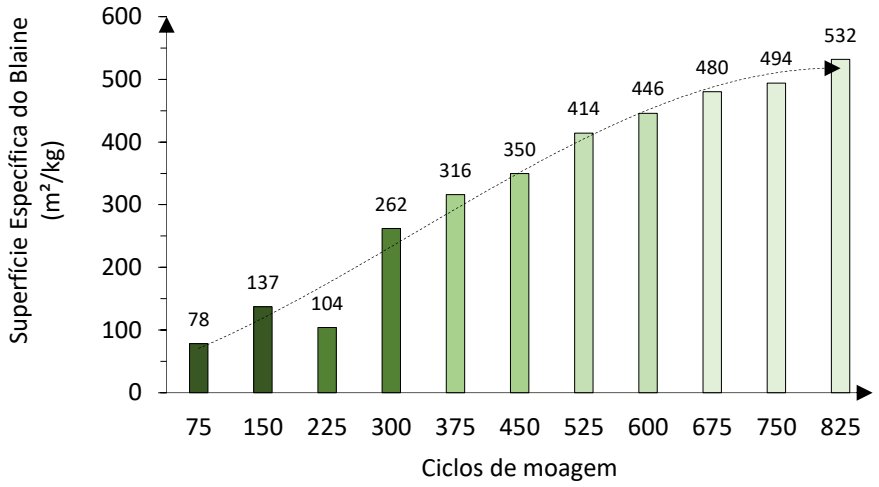


Figura 4.4 – Variação do aumento da Superfície Específica do Blaine (m^2/kg) com o aumento da moagem do vidro

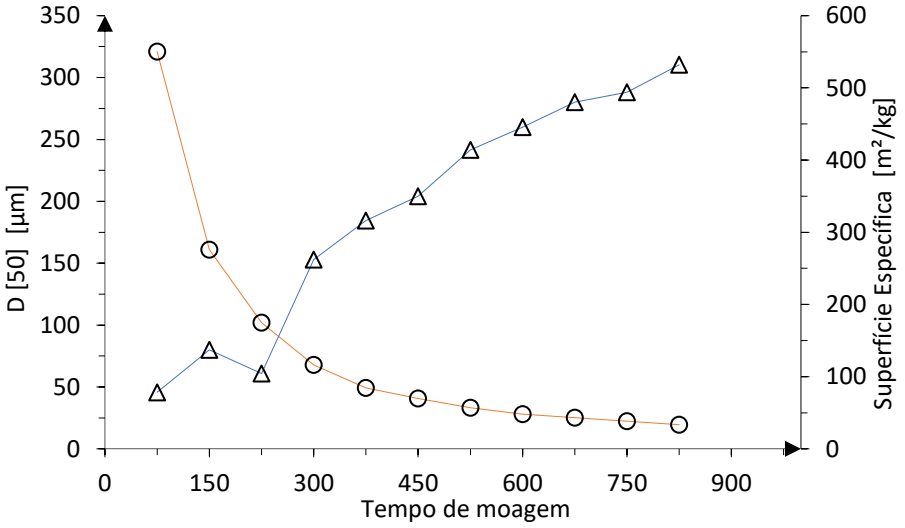


Figura 4.5 – Relação da dimensão média D [50] [µm] com a superfície específica do Blaine (m^2/kg) com o aumento do tempo de moagem do vidro

Como o *Los Angeles* é um moinho por tombamento das esferas de aço e do material a moer, pode ser que haja uma heterogeneidade na moagem a cada vez que o pó é tombado e rearranja-se. Na Figura 4.5, observa-se a redução das partículas ao longo do tempo de moagem, assim como, o aumento da superfície específica.

4.1.2 Resistência à compressão

No Quadro 4.2, podem ser vistas as resistências médias à compressão entre provetes cúbicos para cada tempo de moagem do vidro verde. Nos Quadros 4.3 e 4.4, as resistências para as outras cores de vidro. A média das resistências é satisfatória em termos de valor global. No entanto, foi observado um comportamento atípico, sendo possível constatar uma alternância nos resultados entre os tempos de moagem. Por exemplo, com uma hora e quinze minutos de moagem há o resultado médio dos provetes de 26,73 MPa. Em seguida, dobrando o tempo, a resistência aumenta. Triplicando o tempo de moagem, obtendo pó mais fino, ao invés de aumentar, diminuiu. Muitas hipóteses foram levantadas porém, a mais consistente está relacionada com as misturadoras utilizadas para a produção das argamassas. As amassaduras foram feitas aos pares, na misturadora A e na B. Então, a amassadura contendo o pó de vidro com 1,25 h de tempo de moagem foi realizada em uma misturadora e a contendo o pó com 2,50 h de moagem em outra misturadora. O que se observou posteriormente é que elas tinham rotações ligeiramente diferentes e as pás da mistura estavam em condições de conservação distintas. Estas condicionantes podem ter alguma influência sobre estes resultados. No entanto, há uma tendência global ligeiramente crescente, mas praticamente estável, quando traçada a linha de tendência, como pode ser observado na Figura 4.6, assim como a alternância. Os provetes produzidos com vidro verde na misturadora A tiveram a maior resistência média, entre 28 e 37 MPa, do que aqueles produzidos na misturadora B, entre 27 e 33 MPa, e os valores obtidos podem ser observados nos Quadros 4.1 com cores diferentes para diferenciar as misturadoras originárias. Nos Quadros 4.2 e 4.3 são observáveis os resultados para vidro branco e vidro âmbar respetivamente, assim como nas Figuras 4.7 e 4.8 os respetivos gráficos.

Quadro 4.2 - Resistência à compressão dos provetes com pó de vidro verde aos 28 dias

Tempo de moagem (min)	Tensão à compressão (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de Variação (%)	Média (MPa)
75	26,73	1,84	6,88%	30,88
150	34,02	1,18	3,48%	
225	27,43	1,39	5,07%	
300	36,28	2,10	5,80%	
375	27,94	2,94	10,52%	
450	34,26	1,76	5,14%	
525	28,47	2,18	7,64%	
600	33,98	2,19	6,44%	
675	31,56	3,14	9,97%	
750	30,52	3,94	12,92%	
825	28,54	2,85	9,97%	

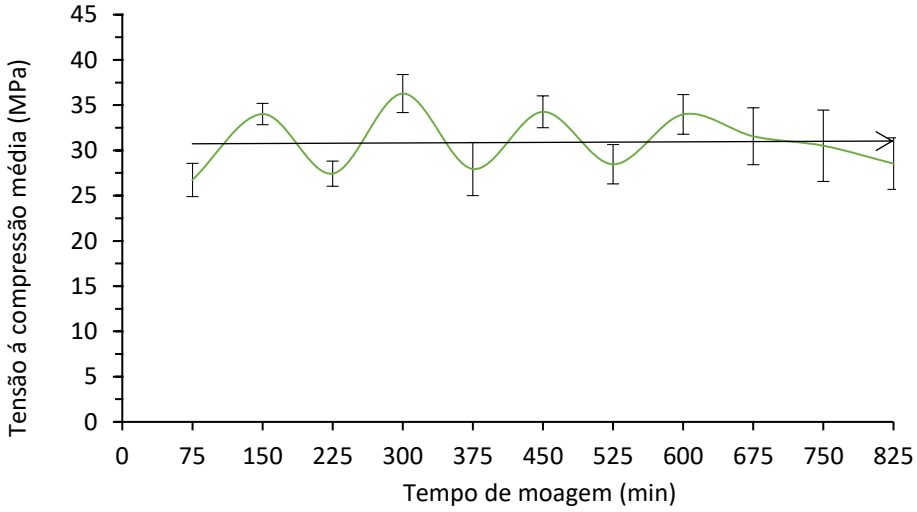


Figura 4.6 - Tensão à compressão (aos 28 dias) dos provetes com pó de vidro verde e 25% de substituição

Quadro 4.3 - Resistências à compressão dos provetes de vidro branco aos 28 dias

Tempo de moagem (min)	Tensão à compressão (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)	Média (MPa)
75	33,66	2,87	8,53%	33,38
150	28,55	1,57	5,49%	
225	30,66	4,31	14,07%	
300	24,96	2,90	11,62%	
375	37,62	3,23	8,59%	
450	34,66	0,91	2,64%	
525	36,27	4,67	12,87%	
600	32,51	2,05	6,32%	
675	37,72	2,50	6,62%	
750	32,61	3,59	11,00%	
825	37,96	0,72	1,90%	

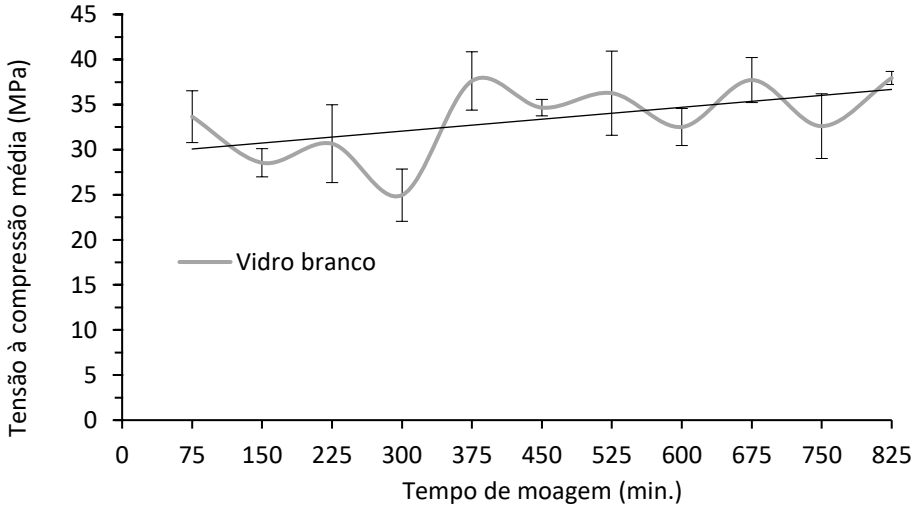


Figura 4.7 - Tensão à compressão (aos 28 dias) dos provetes com pó de vidro branco e 25% de substituição

Quadro 4.4 - Resistências à compressão dos provetes de vidro âmbar aos 28 dias

Tempo de moagem (min)	Tensão à compressão (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)	Média (MPa)
75	33,62	2,27	6,75%	31,12
150	24,92	2,19	8,79%	
225	30,86	2,12	6,88%	
300	26,16	0,63	2,41%	
375	34,72	1,06	3,05%	
450	31,99	2,32	7,25%	
525	25,73	1,76	6,85%	
600	29,79	2,10	7,05%	
675	32,17	2,32	7,22%	
750	34,69	1,27	3,67%	
825	37,69	2,84	7,54%	

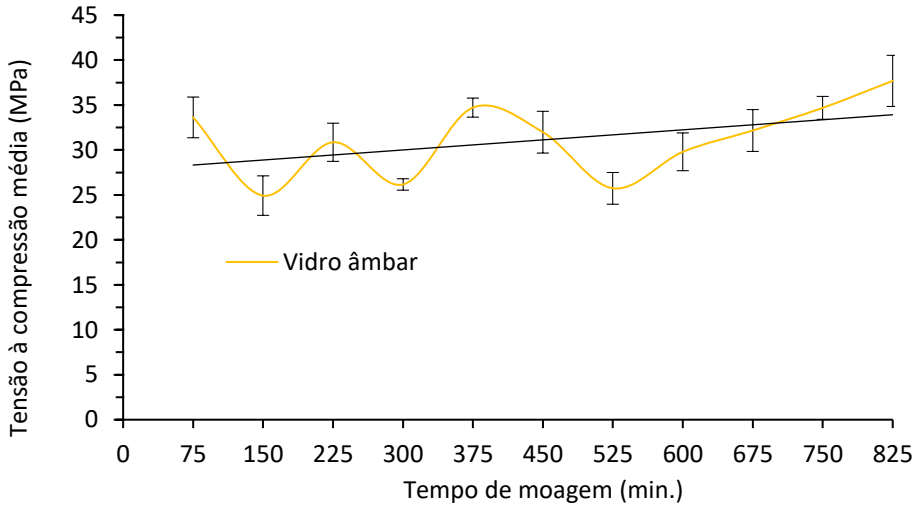


Figura 4.8 - Tensão à compressão (aos 28 dias) dos provetes com pó de vidro âmbar e 25% de substituição

4.1.3 Conclusão dos estudos preliminares

Por tratar-se de fase exploratória para escolha da cor de vidro e finura, observando ligeiro aumento de resistência dos provetes concomitante ao aumento do tempo de moagem, não se encontrou vantagem considerável em moer demasiadamente o vidro. Também,

encontrou-se certo equilíbrio entre os resultados médios das três cores de vidro. A cor verde fora escolhida por uso corrente na bibliografia [34,36,40,43]. A tendência de crescimento da resistência em relação ao tempo de moagem vai ao encontro das hipóteses iniciais do trabalho e aos resultados encontrados na literatura [34,40]. Neste sentido, e tendo como base os resultados apresentados, optou-se por utilizar o pó de vidro verde com o índice de passados de 79,2% atingido aos 675 minutos de moagem, correspondendo à finura de diâmetro médio de 25,20 μm, para a continuação da pesquisa.

4.2 RESULTADOS DA ETAPA 2 (SUBSTITUIÇÕES)

4.2.1 Caracterização do ligante

Após refinamento de moagem e o pó de vidro final definido em todas as suas características foi possível obter a caracterização dos elementos do ligante usados para as misturas que serão incorporadas com pó de vidro e cinzas volantes.

No Quadro 4.5 , é possível analisar comparativamente o cimento, as cinzas e o pó de vidro verde final (PV_f). Neste quadro, é possível observar que os resultados da granulometria a laser corroboram com a teoria mencionada acima. As curvas granulométricas permitirão a análise de parâmetros como D10, D50 e D90. Uma vez que D50 representa o diâmetro médio das amostras, D10, o diâmetro de 10% e D90 o diâmetro de 90%, possibilita-se algumas análises. Observando o D50 das três amostras, percebemos que o cimento possui o menor tamanho médio. O cimento também possui mais finos em comparação aos outros dois materiais que são similares em seu perfil granulométrico, com índices de grossos e finos parecidos. Entre o pó de vidro verde e o cimento, quem possui o menor grão tem menor superfície específica, ou seja, o cimento. No entanto, comparando o cimento às cinzas volantes, as cinzas com o perfil mais grosso, ainda possui maior superfície específica. Levanta-se a hipótese da geometria do grão que fora mencionada anteriormente neste trabalho, uma vez que as cinzas volantes possuem formato esférico e em sua maior parte, padronizado. Os grãos do cimento possuem formato mais irregular, ora um grão de cimento podendo gerar uma difração angular menor, ora maior a depender da área de contacto com o laser e sob a irregularidade do grão.

Fica interessante destacar que, como as cinzas volantes e o pó de vidro entre 600 a 800 kg/m^3 a menos que o cimento, quanto maior o teor de substituição, resultará em um betão mais leve.

Quadro 4.5 – Comparativo entre os grãos de pó de vidro, cinzas volantes e cimento

Propriedades	**Unid.**	**Vv_f**	**Cinzas Volantes**	**CEM I 42,5 R**
Superfície específica	[m^2/kg]	480	740	599
Massa volúmica	[kg/m^3]	2530	2364	3100
D [10]	[µm]	4,80	3,53	4,68
D [50]		25,20	24,00	21,90
D [90]		109,00	109,00	54,60

Fora verificado que o diâmetro médio das partículas neste tempo de moagem, 675 minutos, apresentou semelhança com o cimento e as cinzas volantes como é demonstrado no Quadro 4.5.

4.2.2 Comportamento no estado fresco

Seguindo a metodologia descrita no capítulo 3, o comportamento no estado fresco das composições desenvolvidas foi avaliado por intermédio da realização do ensaio de espalhamento de acordo com BS EN 1015-3:1999 [54]. Obtiveram-se os resultados para cada incorporação e argamassa de referência, apresentados no Quadro 4.6.

Observa-se no Quadro 4.6 que os maiores espalhamentos, como esperado, são das argamassas incorporadas com cinzas volantes (entre 224 mm e 231 mm), devido à sua finura e à sua geometria esférica [38]. No entanto, as argamassas com substituição parcial de cimento por pó de vidro também conferem à argamassa maior trabalhabilidade (entre 215 mm e 223 mm) que a argamassa de referência (208 mm), porém não superam as incorporadas com cinzas volantes.

Quadro 4.6 – Valores do espalhamento dos diferentes tipos de argamassas do estudo

Misturas	Comprimentos (mm)		Média
	L1	L2	
REF	210	205	208
25% CV	231	226	229
35% CV	230	224	227
5% Vv	217	216	217
15% Vv	217	215	216
25% Vv	216	217	217
35% Vv	220	216	218
50% Vv	219	222	221
70% Vv	226	223	225
95% Vv	215	223	219

Levanta-se a hipótese da geometria angulosa das partículas de vidro que, quanto menores forem, maior superfície específica apresentará. No entanto, por serem angulosas [36] tendem a fazer menor efeito "*packing*" que as cinzas volantes, que consiste no encaixe das partículas com redução de vazios entre elas, espalhando menos a argamassa. Adicionalmente, o efeito de rolamento é mais propício nas argamassas com cinzas volantes que, por serem esféricas, possibilitam um rolamento maior das partículas que na argamassa com pó de vidro que possuirão partículas mais angulosas e menos rolantes.

4.2.3 Resistência à compressão no estado endurecido

As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam os resultados de resistência à compressão aos 28 e 90 dias, respectivamente, para as argamassas de referência, com substituição parcial de cimento por cinzas volantes e por pó de vidro verde (finura D50 = 25,20 µm) em diferentes percentagens.

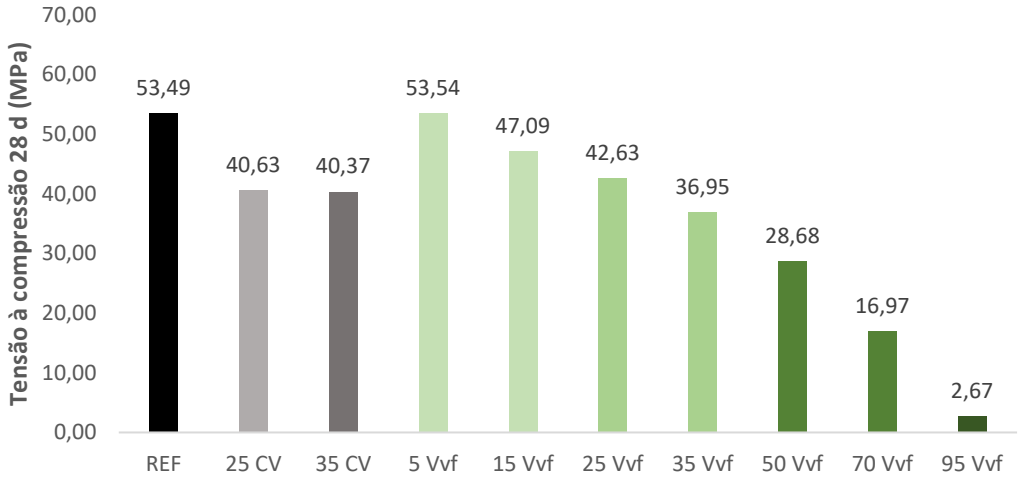


Figura 4.9 - Resistência à compressão dos provetes de argamassa aos 28 dias

No que diz respeito a substituição parcial de cimento por pó de vidro, observa-se uma tendência (quase linear) para redução da resistência à compressão com o aumento desta substituição. Olhando para os extremos, 5% de substituição de cimento por pó de vidro alcança uma resistência, tecnicamente, igual ao provete de referência. Já os 95% de substituição apresenta um valor extremamente baixo, o que impossibilita a sua aplicação inclusive na maioria das situações menos exigentes em engenharia civil.

Comparado os resultados obtidos para o pó de vidro e para as cinzas volantes, considerando as mesmas percentagens de substituição e as mesmas condições de ensaio, as argamassas com pó de vidro apresentam um desempenho bastante satisfatório. Considerando 25% de substituição, as argamassas com pó de vidro apresentam valores de resistência à compressão 5% maiores do que as argamassas com cinzas. No caso dos 35% de substituição há uma redução na resistência à compressão, apenas 8% (de considerar que este valor pode ser "absorvido" pelo desvio padrão).

As maiores resistências aos 28 dias foram dos provetes de referência e do provete incorporado em 5% de vidro verde, superando a marca de 50 MPa (Figura 4.9). A partir deste ponto, com o provete incorporado resultando em uma resistência maior, colocou-se em questão analisar em estudos futuros o consumo de hidróxido de cálcio para verificar se a pequena diferença, que se encontra dentro de uma margem aceitável de erro, poderia ser resultado de maior formação de CSH, o silicato de cálcio hidratado. No entanto, o que mais chama atenção nestes resultados é que nesta idade, substituição de cimento por 70% de pó de vidro verde alcançou uma resistência à compressão bem próxima dos 20MPa. Então, colocou-se outra questão: qual será o incremento na resistência à compressão destes provetes aos 90 dias de idade, visto que se espera a interação das sílicas amorfas com os hidróxidos de cálcio, diminuindo a porosidade e aumentando a resistência? A Figura 4.10 apresenta os resultados aos 90 dias para todas as argamassas estudadas.

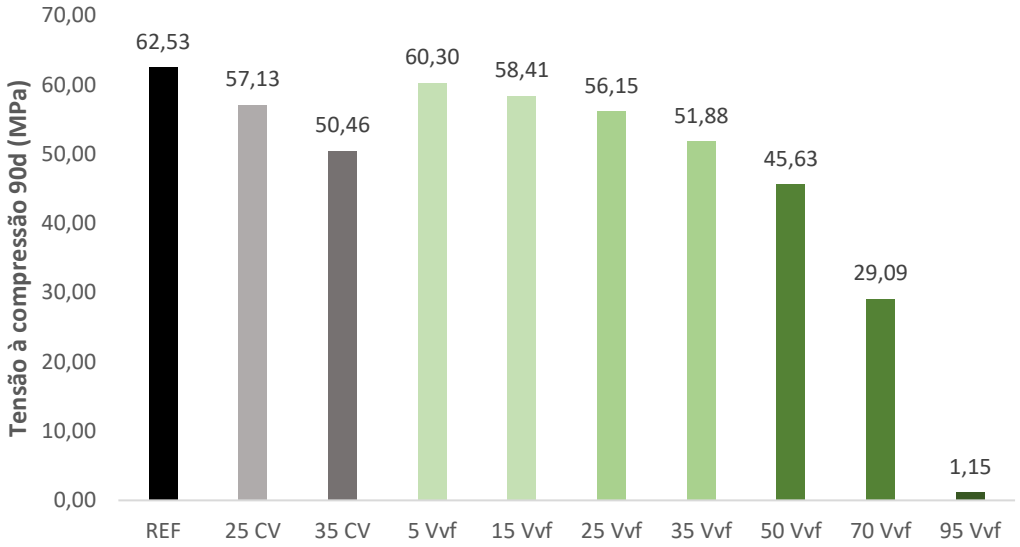


Figura 4.10 - Resistência à compressão aos 90 dias

A Figura 4.10 mostra que a tendência para redução da resistência à compressão com o aumento da substituição parcial do cimento por pó de vidro, identificada aos 28 dias, permanece aos 90 dias. Porém, chama a atenção que a amostra com o cimento substituído em 70% pelo pó de vidro verde atingiu um aumento de aproximadamente 72% na resistência à compressão. Considerando o facto da amostra só ter 30% do ligante sendo cimento que, como explicado no item de hidratação do cimento, as fases alites e belite, que basicamente são silicatos de cálcio, conferem a resistência ao cimento hidratado, sendo a alite nos primeiros 28 dias e a belite após os 28 dias até 1 ano, levanta-se a hipótese do silicato de cálcio presente no pó de vidro ter consumido o hidróxido de cálcio presente na mistura a ponto de elevar quase ao dobro a resistência à compressão de 28 para 90 dias. A título de comparação, os provetes de referência, sem nenhuma substituição, no mesmo período, tiveram resistência à compressão elevada em aproximadamente 17%. As cinzas volantes, por exemplo, substitutas em 25% do volume de cimento, apresentam aproximadamente 41% de elevação na resistência à compressão de 28 a 90 dias de idade. Quando as cinzas substituem em 35%, apresentam elevação de resistência à compressão de apenas 25% entre os períodos de 28 e 90 dias entre elas mesmas.

No entanto, todas as amostras incorporadas, desprezando a com 95% de substituição, apresentaram um índice de elevação na resistência mecânica bastante maiores em comparação às de referência entre os 28 e 90 dias. É sabido que as etringitas são formadas nas primeiras idades, fazendo com que as hipóteses se direcionem à formação de CSH com o silicato de cálcio proveniente das incorporações.

É possível observar um desempenho mecânico muito satisfatório, apresentando elevação da resistência de 11 MPa em média, aproximadamente, entre quase todos os provetes com 28 dias e 90 dias de idade. Os provetes de referência tornam-se os mais resistentes, mas os provetes incorporados apresentam maior crescimento na resistência à compressão dos 28 aos 90 dias. Na Figura 4.11, pode-se observar a elevação nas resistências, com exceção dos 95% de substituição por pó de vidro, que apresentou resultado negativo por ser um provete praticamente feito todo de pó de vidro e estar desintegrando-se aos 90 dias. Praticamente todas as amostras com pó de vidro, excluindo-se a 95 Vv_f, tiveram elevações maiores que a da referência, com exceção da 5 Vv_f, visto que o ligante é praticamente todo composto de cimento. No entanto, comparando as incorporações de 25%, as cinzas volantes tiveram maior crescimento que o pó de vidro, e nas de 35%, o pó de vidro elevou mais sua resistência.

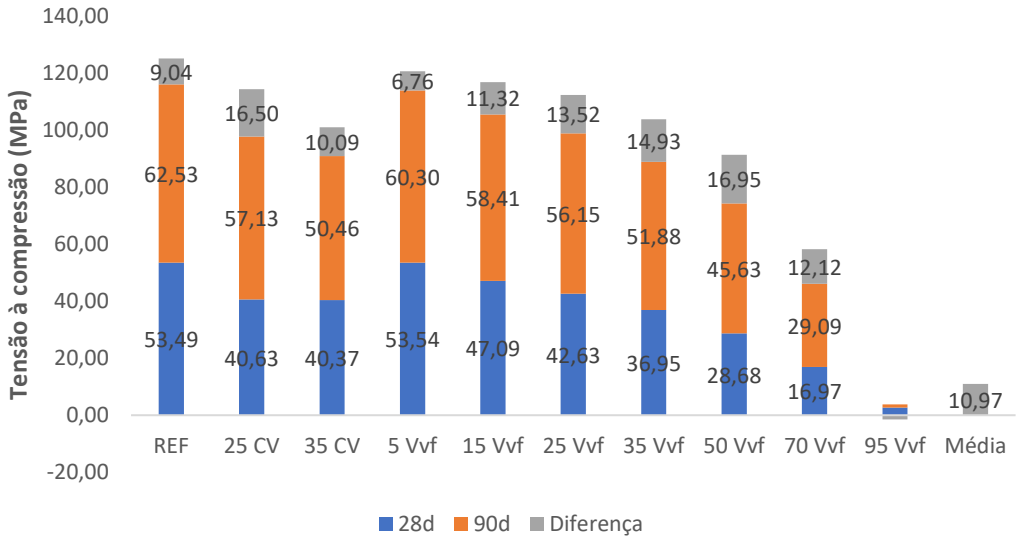


Figura 4.11 - Crescimento da resistência à compressão entre 28 dias e 90 dias de idade

No Quadro 4.7 pode-se observar uma diminuição na densidade aparente das amostras, sendo as de 28 dias, no geral, mais densas que as de 90 dias, com exceção de algumas amostras semelhantes em densidade como a de 25 CV, por exemplo. Mesmo em provetes com maiores teores de substituição, encontra-se densidades próximas às dos provetes de referência, considerando que a massa volúmica do cimento é na ordem de 3.100 kg/m^3 contra as massas volúmicas das cinzas e do pó de vidro em torno de 2.600 kg/m^3.

Quadro 4.7 – Densidade aparente (DA) e dos provetes com 28 e 90 dias de idade

Misturas	DA (kg/m^3) 28 dias	DA (kg/m^3) 90 dias
REF	2296,67	2288,84
25 CV	2283,09	2284,88
35 CV	2284,37	2266,91
5 Vvf	2294,97	2300,51
15 Vvf	2274,38	2275,57
25 Vvf	2274,48	2275,33
35 Vvf	2260,35	2246,14
50 Vvf	2238,84	2237,60
70 Vvf	2226,70	2186,68
95 Vvf	2156,76	2038,80

4.2.4 Índice de atividade

Conforme explicado na metodologia, o índice de atividade visa indicar indiretamente a pozolanicidade de uma mistura com 25% de substituição de cimento. No caso presente, como há diversas percentagens de substituição, compararam-se os provetes incorporados com 25% de substituição de cinzas volantes e pó de vidro em relação aos provetes de referência conforme NP EN 450-1:2012 [23]. No entanto, aproveitaram-se os resultados das outras incorporações para comparação sob mesmo parâmetro, sabendo-se que quanto maior a substituição de cimento, menor a resistência à compressão esperada, não tendo a mesma validade normativa na comparação dos provetes com 25% de substituição. Aos 28 dias de idade, o provete com 25% de substituição deve indicar índice superior aos 75% em relação à referência. Aos 90 dias, 85%. As Figuras 4.12 e 4.13 apresentam os resultados obtidos para os 28 e 90 dias, respetivamente, chamando a atenção para os valores limites indicados acima.

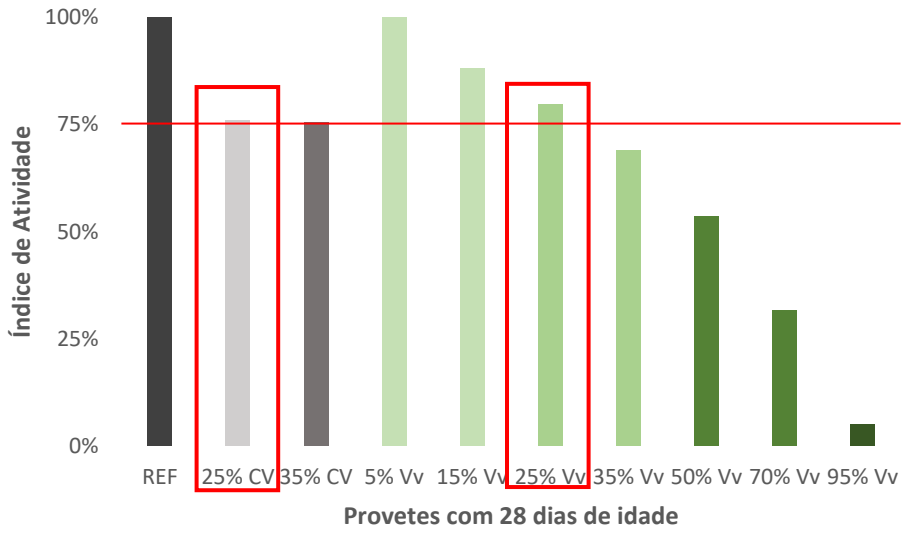


Figura 4.12 - Índice de atividade dos provetes com 28 dias de idade

Somente ultrapassam os 75% de atividade, as misturas com 25 e 35% de cinzas volantes e no caso do vidro, os provetes com 5, 15 e 25% de incorporação. Comparando os provetes com 25% de substituição, ou seja, os com cinzas volantes e os com pó de vidro, observa-se que o pó de vidro mostrou-se mais pozolânico apresentando mais atividade que as cinzas volantes. Os provetes com mais de 25% de substituição tendem, naturalmente, a apresentar menos atividade por conta das menores resistências à compressão. A proporção de 25% de substituição é um valor comum adotado pelas normas técnicas e que refletem a prática substitutiva na construção, como acontece com as cinzas volantes, por exemplo.

Com 90 dias de idade, conforme NP EN 450-1:2012[23], o pó de vidro e as cinzas volantes com 25% de substituição apresentaram atividades praticamente iguais. A observar que houve relevante crescimento da atividade das cinzas volantes dos 28 dias de idade até os 90. Nas demais taxas de substituição, apenas os provetes com 35% CV, 35% Vv, 50% Vv, 70% Vv e 95% Vv estiveram abaixo dos 85% de índice de atividade, como era esperado, principalmente os provetes com 95% de substituição que só possuiam 5% de cimento. Mas é de se destacar a atividade apresentada pelos provetes com 35% de substituição de cimento por pó de vidro que apresentou maior atividade que provetes com cinzas volantes à mesma taxa de substituição.

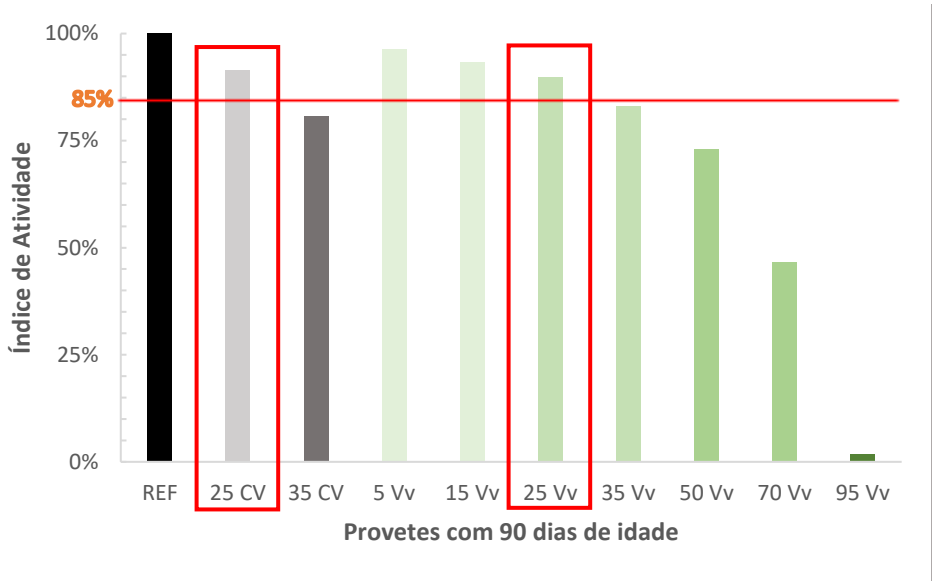


Figura 4.13 - Índice de atividade dos provetes com 90 dias de idade

5 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O desenvolvimento deste trabalho, com forte componente experimental, permitiu avaliar o potencial da utilização de pó de vidro como alternativa às cinzas volantes sob à óptica da resistência mecânica e, com base nos resultados obtidos, possibilitou chegar às conclusões que se apresentam a seguir.

5.1 CONCLUSÕES

Tendo em conta os recursos disponíveis em laboratório, o processo de moagem do vidro foi otimizado de forma a produzir um pó de vidro com finura semelhante às cinzas volantes. Numa primeira fase, a moagem era feita apenas no Los Angeles (1.700 rpm). Na fase final, com o objetivo de reduzir o tempo total do processo, optou-se por utilizar uma pré-moagem (com os moinhos de mandíbulas e de martelos) antes da moagem no Los Angeles. Assim, foram necessários 675 minutos de moagem no Los Angeles para a obtenção do pó de vidro utilizado (25,20 μm de finura).

Observa-se um desempenho mecânico satisfatório para as argamassas com utilização do pó de vidro como substituto parcial do cimento, conforme apresentado e analisado no capítulo 4, com valores de resistência à compressão previsivelmente dentro dos valores correntemente verificados nos betões estruturais e desempenho muitas vezes superior, ou similar, ao das argamassas com utilização de cinzas volantes em substituição ao cimento.

Aos 28 dias, a resistência à compressão dos provetes com 25% de substituição de cimento por pó de vidro foi superior à dos provetes com 25% de substituição por cinzas volantes.

Com 35% de substituição, as cinzas volantes obtiveram maior resistência. No entanto, as substituições com 50% de pó de vidro apresentaram resistência à compressão média de 28,68 MPa, o que é próximo de 30 MPa e incentiva o refinamento do dimensionamento das misturas para diminuir a razão água/ligante e tentar alcançar maiores patamares de resistência à compressão com maiores substituições.

Aos 90 dias, pode-se constatar um importante aumento da resistência à compressão dos provetes onde metade do ligante é o pó de vidro. De 28,68 MPa aos 28 dias, elevou-se ao patamar de 45,63 MPa aos 90 dias, apresentando boa resistência para uso estrutural.

Entre os provetes com 25 e 35% de substituições por cinzas volantes e pó de vidro, houve desempenho similar entre os provetes com o mesmo teor de substituição

Também foi visto no cálculo de índice de atividade, um comportamento superior do pó de vidro em relação às cinzas volantes no patamar de 25% de substituição, apresentando maior atividade aos 28 dias, indicando maior pozolanicidade do pó de vidro.

No entanto, comparativamente, mas sem validade normativa, os provetes com 35% de substituição por cinzas volantes, também alcançaram a marca de 75% de atividade, superando os provetes com o mesmo teor de pó de vidro, que ficaram abaixo dos 75%.

Aos 90 dias, ambas as amostras com cinzas volantes e pó de vidro e com 25% de substituição, apresentaram pozolanicidade superando a marca dos 85% conforme NP EN 450-1: 2012 [23] e com resultados similares. As amostras com 35% de substituição por cinzas volantes e pó de vidro não atingiram a marca, mas a com pó de vidro foi superior e por pouco não atingiu, relembrando que o cálculo foi realizado através das médias aritméticas.

Conclui-se então que, sob as condições estudadas, o pó de vidro com finura 25,20 μm apresenta-se como uma boa alternativa às cinzas volantes por possuir trabalhabilidade similar, desempenho mecânico satisfatório e oferta potencial do material em Portugal.

Além disso, estes resultados indicam que a utilização do pó de vidro como substituto parcial do cimento em argamassas pode ser uma alternativa sustentável conforme demonstrado no capítulo 2, com uma contribuição positiva na redução da pegada ecológica, visto que é um material que possui oferta potencial, somando o que é descartado nos aterros sanitários e o que é coletado para reciclagem.

5.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Os resultados satisfatórios obtidos ensejam pesquisas em provetes de betão, a fim de confirmar desempenho especificamente no betão. Para isso, a pesquisa deve ser refinada com mais testes de durabilidade como penetração de cloretos livres, carbonatação, ultrassonografia, absorção de humidade por capilaridade para possibilitar a comparação com as cinzas volantes sem admitir a redução no desempenho já satisfatório das cinzas volantes que já são utilizadas de forma corrente na construção.

Também recomendam-se estudos que verifiquem outros parâmetros mecânicos como no ensaio à flexão, tração e os demais ensaios correntes.

Observou-se o bom espalhamento das argamassas com pó de vidro, podendo-se desenvolver estudos com razão água/ligante menor e uso de superplastificantes.

Recomenda-se realização de termogravimetria para amostras com 28 dias, 90 dias e com mais idade, para analisar a evolução de produção de CSH, CH e $CaCO_3$ e tirar conclusões sobre CSH posterior.

Recomenda-se o dimensionamento com superplastificante na intenção de reduzir consideravelmente a razão água/ligante e analisar o desempenho mecânico de provetes com alto teor de substituição que, mostraram-se nessa pesquisa, com potencial de atingir marcas satisfatórias de resistência .

REFERÊNCIAS

[1] B.A. da S. Moreira, Incorporação de resíduo de vidro moído em argamassas como substituto parcial do cimento, Universidade do Minho, 2022.

[2] A. Camões, Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes, Universidade do Minho, 2002.

[3] Greensavers, Reciclagem de vidro cresce mais 10% em Portugal, (2022). https://greensavers.sapo.pt/reciclagem-de-vidro-cresce-mais-10-em-portugal/ (accessed February 8, 2023).

[4] Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), Relatório ipcc aquecimento global, (2018).

[5] R.K. Pachauri, Leo. Mayer, Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate change 2014 : synthesis report, 2014.

[6] Y. Kurosaki, T. Takayanagi, Theoretical study of the non-Arrhenius temperature dependence of thermal rate constants for the H+H2S→H2+SH reaction, J Chem Phys. 111 (1999) 10529–10536. https://doi.org/10.1063/1.480406.

[7] Parlamento Europeu, Emissões de gases com efeito de estufa por país e setor (Infografia), (2018).

[8] C. Kaito, A. Ito, S. Kimura, Y. Kimura, Y. Saito, T. Nakada, Topotactical growth of indium sulfide by evaporation of metal onto molybdenite, 2000. https://doi.org/10.1016/S0022-0248(00)00575-3.

[9] Global Alliance for Buildings and Construction 2020 GLOBAL STATUS REPORT FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector EXECUTIVE SUMMARY 2020 GLOBAL STATUS REPORT FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector, 2020. http://www.un.org/Depts/.

[10] T. Abergel, B. Dean, J. Dulac, Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector, n.d. www.globalabc.org.

[11] L.L. Brasileiro, J.M.E. Matos, Literature review: Reuse of construction and demolition waste in the construction industry, Ceramica. 61 (2015) 178–189. https://doi.org/10.1590/0366-69132015613581860.

[12] A. Patrícia de Pádua Leal Figueiredo, H. Aníbal Santos de Matos Eng Paulo Rocha Silva Júri Presidente, M. Teresa Nogueira Leal da Silva Duarte Orientador, H. Aníbal Santos de Matos Vogal, R. Manuel Gouveia Filipe, Estratégias de Redução das Emissões de CO2 na Indústria do Cimento Engenharia Química, n.d.

[13] P.S. Landim De Carvalho, P. Paulo, D. Mesquita, L. Melo, PANORAMAS SETORIAIS Mudanças climáticas CIMENTO, n.d.

[14] J. Lehne, F. Preston, Chatham House Report Making Concrete Change Innovation in Low-carbon Cement and Concrete #ConcreteChange, 2018. www.chathamhouse.org.

[15] F. Pacheco Torgal, Eco-eficiência dos Materiais de Construção Eco-Eficiência Said Jalali Professor Catedrático do Dep. de Engenharia Civil, Universidade do Minho, n.d.

[16] R.K. Pachauri, Leo. Mayer, Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate change 2014 : synthesis report, n.d.

[17] A. Santos, O Concreto é o segundo material mais consumido no mundo, Https://Www.Cimentoitambe.Com.Br/Massa-Cinzenta/Agua-Cimento-Portland-e-Concreto-Por-Que-Nao-Se-Vive-Sem-Eles/#:~:Text=O%20concreto%20%C3%A9%20o%20segundo,Est%C3%A1%20entre%20os%20mais%20consumidos. (2019).

[18] Instituto Português de Qualidade, NP EN 197-1:2012 Cimento - Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes, 2012.

[19] C.E.S. Thomaz, Cimento e Concreto - 02 - Hidratação do Cimento REV 09 agosto 2011, 2011.

[20] CIMPOR, Ficha Tecnica CEM I 42,5R setembro 2019 3652, 2019.

[21] H.F.W. (Harry F.W.) Taylor, Cement chemistry, T. Telford, 1997.

[22] E-Civil, Etringita, E-Civil Dicionário Da Construção Civil. (n.d.). https://www.ecivilnet.com/dicionario/images/etringita.jpg (accessed September 28, 2022).

[23] Instituto Português da Qualidade, NP EN 450-1: Cinzas volantes para betão. Parte 1: definição, especificação e critérios de conformidade., Portugal, 2012.

[24] American Society of Testing Materials, Standard specification for coal fly ash and raw calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete, Volume 04.02, United States of America, 1998.

[25] A.M. Neville, Propriedades do Concreto 5ª Edição, 5th ed., Ed. Bookman, 2015.

[26] Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC E 464 (2007), 2007.

[27] J.E. Shelby, Introduction to Glass Science and Technology Second Edition, 2nd ed., The Royal Society of Chemistry, 2005.

[28] L. Morais, Ciclo infinito do vidro, (2018). http://revistaecologico.com.br/revista/edicoes-anteriores/edicao-104/o-ciclo-infinito-do-vidro/ (accessed February 9, 2023).

[29] K. Serafini, Ciclo infinito do Vidro, (2019). http://www.vidracariacristalmachado.com.br/2019/04/15/sustentabilidade-e-reciclagem-de-vidro-2/ (accessed September 7, 2022).

[30] E. Giacomini, MATERIAL O VIDRO, n.d.

[31] Mundo Educação, Classificação dos vidros, (n.d.). https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/classificacao-dos-vidros.htm#:~:text=Em%20rela%C3%A7%C3%A3o%20%C3%A0%20composi%C3%A7%C3%A3o%2C%20os,%3A%20utens%C3%ADlios%20dom%C3%A9sticos%20(panelas). (accessed February 7, 2023).

[32] Garrafas de vidro, (n.d.). https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.mfrural.com.br%2Fdetalhe%2F322543%2Fvendo-garrafas-de-vidro&psig=AOvVaw0SiLYjeu5BduUt0rQuqZ8z&ust=1680340814660000&source=i

mages&cd=vfe&ved=0CBAQjRxqFwoTCLi0vrzrhf4CFQAAAAAdAAAAABAJ (accessed March 31, 2023).

[33] M. Pereira Babisk, DESENVOLVIMENTO DE VIDROS SODO-CÁLCICOS A PARTIR DE RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS, 2009.

[34] R. Malheiro, B. Moreira, K. Pontes, C. Jesus, A. Camões, UTILIZAÇÃO DO PÓ DE VIDRO COMO SUBSTITUTO PARCIAL DO CIMENTO: UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL A CERCA DA RESISTÊNCIA MECÂNICA, in: 2022.

[35] R. Oliveira, J. De Brito, M. Do, R. Veiga, Incorporação de Agregados Finos de Vidro em Argamassas Energy use and carbon intensity variability in larger retail buildings View project, 2013. https://www.researchgate.net/publication/280878352.

[36] M. Kamali, A. Ghahremaninezhad, Effect of glass powders on the mechanical and durability properties of cementitious materials, Constr Build Mater. 98 (2015) 407–416. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.010.

[37] J.L. Alonso, K. Wesche, Fly Ash in Concrete Properties and Performance, 1991.

[38] J.A. Canul, E.I. Moreno, J.M. Mendoza-Rangel, Efeito de cinzas volantes nas propriedades mecânicas de concreto feitos com agregado calcário moído de alta absorção, (2016). https://doi.org/10.21041/ra.

[39] P.O. Trentin, J. Manica, S.C. Vanzetto, B. Marangoni, A. Zaleski, Partial replacement of small aggregate by ground glass residue in the production of mortar, Revista Materia. 25 (2020). https://doi.org/10.1590/s1517-707620200001.0903.

[40] M. Mirzahosseini, K.A. Riding, Influence of different particle sizes on reactivity of finely ground glass as supplementary cementitious material (SCM), Cem Concr Compos. 56 (2015) 95–105. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.10.004.

[41] V. Navarro, V. Tinoco, F. Alves, S. Júnior, REVISÃO LITERÁRIA DO USO DE VIDRO MOÍDO COMO SUBSTITUTO DO AGREGADO MIÚDO NO CONCRETO, 2018.

[42] A. Carolina, R. Luiz, D.S. Vilela, B.S. Martins, G. Pinto, S. Neto, UTILIZAÇÃO DO VIDRO MOÍDO COM AGREGADO PARA PRODUÇÃO DE CONCRETO, 2018. http://www.temsustentavel.com.br/vidro-reciclado-um-ciclo-infinito/.

[43] A.M. Matos, P. Doutora, M.J. Álvares, R. De, S. Coutinho, ESTUDO DE ARGAMASSAS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO POR RESÍDUOS DE VIDRO MOÍDOS Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL-ESPECIALIZAÇÃO EM MATERIAIS E PROCESSOS DE CONSTRUÇÃO, n.d. http://www.fe.up.pt.

[44] Instituto Português de Qualidade, NP EN 196-6 - Métodos de ensaio de cimentos Parte 6: Determinação a finura, 2019.

[45] Instituto Português de Qualidade, NP EN 196-3 - Métodos de ensaio de cimentos. Parte 3: Determinação dos tempos de presa e da expansibilidade, 2017.

[46] Sifucel, ITS.03B Areia_S40-45, n.d.

[47] Instituto Português de Qualidade, NP EN 1097-2: 2012 - Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados Parte 1: Determinação da resistência ao desgaste (micro-Deval), 2012. www.ipq.pt.

[48] Engetotus, Ficha técnica de máquina para ensaio por abrasão "Los Angeles" de agregados, n.d.

[49] Instituto Português de Qualidade, NP EN 196-1 - Métodos de ensaio de cimentos Parte 1: Determinação das resistências mecânicas, 2016.

[50] Societté Nouvelle du Littoral, Fabrication Sable Normalisé CEN, conforme EN 196-1, 2017.

[51] ISO, ISO 13320:2020 - Particle size analysis — Laser diffraction methods, 2020.

[52] Instituto Português de Qualidade, NP EN 1097-6. Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6, (2004).

[53] R.C. De Sousa, A.M.P.F. Felipe, G.F. De França, P.A.A. Coutinho, J.A.S. Souza, ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE CINZA VOLANTE E RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO CIVIL NAS PROPRIEDADES DA ARGAMASSA, 2015.

[54] BS EN 1015-3, BS EN 1015-3:1999 - Methods of test for mortar for masonry Determination of consistence of fresh mortar (by flow table), 1999.