



Incorporação de resíduo de vidro moído com argamassas como substituto parcial do cimento

Bruna Alexandra da Silva
Moreira

UMinho | 2022



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Bruna Alexandra da Silva Moreira

Incorporação de resíduo de vidro moído em argamassas como substituto parcial do cimento

agosto de 2022



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Bruna Alexandra da Silva Moreira

**Incorporação de resíduo de vidro moído em
argamassas como substituto parcial do
cimento**

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau
de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do(a)
**Professor Doutor Aires Fernando Fernandes Leite
Camões Azevedo**
Doutora Raphaele Lira Meireles Castro Malheiro

agosto de 2022

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

O percurso acadêmico não é passível de ser realizado sem a colaboração de um conjunto de pessoas, as quais mencionarei nos pontos seguintes, e às quais desde já apresento o meu profundo agradecimento.

Ao Professor Aires Camões e à Doutora Raphaele pela orientação, pelos conselhos e pelas palavras sábias que ao longo do realizar da dissertação me foram dando e que em muito contribuíram para o trabalho desenvolvido.

Ao Engenheiro Carlos Jesus pelo apoio laboratorial prestado e pelas sábias explicações que serviam de base para o desenvolver os ensaios necessários. Conjuntamente um agradecimento ao Engenheiro Carlos Palha pela amizade e pela prontidão em solucionar problemas que iam surgindo.

Um agradecimento também ao Laboratório de Engenharia Civil e do Ambiente do IPVC pela cedência do equipamento necessário para a realização dos ensaios de granulometria.

Aos meus pais e à minha irmã por serem os meus pilares. Agradeço por todo o amparo nos momentos menos bons, e por todos os momentos de conquista e alegria. Por sermos tudo aquilo que muitas famílias gostariam de ser. Deixo também o meu agradecimento à restante família, em especial à Ana que para além de prima é uma amiga para a vida.

Aos meus amigos e amigas que me acompanharam ao longo de todo estes anos, um muito obrigado pela convivência e por todos os bons momentos passados.

Por fim, com especial gratidão, relevância e amor agradecer ao Jorge que apesar de não ter estado presente durante toda a caminhada, apareceu na altura certa. Agradeço por toda a perseverança, por toda a motivação, apoio, carinho e sobretudo por reslumbrar em mim o que de melhor tenho para oferecer ao mundo. Um eterno obrigado por todos os momentos partilhados contigo.

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

A atualidade está a sofrer um estigma exponencial de preocupações com a sustentabilidade energética e ambiental. No seguimento dessa tendência, a maioria das nações mundiais tem iniciado estratégias que pretendem atingir a redução da emissão de gases poluentes.

Em Portugal, as duas centrais termoelétricas a carvão que existiam foram encerradas recentemente, tendo por esse motivo o país deixado de usar carvão na produção de energia em novembro de 2021. Este encerramento visa cumprir com o acordado na Conferência do Clima em Glasgow (COP26), rumo à neutralidade carbónica de Portugal em 2050. Com o encerramento das centrais termoelétricas de Sines e Pego, é forçada a procura de um novo substituto para as cinzas volantes, que garanta condições semelhantes de desempenho, com o prejuízo de a indústria do betão dar um passo atrás e passar a aplicar betões com mais quantidade de cimento e, portanto, menos sustentáveis.

Assim sendo, este trabalho tem como base o estudo do reaproveitamento de embalagens de vidro, provenientes da reciclagem. As embalagens de vidro foram lavadas e posteriormente moídas, de modo a ser possível a substituição do cimento, tal como acontecia com as cinzas volantes. O pó de vidro foi implementado nas misturas em doses de 5%, 15%, 25% e 35% e estudado em vários ambientes de cura, para os 7, 28 e 90 dias de idade.

O pó de vidro foi caracterizado quanto à sua superfície específica e massa volúmica, e depois de fabricados os provetes foram avaliadas as resistências mecânicas e a sua expansão devido à reação álcalis-sílica (RAS).

Os resultados desta investigação revelam que o pó de vidro pode ser utilizado em betões e argamassas sem afetar o seu desempenho, uma vez que o pó de vidro apresentou valores de resistências mecânicas semelhantes aos das amostras de controlo, com incorporação de cinzas volantes, e que a RAS se manteve equiparada também, aos provetes de controlo.

Palavras-chave: Pó de vidro, argamassas, adição, resistências mecânicas, reação álcalis-sílica.

ABSTRACT

World actuality is experiencing an exponential stigma of concerns about energy and environmental sustainability. Following this trend, most of the world's nations have initiated strategies that aim to reduce the emission of pollutant gases.

In Portugal, the two coal-fired power plants that existed were recently shut down, and for this reason the country will stop using coal in energy production in November 2021. This closure aims to comply with what was agreed at the Climate Conference in Glasgow (COP26), towards Portugal's carbon neutrality by 2050. With the closure of thermoelectric power plants in Sines and Pego, the search for a new replacement for fly ash, which ensures similar performance conditions, is forced, at the expense of the concrete industry to take a step back and start applying concrete with more cement and therefore less sustainable.

Therefore, this work is based on the study of the reuse of glass containers from recycling. The glass containers were washed and then ground, in order to be able to replace the cement, as was the case with fly ash. The glass powder was implemented in the mixtures at doses of 5%, 15%, 25% and 35% and studied in various curing environments, for 7, 28 and 90 days of age.

The glass powder was characterized for its specific surface area and bulk density, and after the specimens were manufactured, their mechanical strengths and expansion due to alkali-silica reaction (ASR) were evaluated.

The results of this research show that glass powder can be used in concrete and mortars without affecting their performance, since glass powder showed mechanical strength values similar to those of control samples with fly ash incorporation, and the ASR was also similar to the control specimens.

Keywords: Glass powder, mortars, addition, mechanical strengths, alkali-silica reaction.

ÍNDICE

Agradecimentos	ii
Resumo	iv
Abstract	v
Índice.....	vi
Índice de Figuras.....	ix
Índice de tabelas.....	xii
Acrónimos e Nomenclaturas.....	xiii
1. Introdução.....	15
1.1 Considerações Gerais	15
1.1.1 Do Protocolo de <i>Kyoto</i> à COP26 em <i>Glasgow</i>	15
1.2 Motivação e Objetivos	17
1.3 Estrutura da dissertação.....	18
2. Estado do conhecimento	20
2.1 Cimento Portland.....	20
2.2 Adições.....	22
2.2.1 Cinzas Volantes	23
2.2.2 Cinzas volantes em Argamassas e Betões	26
2.3 O Vidro.....	29
2.3.1 O Seu Fabrico e a Sua Reciclagem.....	30
2.3.2 Vidro Sodo-Cálcico	35
2.3.3 Vidro Sodo-Cálcico como adição.....	36

3. Materiais e Procedimento experimental.....	44
3.1 Obtenção e caracterização do pó de vidro.....	44
3.1.1 Seleção da tipologia de vidro.....	44
3.1.2 Moagem do vidro.....	45
3.1.3 Massa volúmica	52
3.1.4 Superfície específica.....	53
3.2 Argamassas com incorporação do resíduo de vidro moído	56
3.2.1 Materiais Utilizados.....	58
3.2.2 Composição e fabrico de provetes.....	59
3.2.3 Resistência à compressão	65
3.2.4 Reação Álcalis-sílica (RAS).....	66
4. Apresentação e discussão de resultados.....	69
4.1 Estudo do pó de vidro.....	69
4.1.1 Moagem	69
4.1.2 Granulometria.....	71
4.1.3 Massa Volúmica	74
4.1.4 Superfície específica.....	76
4.2 Estudo das argamassas no estado fresco: trabalhabilidade	78
4.3 Estudo das argamassas no estado endurecido: resistência à compressão.....	79
4.3.1 Resistência à compressão em provetes cúbicos após 7 e 28 dias	79
4.3.2 Efeito das condições de cura na resistência à compressão de provetes cúbicos após 7 e 28 dias.....	81
4.3.3 Efeito da dimensão do provete na resistência à compressão após 7 e 28 dias	83

4.3.4 Estudo da resistência à compressão para as restantes cores de vidro para os 7, 28 e 90 dias de idade	85
4.3.5 Índice de Atividade.....	89
4.4 Efeito na resistência mecânica da variação da percentagem de incorporação de pó de vidro 90	
4.5 Estudo da durabilidade: reação álcalis-sílica (RAS).....	93
5. Conclusões e Trabalhos Futuros	96
5.1 Conclusões	96
5.2 Trabalhos Futuros.....	97
6. Referências.....	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Síntese da produção do cimento Portland [13].....	22
Figura 2 – Análise SEM das partículas das cinzas volantes [10].	24
Figura 3 – Curva granulométrica típica das cinzas volantes [18].....	25
Figura 4 – Resistência à compressão para cinzas volantes de classe F [29].....	27
Figura 5 – Resistência à compressão para betões [30].	27
Figura 6 – Resistência à compressão para diferentes temperaturas de cura [31].....	28
Figura 7 – Limites de classificação das cinzas volantes [35].	29
Figura 8-Difratograma do vidro moído [26].....	30
Figura 9- Fluxograma de uma fábrica de vidro embalagem [37].	30
Figura 10-Estrutura e organização dos átomos de areia [36].....	31
Figura 11 - Percentagens da Composição do Vidro Reciclado [15].....	32
Figura 12 – Percentagem de resíduo de vidro reciclado em Portugal entre 2004 e 2019 [40].	33
Figura 13 – Classificação de Portugal a nível europeu [40].	34
Figura 14- SEM do pó de vidro [45].....	36
Figura 15 - Análises energéticas dispersivas por raio X (EDX) do vidro [46].....	36
Figura 16 - Resistência à compressão com diferentes percentagens de substituição [51], [52]. ..	37
Figura 17- Resistência à compressão com diferentes granulometrias [53].....	38
Figura 18 - Resistência à compressão de argamassas para diferentes idades de cura [26].....	39
Figura 19 - Resistência à compressão para 180 e 365 dias [57].	40
Figura 20 – Desenvolvimento da resistência à compressão com o tempo [59].....	41
Figura 21- Reações álcalis-sílica sucessivas de pó de vidro fino e grosseiro [53].	42
Figura 22 - Expansão da argamassa curada a 80°C imersa na solução de 1M NaOH por 14 dias [65].....	43
Figura 23 - Comparação entre a RAS do pó de vidro e das cinzas volantes [66].....	43
Figura 24 - Lavagem e triagem de parte das embalagens de vidro utilizada durante a pesquisa. 44	
Figura 25 - Separação do vidro por cor.	45
Figura 26 - Máquina de desgaste de Los Angeles utilizada durante a pesquisa.	46
Figura 27 - Resultado da peneiração após 10 ciclos na máquina de Los Angeles.....	47
Figura 28 - Resultado da peneiração após 20 ciclos na máquina de Los Angeles.....	48

Figura 29 - Resultado da peneiração após 30 ciclos na máquina de Los Angeles.....	48
Figura 30 - Resultado da peneiração após 40 ciclos na máquina de Los Angeles.....	48
Figura 31 – (a) Moinho de bolas; (b) Recipiente de porcelana utilizado em conjunto com o moinho de bolas.	50
Figura 32 - Resultado da peneiração após 10 (a), 20 (b), 30 (c) e 40 (d) ciclos do vidro âmbar, respetivamente, na máquina de Los Angeles.....	51
Figura 33 - Resultado da peneiração após 10 (a), 20 (b), 30 (c) e 40 (d) ciclos do vidro branco, respetivamente, na máquina de Los Angeles.....	51
Figura 34 - Aparelho MasterSizer providenciado pelo Laboratório de Engenharia Civil e do Ambiente do IPVC.....	52
Figura 35 – (a) Enchimento do balão Volumétrico de acordo com a norma NP EN 1097-6 (2016); (b) Introdução do pó de vidro no balão volumétrico.	53
Figura 36 - Aparelho de Blaine.....	54
Figura 37 - Curva granulométrica do CEM I 42,5 R.	58
Figura 38 - Curva granulométrica das cinzas volantes.	59
Figura 39 - Curva granulométrica da Areia 40/45.	59
Figura 40 - Ensaio de trabalhabilidade: (a) Molde adaptado; (b) Inserção da argamassa no molde.	60
Figura 41 - Avaliação da trabalhabilidade.	61
Figura 42 - Moldes para os provetes cúbicos com 20 mm de aresta.	63
Figura 43 - Misturadora do LMC utilizada durante a pesquisa.	64
Figura 44 - Identificação dos provetes.....	64
Figura 45 - Máquina Loyds.....	65
Figura 46 - Molde para o ensaio RAS.	66
Figura 48 - Identificação dos provetes.....	67
Figura 47 - Ensaio ARS: (a) Provetes imersos em água destilada a $80\pm 2^{\circ}\text{C}$; (b) Calibração do defletómetro.	67
Figura 49 - Evolução da percentagem de passados no peneiro 75 μm	71
Figura 50 – Resultados da Granulometria Laser para o pó de VV.	73
Figura 51 - Resultados da Granulometria Laser para o pó de VA.....	73
Figura 52 - Resultados da Granulometria Laser para o pó de VB.....	73

Figura 53 – Sumário das curvas granulométricas em estudo.....	74
Figura 54 - Evolução média da massa volúmica para o pó de VV.	76
Figura 55 - Evolução da superfície específica para o pó de VV.~.....	78
Figura 56 - Resistência à compressão para os 7 e 28 dias de idade com temperatura $20^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$ sem submersão em água.	80
Figura 57 - Resistência à compressão para as diferentes condições de cura aos 7 dias de idade.	82
Figura 58 - Resistência à compressão para as diferentes condições de cura aos 28 dias de idade.	82
Figura 59 – Resistência à compressão aos 7 dias de idade para cubos 20 mm e 50 mm de aresta.	84
Figura 60 – Resistência à compressão aos 28 dias de idade para cubos 2x2 cm e 5x5 cm.	84
Figura 61 - Resistência à compressão para os 7, 28 e 90 dias de cura de argamassas com vidro verde sujeitas à camara húmida com $20^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$ imersas em água.....	86
Figura 62 - Resistência à compressão para os 7, 28 e 90 dias de cura de argamassas com vidro âmbar sujeitas à camara húmida com $20^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$ imersas em água.....	86
Figura 63 - Resistência à compressão para os 7, 28 e 90 dias de cura de argamassas com vidro branco sujeitas à camara húmida com $20^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$ imersas em água.....	87
Figura 64 - Resistência à compressão aos 90 dias de cura para as diferentes colorações.	88
Figura 65 - Resistência à compressão de argamassas com 7 dias de cura, com diferentes percentagens de substituição, sujeitas à camara húmida com $20^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$ submersas em água.	91
Figura 66 - Resistência à compressão de argamassas com 28 dias de cura, com diferentes percentagens de substituição, sujeitas à camara húmida com $20^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$ submersas em água.	92
Figura 67 - Resultados do ensaio Álcalis-Sílica para o VA.....	94
Figura 68 - Resultados do ensaio Álcalis-Sílica para o VB.....	94
Figura 69 - Resultados do ensaio Álcalis-Sílica para o VV.....	95

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do cimento Portland [9].	21
Tabela 2 – Composição química das cinzas volantes [18].	26
Tabela 3- Reciclagem do Vidro em Portugal [39].	33
Tabela 4 - Composição química dos Vidros Sodo-Cálcicos [43].	35
Tabela 5 - Nomenclatura para o pó de vidro verde.	56
Tabela 6 - Nomenclatura de argamassas com 5% de substituição.	57
Tabela 7 - Nomenclatura de argamassas com 15% de substituição.	57
Tabela 8 - Nomenclatura de argamassas com 25% de substituição.	57
Tabela 9 - Nomenclatura de argamassas com 35% de substituição.	57
Tabela 10 - Quantidades necessárias para produzir 1m ³ de argamassa.	62
Tabela 11 - Resultados da moagem no Los Angeles.	69
Tabela 12 - Resultados da moagem no moinho de bolas.	70
Tabela 13 - Resultados da Granulometria Laser.	72
Tabela 14 - Resultados do Ensaio da determinação Massa Volúmica.	75
Tabela 15 - Resultados do desvio padrão da massa volúmica.	76
Tabela 16 - Resultados obtidos do ensaio de Blaine.	77
Tabela 17 - Resultados do ensaio da trabalhabilidade.	79
Tabela 18 – Índice de Atividade.	90

ACRÓNIMOS E NOMENCLATURAS

Al_2O_3 - Óxido de alumínio ou alumina

ASTM - American Society for Testing and Materials

a/l- Razão água/ligante

B_2O_3 – Trióxido de Boro

CaO – Óxido 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 – Sílica

SO₃ – Óxido Sulfúrico

UE – União Europeia

µm – Micrómetro

°C – graus centígrados

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

A era moderna está a ser marcada pelo crescimento exponencial das preocupações com a sustentabilidade energética e ambiental. Nesse sentido, a maior parte das nações mundiais tem encetado estratégias que pretendem atingir determinados objetivos de redução da emissão de gases poluentes e, simultaneamente, redução da energia não-renovável associada aos processos de fabrico. A inexistência das cinzas volantes é um problema que, a curto prazo, terá de ser resolvido através da incorporação de um outro constituinte que garanta condições semelhantes de desempenho, sendo que foi a partir desse cenário que surgiu o desafio da incorporação de um resíduo bem conhecido no dia-a-dia: o vidro.

1.1.1 Do Protocolo de *Kyoto* à COP26 em *Glasgow*

Ao longo dos últimos anos têm sido efetuadas reuniões mundiais tendo em vista a análise do estado climático do planeta. Um belo exemplo é o Acordo de Paris, que surgiu em dezembro de 2015, vindo substituir as linhas orientadoras anteriores que tinham sido definidas no Protocolo de *Kyoto*, tratando-se de um compromisso mundial que adota políticas climáticas que previam a redução da emissão de gases de efeito estufa a partir do ano de 2020 [1].

Durante a COP21 (21ª Conferencia das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima), em Paris, 195 países comprometeram-se a impedir o avanço do aquecimento global e as alterações climáticas advindas deste, tendo então, de adotar medidas que impeçam um aumento das temperaturas globais inferiores a 2°C em relação à época pré-industrial e procuram que este aumento seja até, inferior a 1,5°C.

Comparativamente com a época pré-industrial (até meados do século XIX), para que a principal política seja cumprida, é necessário reduzir para metade as emissões de dióxido de carbono (CO₂) e outros gases até 2050 [2]. Países desenvolvidos deverão proceder a uma maior redução (entre 80% a 95% até 2050), assim a União Europeia deverá reduzir em 80% as suas emissões de gases com efeito de estufa.

Entre 31 de outubro a 13 de novembro de 2021, em Glasgow na COP26 (26ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima), os dirigentes dos mesmos 195 países reuniram-se novamente para avaliar os progressos efetuados até então, tendo a meta para 2020, sido de 25% de redução da emissão de gases de efeito estufa, devidamente cumprida. Deverão ainda ocorrer algumas etapas intermédias que preveem reduções de 55% e 60%, até 2030 e 2040, respetivamente [3]. Neste contexto, a UE toma algumas medidas para, até 2050, transformar a sua economia mais sustentável, com menos impacto ambiental, sobretudo em setores cruciais como a energia, a indústria, os transportes, a construção e a agricultura. Já em Portugal, o governo implementou em todo o território nacional várias estratégias e adaptações; seguem-se alguns exemplos:

- O desenvolvimento de instrumentos, com os planos de gestão de paisagem, que permite a prevenção dos fogos rurais;
- Políticas de ordenamento de território que salvaguardam ecossistemas e habitats;
- Políticas para melhorar o setor da energia, das florestas e da mobilidade urbana e periurbana;
- Medidas que preveem o encerramento das duas centrais a carvão nacionais, o que levou ao encerramento das mesmas provocando danos colaterais na produção do betão;
- Criação de instrumentos fiscais verdes;
- Medidas de incentivo á descarbonização;
- Planos de reabilitação de áreas de elevado valor natural.

1.1.2 A indústria da construção e o seu impacto ambiental

O setor da construção civil é um dos setores que causa mais danos ambientais, desde a destruição de espaços verdes, ao movimento de terras, passa também pela produção de materiais até ao consumo de água e energia elétrica durante a fase de operação. É responsável pelo consumo de 50% a 75% dos recursos naturais do mundo, e 40% da energia mundial é consumida pelos edifícios. O setor da construção consome 15% dos recursos hídricos e é responsável por 30% a 40% das emissões de CO₂ [4].

A indústria da construção é uma das atividades humanas que gera mais resíduos, que estão normalmente associados à falta de processos adequados e falta de materiais disponibilizados para cada tipo de serviços. No entanto, os impactos ambientais gerados pela indústria da construção são inevitáveis para o desenvolvimento das cidades, mas ainda existe muita margem para reduzir os desperdícios e melhorar o reaproveitamento dos materiais. O cimento Portland, por exemplo, é considerado um dos materiais mais poluentes do meio ambiente, sendo o seu fabrico responsável por cerca de 5% do total de emissões de CO₂ para a atmosfera [5]. Este material incorpora 94% de calcário, 4% de argila e em quantidades menores (2%) de óxido de ferro e alumínio e é o principal constituinte do material produzido pelo homem de maior consumo no planeta – o betão. Neste sentido, tem sido feito um esforço considerável para reduzir a utilização de cimento Portland através, por exemplo, da sua substituição parcial por adições minerais com efeito pozolânico.

A adição mineral mais utilizada no mundo, devido à sua disponibilidade elevada, são as cinzas volantes, provenientes das centrais termoelétricas a carvão, ainda o principal meio de produzir energia elétrica no mundo. O fabrico de betões em que o cimento é substituído por 20 a 40% de cinzas volantes é já comum e, a escassez ou mesmo inexistência de cinzas volantes no mercado, resultará num maior consumo de cimento Portland e, portanto, um passo atrás na sustentabilidade dos betões. Este facto poderá ser contrariado se, a curto prazo, se implementar um substituto das cinzas volantes, capaz de substituir parcialmente o cimento Portland.

1.2 Motivação e Objetivos

A investigação a realizar é um ponto de partida importante na área da sustentabilidade e da reutilização de resíduos inorgânicos, sendo por esse motivo transversal a diversas temáticas da sociedade e com um carácter muito relevante para trabalhos futuros neste âmbito. Como facilmente se depreende do descrito anteriormente, a principal motivação para a realização deste trabalho consistiu em avaliar um substituto para as cinzas volantes e, assim, permitir a substituição de cimento em argamassas e betões, minimizando ou mesmo anulando o impacto do fim da produção das cinzas volantes.

Mencionando os objetivos de forma ampla, os mesmos passam pela obtenção e caracterização de pó de vidro, avaliando-o posteriormente como um substituto parcial das cinzas volantes, uma vez que este constituinte das misturas já não se produz em Portugal e, pelo menos na Europa, tende a

deixar de ser produzido. Para tal, será necessário percorrer, de forma sucessivamente cronológica, diversas fases de trabalho que compreendem os seguintes objetivos específicos:

- i. Estudar e implementar um procedimento para transformação de vidro sólido em pó de vidro;
- ii. Efetuar uma caracterização física do pó de vidro e compará-lo com a adição mineral mais usada em betões e argamassas – as cinzas volantes;
- iii. Efetuar um estudo integrado com diversas percentagens de substituição de cimento por pó de vidro (das diferentes cores) e por cinzas volantes, efetuar ensaios de caracterização mecânica tendo em vista a comparação de resultados. Este estudo deve abranger, ainda, a variação das condições de cura, para poder avaliar o impacto desse fator;
- iv. Avaliar o impacto da incorporação do pó de vidro no que à reação álcalis sílica diz respeito.

Neste contexto, desenvolveu-se um programa experimental de forma a tentar dar resposta à questão principal que motivou a realização deste trabalho: *pode o pó de vidro ser um substituto das cinzas volantes e ser incorporado em grande escala em betões e argamassas?*

1.3 Estrutura da dissertação

De modo a corresponder aos objetivos apresentados no ponto anterior, a presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos distintos, sendo abordado, ao longo dos próximos pontos, a generalidade dos assuntos tratados.

No Capítulo 1, foram expostas considerações gerais sobre os assuntos retratados nos capítulos seguintes e foram ainda expostos os problemas que levaram a fim todo o trabalho desenvolvido.

No Capítulo 2, denominado *Estado do Conhecimento*, efetua-se uma revisão bibliográfica que foca essencialmente em três temas distintos: o cimento Portland, o pó de vidro enquanto constituinte de argamassas e betões e as cinzas volantes. É nesta secção do trabalho que se generalizam as definições teóricas e as abordagens anteriores que foram efetuadas no assunto em estudo.

No Capítulo 3, denominado *Materiais e Procedimento Experimental*, apresentam-se todos os materiais utilizados na componente experimental da dissertação, efetuando-se a respetiva caracterização através de ensaios específicos. É descrito, de forma pormenorizada, o protocolo

experimental adotado, sendo devidamente justificadas algumas das opções tomadas ao longo do tempo que decorreu e dos avanços e recuos existentes.

No Capítulo 4 introduz-se uma dinâmica de análise prática de apresentação e discussão dos resultados obtidos após implementação do procedimento experimental descrito no capítulo anterior.

No Capítulo 5 são apresentadas as principais linhas conclusivas do trabalho efetuado, apontam-se o que poderia ter sido feito melhor e estabelece-se um panorama de trabalhos futuros que visem não só a utilização das metodologias adotadas na presente dissertação como também a implementação de novos procedimentos que visem a melhoria da qualidade da investigação realizada.

2. ESTADO DO CONHECIMENTO

O betão e a argamassa são componentes amplamente empregues no ramo da construção, sendo grande o impacto ambiental resultante da sua obtenção, desde a origem das matérias-primas até ao próprio processo de produção. Indo ao encontro do tema deste trabalho, os próximos subcapítulos descrevem sequencialmente: a produção do cimento Portland, a utilização de cinzas volantes como adição e, por fim, aquele que é o foco do trabalho de investigação realizado: a incorporação de resíduo de vidro moído como substituição parcial do cimento em substituição das cinzas volantes.

2.1 Cimento Portland

O cimento apareceu na história da humanidade há aproximadamente 4500 anos [6]. Em 1756, o inglês John Smeaton, conseguiu desenvolver um produto resistente, através da redução a cinzas, de calcários moles e argilosos. Em 1824, Joseph Aspdin adicionou a esta mistura pedras de calcário e argilas-queimadas, e reduzidas a pó fino. Aquando seca, esta mistura tornava-se tão dura quanto os materiais rochosos utilizados na construção. Joseph denomina esta mistura de cimento Portland, devido à cor e as propriedades de solidez e durabilidade similares as rochas britânicas de Portland [6].

Atualmente, o cimento trata-se de um “material inorgânico bastante moído, resultante das reações químicas e dos processos de hidratação, quando adicionada água, que endurece e mantém a sua resistência mesmo debaixo de água”, segundo a NP 197-1:2012 [7].

Trata-se de um material hidráulico que, para além de endurecer ao ar, endurece também dentro de água, tendo a capacidade de manter a resistência ao longo dos tempos e em ambos os ambientes. Esta característica, torna assim o cimento Portland um ligante de elevada utilização.

Este material é produzido principalmente por calcário e argilas, sendo, as argilas constituídas, fundamentalmente, por silicatos hidratados de alumínio e de ferro [2].

Resumidamente, o fabrico do cimento Portland consiste na junção de matérias-primas moídas, em proporções adequadas, que são cozidas num forno rotativo e a uma temperatura de cerca de 1450°C, para que se fundam. Este material fundido, chama-se de clínquer, e apresenta uma dimensão de grãos entre os 10 e 30 mm.

Finalmente, o cimento Portland resulta na mistura do clínquer moído com gesso e outras adições. A composição química do cimento Portland, será parecida com a apresentada na Tabela 1, após a eliminação da água e do CO_2 .

Tabela 1 - Composição química do cimento Portland [9].

Designação	Composição química	Quantidade (%)
Cal (óxido de cálcio)	CaO	60 a 69
Sílica (dióxido de silício)	SiO ₂	17 a 25
Alumina (óxido de alumínio)	Al ₂ O ₃	2 a 9
Óxido de ferro	Fe ₂ O ₃	0,5 a 6

Estas matérias-primas são praticamente encontradas em todos os países, daí existirem fábricas de produção de cimento por todo o mundo[10]. A Figura 1 sintetiza a produção do cimento e os resíduos causados pela mesma.

O fabrico do cimento exige um alto consumo de energia, seja ela térmica (queima de combustíveis para aquecer os fornos rotativos), seja ela elétrica (movimentação dos moinhos). Contudo, apesar de este não ser o fator mais negativo para o meio ambiente, e de não serem produzidos resíduos sólidos, uma vez que as cinzas volantes mais tarde incorporam o clínquer, ocorre uma elevada emissão de gases com efeito de estufa. Estima-se que são gerados mais de 600 kg de CO₂ por cada tonelada de clínquer, sendo as cimenteiras responsáveis por cerca de 5% da emissão global de CO₂ [11]. Produzem-se ainda outros gases prejudiciais à camada de ozono, tais como o óxido de enxofre, o óxido de nitrogénio, o monóxido de carbono e compostos de chumbo [5], como pode, também, ser visto na Figura 1.

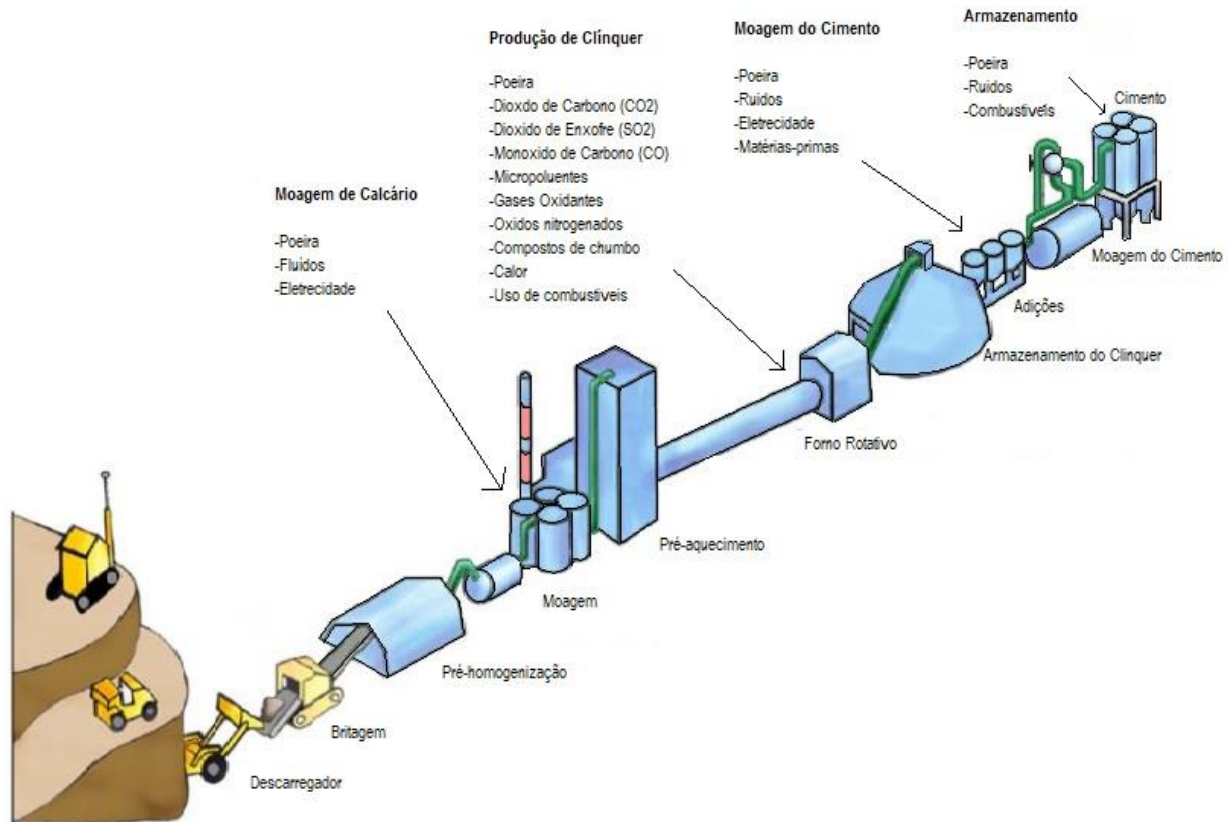


Figura 1 – Síntese da produção do cimento Portland [13].

2.2 Adições

As adições foram inicialmente introduzidas no betão para reduzir o consumo de cimento e, assim, reduzir o seu custo. No entanto, atualmente assumem um papel muito mais abrangente do que isso. A sua colocação nas misturas é suportada por diversas razões, sendo umas das principais o facto de permitirem o reaproveitamento de resíduos de outras indústrias, reduzindo a emissão de CO₂ e contribuindo, desse modo, para a sustentabilidade ambiental e económica [14].

As adições podem ser de origem natural, como por exemplo o fíler calcário proveniente da moagem direta da rocha calcária, ou originárias de subprodutos industriais como as cinzas volantes vindas dos resíduos das centrais térmicas de carvão, ou escórias de alto-forno resultantes dos resíduos dos altos-fornos siderúrgicos. As adições proporcionam propriedades especiais aos betões e argamassas e podem ser classificadas segundo dois tipos, de acordo com a NP EN 206 (2017) [15]:

- **Tipo I:** adições quase inertes, isto é, que não apresentam propriedades hidráulicas latentes, nem propriedades pozolânicas
- **Tipo II:** adições que apresentam propriedades hidráulicas latentes e propriedades pozolânicas.

Todos os cimentos que incorporam adições deverão respeitar a norma NP EN 197-1 (2012) [5]. Em Portugal, as adições mais utilizadas são o filler calcário e as cinzas volantes [16].

2.2.1 Cinzas Volantes

A utilização de cinzas volantes em betões encontra-se generalizada, sendo o aditivo de mais comum utilização no fabrico de betões e argamassas em Portugal [17]. Inicialmente foram introduzidas para servir de substituição parcial do cimento de forma a diminuir o custo do betão. No entanto, com o avançar das décadas começaram a assumir outras vantagens, nomeadamente as melhorias na trabalhabilidade e redução de permeabilidade, algo que conduz a melhorias significativas da durabilidade do material, para além de garantirem, também, uma redução significativa de custos de produção dos betões e argamassas [18].

Atualmente existem em Portugal duas centrais termoelétricas, em Sines e no Pego, mas que encerraram recentemente, devido ao acordo de Paris, assim como foi retratado no capítulo 1. A Central de Sines encerrou a sua produção em janeiro de 2021 e a do Pego em novembro do mesmo ano. Estas centrais eram responsáveis pela produção de cerca de 500 mil toneladas de cinzas volantes por ano, pelo que a sua utilização na conceção de outros materiais era fundamental para reduzir a pegada ecológica das mesmas, para além de terem todas as vantagens mencionadas no parágrafo anterior [19].

A norma NP EN 450-1:2012 [20] define as cinzas volantes como pó fino que apresenta uma constituição essencialmente baseada em partículas vítreas e esféricas (ver Figura 2), com propriedades pozolânicas e quimicamente ricas em SiO_2 e Al_2O_3 . No entanto, existe uma tradicional divisão em duas classes em função da sua proveniência: classe F (para cinzas que resultam da queima de antracite/betão betuminoso) e a classe C (cinzas que resultam da queima de carvões sub-betuminosos e/ou lenhites). A primeira classe mencionada abrange cinzas com baixo teor de cálcio e com propriedades pozolânicas, mas sem capacidade aglomerante. Por sua vez, as cinzas da classe C são caracterizadas por altos teores de cálcio e por terem propriedades

pozolânicas aglomerantes [18]. As cinzas volantes produzidas nas centrais do Pego e de Sines eram ambas da classe F.

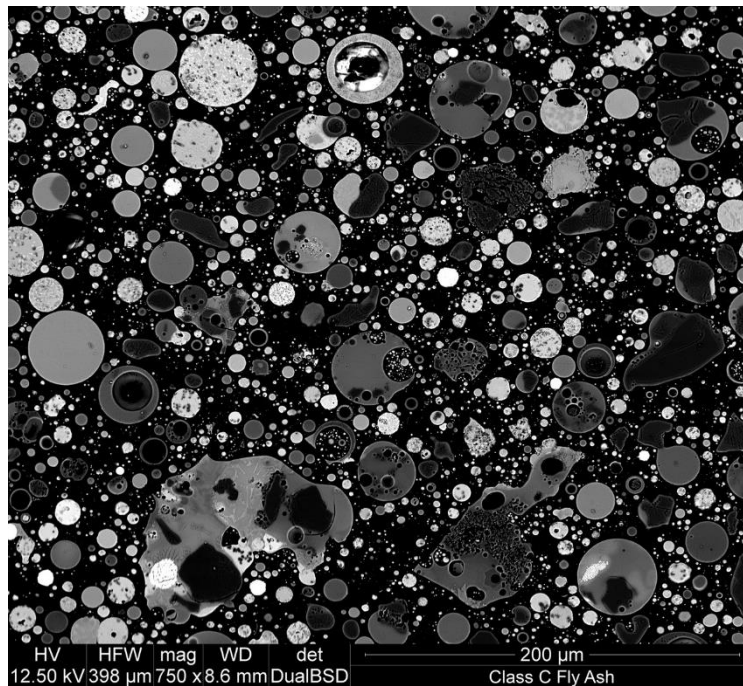


Figura 2 – Análise SEM das partículas das cinzas volantes [10].

Uma vez que a substituição das cinzas volantes é o plano de fundo para o trabalho de investigação desenvolvido, é importante apontar quais as características físicas e químicas das mesmas para, posteriormente, poder procurar relações com as do pó de vidro.

Começando pelas propriedades físicas, as cinzas volantes são caracterizadas por possuírem partículas irregulares ou angulares, com um diâmetro que pode variar entre menos de 1 µm e 150 µm, sendo o diâmetro médio entre 7 a 12 µm, como se pode analisar na Figura 3. Relativamente à sua superfície específica, varia entre os 250 e os 500 m²/kg [21].

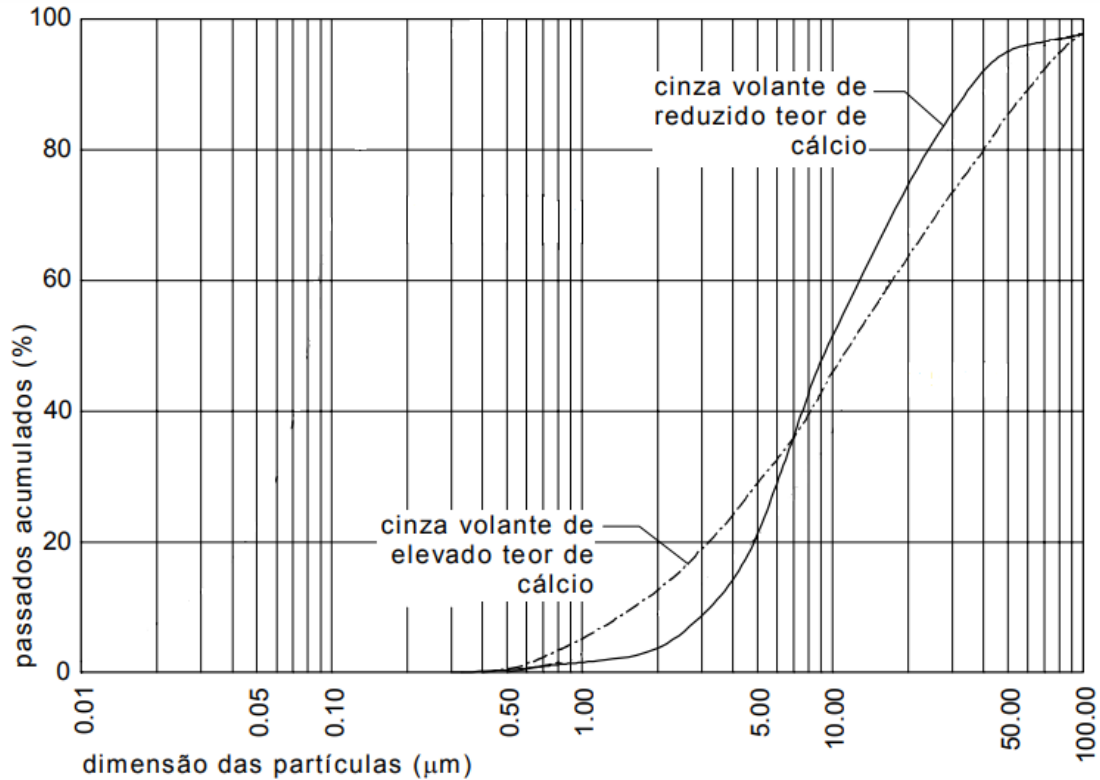


Figura 3 – Curva granulométrica típica das cinzas volantes [18].

Importa mencionar que as características físicas das cinzas volantes dependem em muito do processo de queima e dos materiais que lhe deram origem. Por exemplo, quanto maior for a quantidade de carbono das cinzas, menor irá ser a resistência mecânica do betão, e vice-versa. O melhor cenário é aquele em que as cinzas apresentam superfície específica e granulometria semelhante à do cimento, pois dessa forma será possível evitar grandes variações nas propriedades do betão, especialmente no que à trabalhabilidade diz respeito [19].

Por outro lado, no que diz respeito às características químicas, a composição das cinzas varia em função da classe e da quantidade de material mineral. Genericamente, apresentam uma estrutura composta pelos seguintes elementos: sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), cal (CaO) e óxido de ferro (Fe_2O_3). Para além destes surgem por vezes outros em menores quantidades, tal como é possível identificar na Tabela 2. Uma propriedade fundamental, a pozolanicidade, está diretamente relacionada com o teor em sílica amorfa [21].

Tabela 2 – Composição química das cinzas volantes [18].

Central	Sines	Pego
SiO ₂ (%)	50,0 a 54,0	42,2 a 58,5
Al ₂ O ₃ (%)	27,0 a 29,0	21,0 a 32,6
Fe ₂ O 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 ₂ O (%)	0,5 a 1,0	0,2 a 0,9
K ₂ O (%)	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

2.2.2 Cinzas volantes em Argamassas e Betões

Conforme referido, as cinzas volantes são a adição mais comum utilizada no fabrico de betões e argamassas. Como tal, vários investigadores retrataram as cinzas volantes e denotaram que as resistências mecânicas dependem da razão água/cimento [22], da dimensão do provete [23], do tamanho da partícula [24], da composição química e mineralógica das cinzas volantes [25], do tempo de cura [26], da temperatura e muitos outros fatores [23].

Foi comprovado que cinzas volantes com alto teor de cal, podem ter comportamento semelhante ao cimento Portland na formação de ligações hidráulicas [27] e que a finura das partículas aumenta a compactação [28]. Constatou-se, também, que temperaturas de cura elevadas aumentam a resistência à compressão para idades de cura precoces, mas influenciam negativamente para idades de cura tardias, tal como acontece em misturas produzidas só com cimento Portland hidratado [27].

Cinzas volantes de classe F foram comparadas entre si com diferentes graus de finura, em que as denominadas de ultrafinas (dimensão inferior a 75 µm) apresentaram resistências à compressão superiores independentemente do grau de substituição, como se verifica na Figura 4 [29].

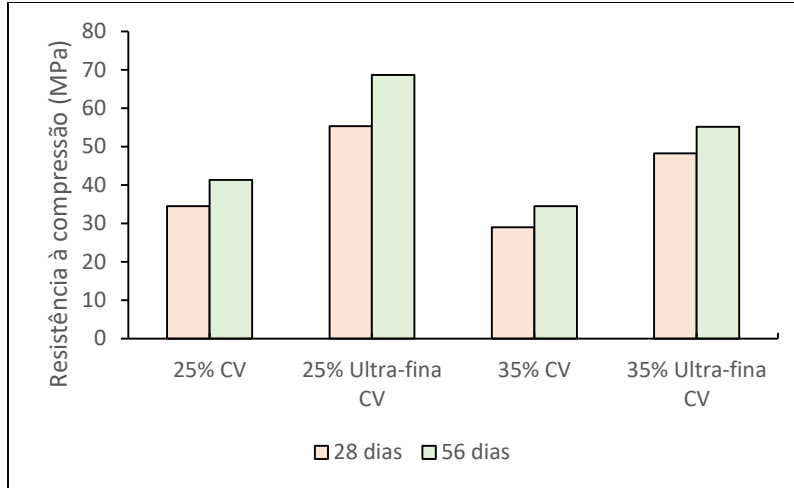


Figura 4 – Resistência à compressão para cinzas volantes de classe F [29].

Já Silva [30] concluiu que, de um modo geral, as cinzas volantes provenientes de Ponferreda cooperaram para uma resistência mecânica baixa no betão em idades precoces. Porém com o avançar da idade, betões com substituição até 45%, 50% e 60% de cimento por cinzas volantes, apresentam valores muito semelhantes ao betão de controlo (betão sem substituição). Estes resultados devem-se ao facto de as reações pozolânicas serem lentas, mas prolongadas (Figura 5).

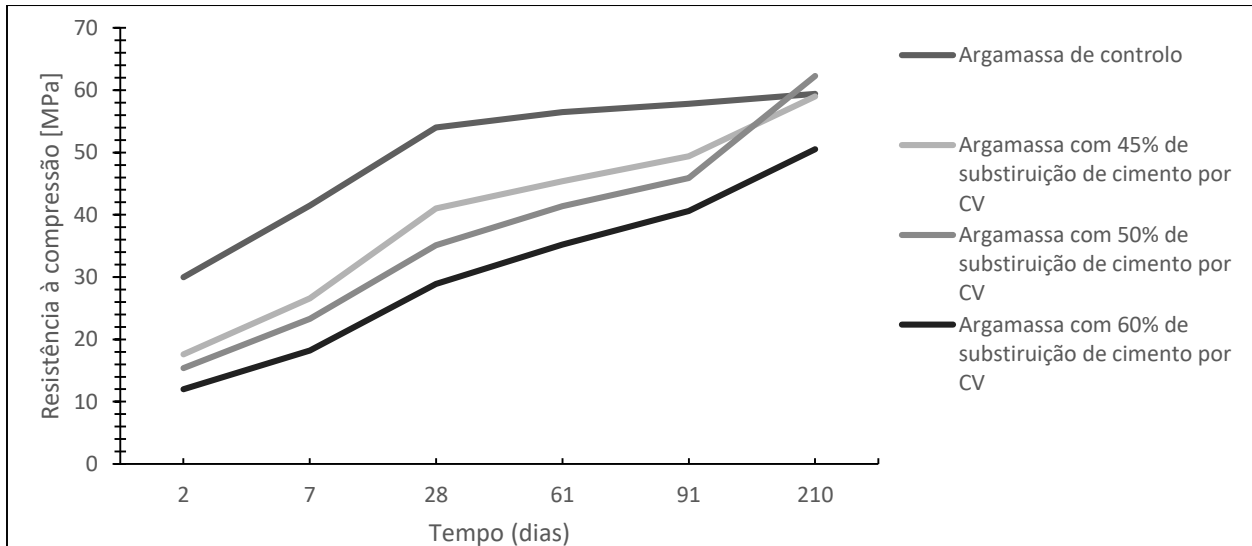


Figura 5 – Resistência à compressão para betões [30].

Medeiros [31], utiliza cinzas volantes em argamassas, com dimensão inferior a 45 μm , e substituições de cimento por cinzas volantes de 10%, 20%, 30% e 35%, estudadas em temperaturas de cura de 23°C e 38°C (Figura 6), comprovando que quanto mais elevada a temperatura, mais elevado será o seu desempenho.

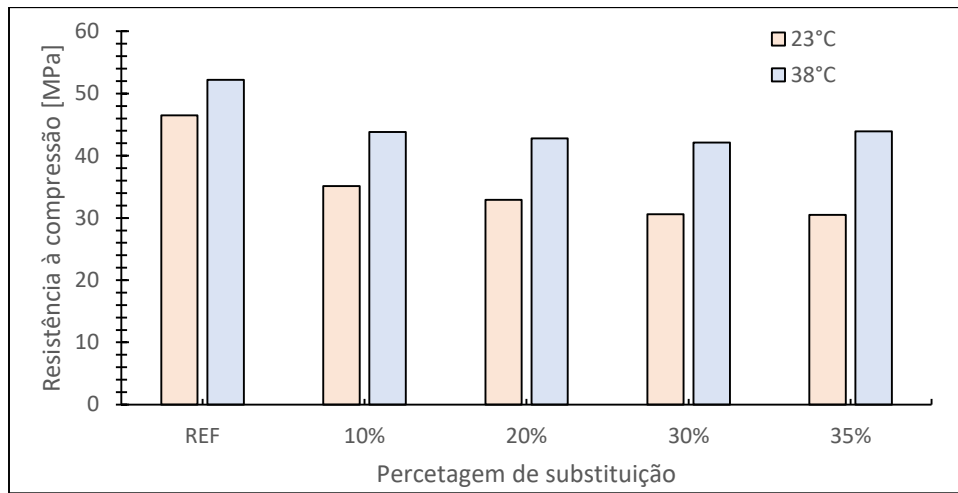


Figura 6 – Resistência à compressão para diferentes temperaturas de cura [31].

Latifee [32] salienta que, a substituição parcial de cimento por cinzas volantes reduz as reações álcalis-sílicas, mostrando eficácia variável na sua inibição uma vez que esta depende do carvão que são derivadas. No entanto, as cinzas volantes de classe F apresentaram resultados mais eficientes nesse âmbito, apresentando mais de 70% de conteúdo amorfo [33], enquanto que cinzas volantes de classe C apresentaram uma influência menos previsível [27], [34].

A Figura 7 resume dados estatísticos sobre mais de 7000 amostras de cinzas de carvão traçadas em função da sua classificação. Os limites para as classificações de classe C e classe F aparecem na Figura 5 a 50% e 70%, respetivamente. Esta ilustra, com base em análises de cinzas, que cerca de 50% de todos os lignites e 68% dos carvões sub-betuminosos formam cinzas volantes que satisfazem as Classe C padrão [35].

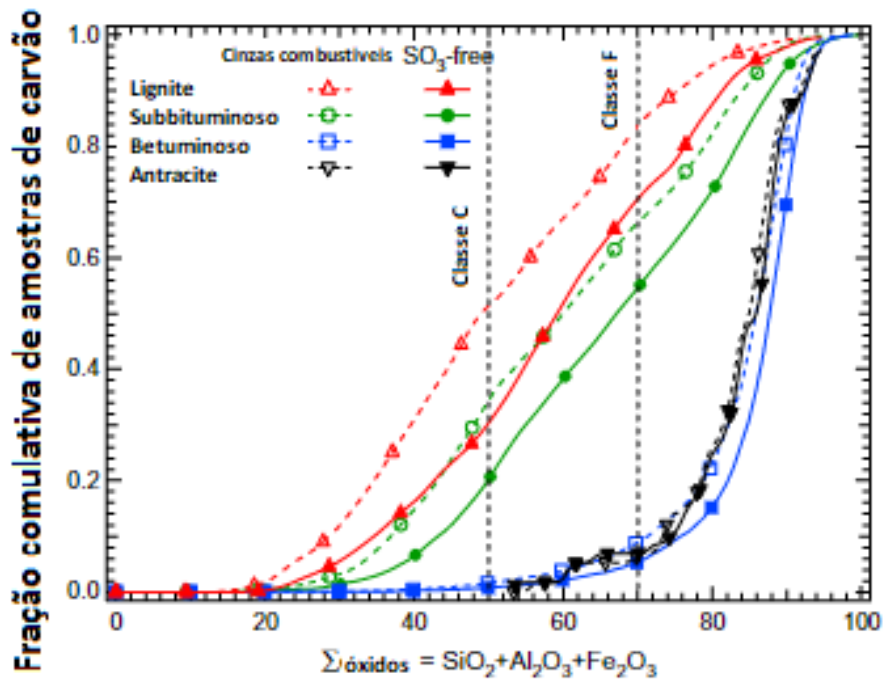


Figura 7 – Limites de classificação das cinzas volantes [35].

2.3 O Vidro

O vidro é um material proveniente da aglomeração de matérias-primas naturais, tais como areia, calcário, carbonato de sódio, óxido de alumínio e corantes ou descorantes, existindo muitas variedades de vidro, consoante a sua finalidade. Encontra-se difundido na sociedade nas mais diversas utilizações, no entanto importa especialmente investigar o seu potencial quando se encontra transformado em pó, no âmbito da presente dissertação.

Analisando o seguinte difratograma (Figura 8), pode-se perceber que o pó de vidro moído é um material de estrutura predominantemente amorfa, onde se pode encontrar um halo característico bastante largo, entre os ângulos de 18 e 35 graus, e nenhum pico de difração definido [36].

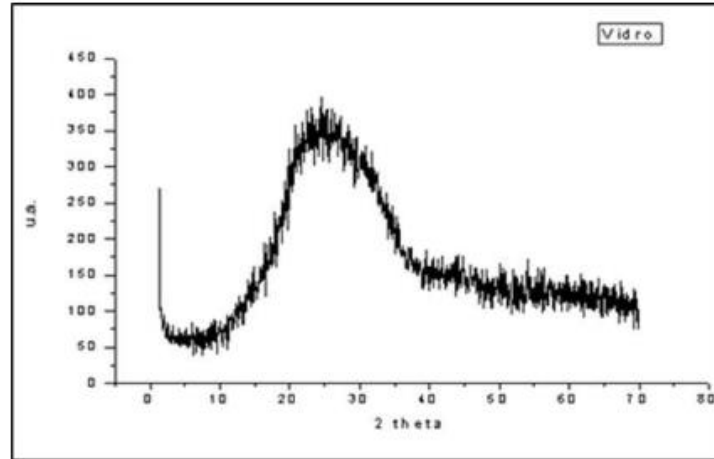


Figura 8-Difratograma do vidro moído [26].

2.3.1 O Seu Fabrico e a Sua Reciclagem

Para o fabrico do vidro todas as matérias-primas anteriormente referidas, são levadas a um misturador, como mostrado na figura seguinte (ver Figura 9). Esta mistura resultante é colocada no forno de fusão, que perante o efeito de calor, transforma-se em vidro, que por sua vez é levado às máquinas de conformação que lhes dará a forma pretendida. De seguida, a peça de vidro é recozida, isto é, resfriada lentamente até a temperatura ambiente. Este procedimento alivia as tensões normalmente desenvolvidas na conformação e torna a peça mais resistente [37].

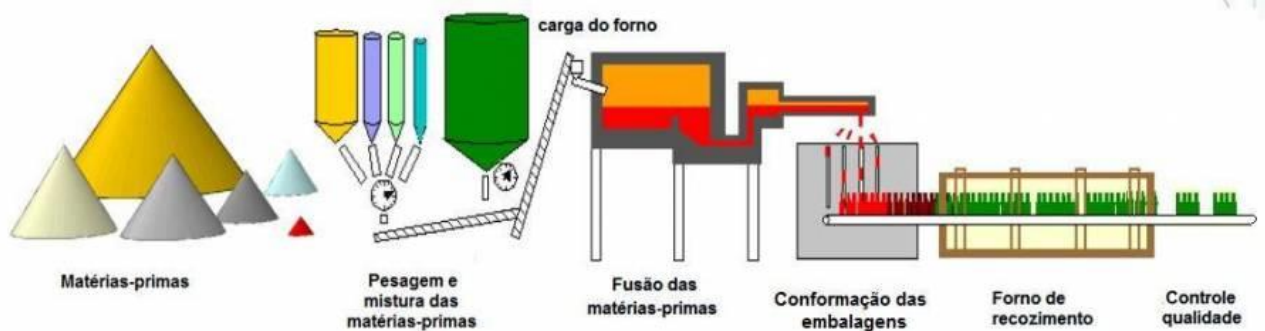


Figura 9- Fluxograma de uma fábrica de vidro embalagem [37].

O vidro é maioritariamente composto por areia. Os átomos dos grãos de areia dispõem-se sobre uma forma organizada e repetitiva, formando cristais, como se pode ver na Figura 10. Ao fundirmos estes grãos a organização é quebrada e com o arrefecimento rápido a reorganização não acontece. Institui-se, assim, nos átomos de areia uma inconsistência na organização (tornam-se amorfos). Formasse então, o vidro com as características e propriedades pretendidas.

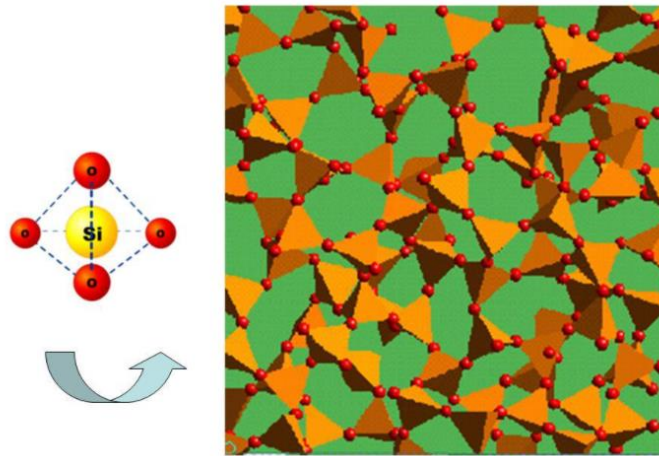


Figura 10-Estrutura e organização dos átomos de areia [36].

O vidro é 100% reciclável, pode ser utilizado uma vez e, posteriormente, ser fundido para formar novos vidros, sem perda de qualidade ou pureza. Porém, cada tipo de vidro deve aglomerar-se consoante as suas características, ou seja, para que este seja reciclado, o vidro de janelas não deve ser misturado com o vidro de embalagens, por exemplo.

Para a formação de novo vidro a partir da reciclagem, o vidro já utilizado é lavado e triturado e esses cacos são misturados novamente com areia, calcário, sódio, outros minerais, nas respetivas quantidades, conforme ilustrado [36] na Figura 11, e por fim fundidos [38].



Figura 11 - Percentagens da Composição do Vidro Reciclado [15].

O caco de vidro é armazenado em silos e, posteriormente, levado até ao forno de fusão, onde são doseadas as quantidades para as misturas pretendidas, consoante o tipo de vidro. No forno, a 1600°C, a mistura funde progressivamente e a pasta sai do forno para as máquinas de moldação através de canais aquecidos. As máquinas de moldação, por sua vez, distribuem a massa fundida através do dispositivo de corte gota a gota.

Com a introdução da gota de vidro incandescente, dentro do molde e contramolde, e com a inserção de um sopro de ar obtém-se a embalagem pretendida. Findando o processo, a embalagem sofre o recozimento (arrefecimento rápido) para obter a resistência necessária, e sofre uma inspeção, caso não se encontre devidamente elaborada, volta em forma de caco para dentro do forno, iniciando um novo ciclo produtivo.

As preocupações ambientais assumiram na última década um papel preponderante na sociedade moderna, não tendo obviamente Portugal fugido à regra, denotando-se um acréscimo da reciclagem ao longo dos anos, como se comprova na Tabela 3 pelo seu registo de 193 798 toneladas de vidro recicladas no ano de 2020.

Tabela 3- Reciclagem do Vidro em Portugal [39].

	Quantidade de Vidro reciclado em Portugal (toneladas)
2017	165 915
2018	173 789
2019	191 632
2020	193 798

Em 2011, Portugal especulava reciclar aproximadamente 60% do vidro produzido, valor que só foi igualado nesse mesmo ano e em 2012 [40]. Somente em 2019 é que a percentagem de reciclagem teve um incremento de 3% (Figura 12) ultrapassando a meta estipulada para 2011.

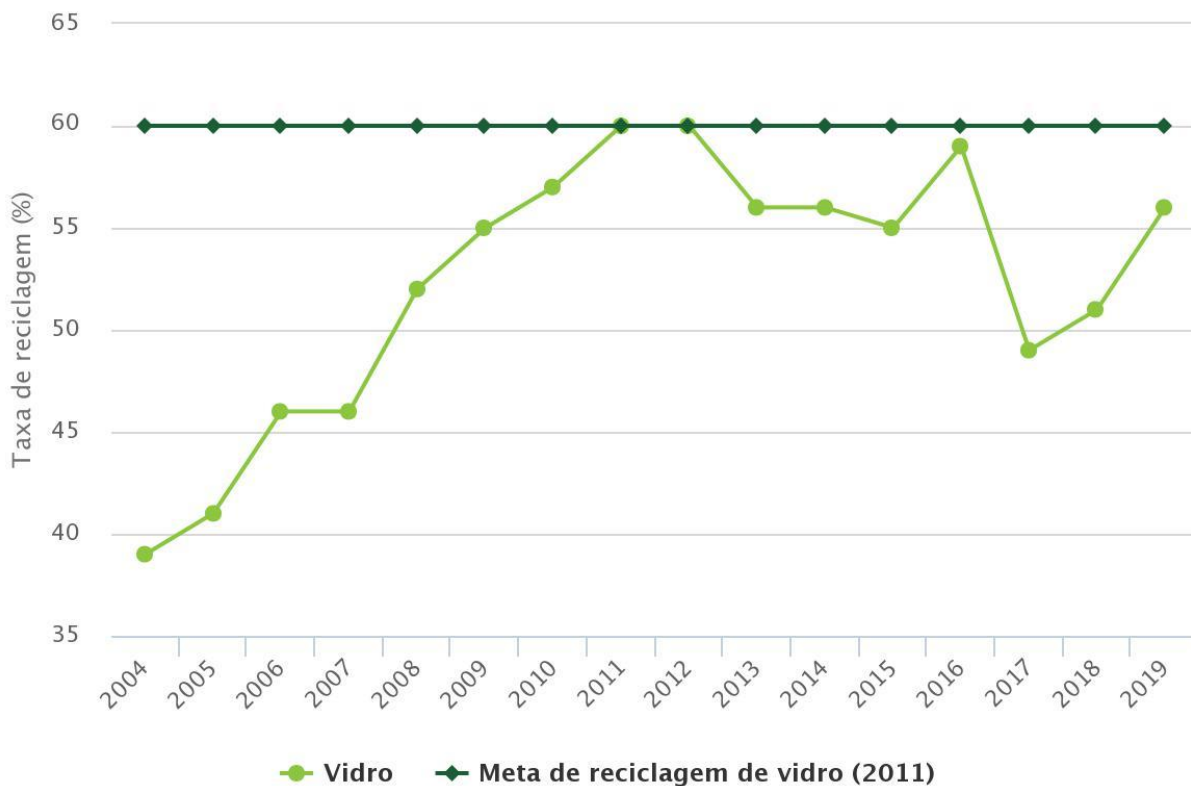


Figura 12 – Percentagem de resíduo de vidro reciclado em Portugal entre 2004 e 2019 [40].

Contudo em 2019, Portugal apesar de todo o esforço, ainda se encontrava em 17º lugar (ver Figura 13) na produção de resíduos de vidro não reciclados a nível europeu [40].

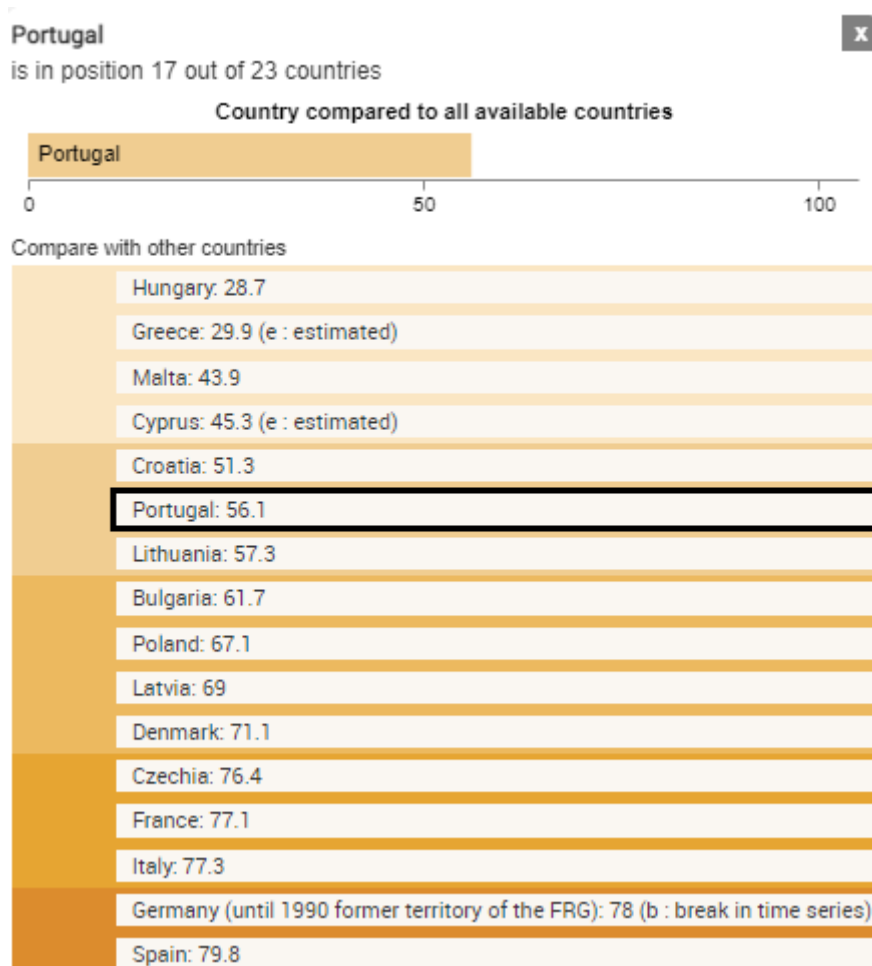


Figura 13 – Classificação de Portugal a nível europeu [40].

Pensando no pó de vidro como possível alternativa às cinzas volantes, é fundamental responder a seguinte questão: *Haverá quantidade de resíduo de vidro suficiente para este ser uma alternativa às cinzas volantes, como substituto parcial do cimento nos betões e argamassas?*

Segundo a ATIC [41], em 2018, em Portugal, foram gastos cerca de 2.6 milhões de toneladas de cimento. Admitindo uma percentagem de substituição de cimento por pó de vidro de 20% (valor global, que pode ser considerado elevado), seriam necessárias aproximadamente 500 mil toneladas de resíduo de vidro, sendo que foram declaradas 398 817 toneladas de embalagens de vidro, das quais 48,6% foram recicladas. Assim, restariam 200 toneladas para a indústria do betão e das argamassas. Sendo que em 2019, foram recolhidas apenas 56% das embalagens de vidro, é de

esperar que haja disponível mais cerca de 200 000 toneladas de embalagens vidro se a taxa de reciclagem se aproximar dos 100%. A somar às anteriores 200 000 toneladas, poderá ser razoável atingir cerca de 400 000 toneladas de embalagens de vidro disponíveis para uso em betões e argamassas. Ou seja, parece ser plausível responder afirmativamente à questão anteriormente formulada.

2.3.2 Vidro Sodo-Cálcico

Tal como o próprio nome indica, trata-se de vidros à base de cálcio, sódio e sílica. Estes elementos conferem uma maior resistência ao produto final. Atualmente, é o vidro mais comum, podendo referir-se exemplos como o de garrafas, frascos, janelas e tubos de lâmpadas [42].

Os principais componentes que distinguem as cores dos vidros sodo-cálcicos mais utilizados são o trióxido de enxofre (SO_3), o óxido de ferro (Fe_2O_3) e o óxido de cromo (Cr_2O_3), como se pode constatar na tabela seguinte.

Tabela 4 - Composição química dos Vidros Sodo-Cálcicos [43].

Vidros Sodo-Cálcicos	Composição química (%)						
	SiO_2	Na_2O	Al_2O_2	MgO	SO_3	Fe_2O_3	Cr_2O_3
Branco	72.2 –	13.6 –	1.7 –	10.7 –	0.20 –	0.04 –	-----
	73.5	14.1	1.9	10.8	0.24	0.05	
Âmbar	71.9 –	13.8 –	1.7 –	11.6	0.12 –	0.30	0.01
	72.4	14.4	1.8		0.14		
Verde	71.3	13.1	2.2	12.2	0.05	0.56	0.43

Constata-se que a composição química do vidro não varia significativamente com a sua cor uma vez que para a sua coloração requer uma quantidade mínima de óxidos metálicos e estes não são alcalinos [44].

Quando este material é reduzido a pó apresenta uma morfologia de arestas vivas e uma textura da superfície lisa [45], tal como mostrado na Figura 14. Para além disso, análises energéticas

dispersivas por raio X (EDX), comprovam um pico de alta intensidade em elementos como a sílica, ferro e cálcio, como se verifica na Figura 15.

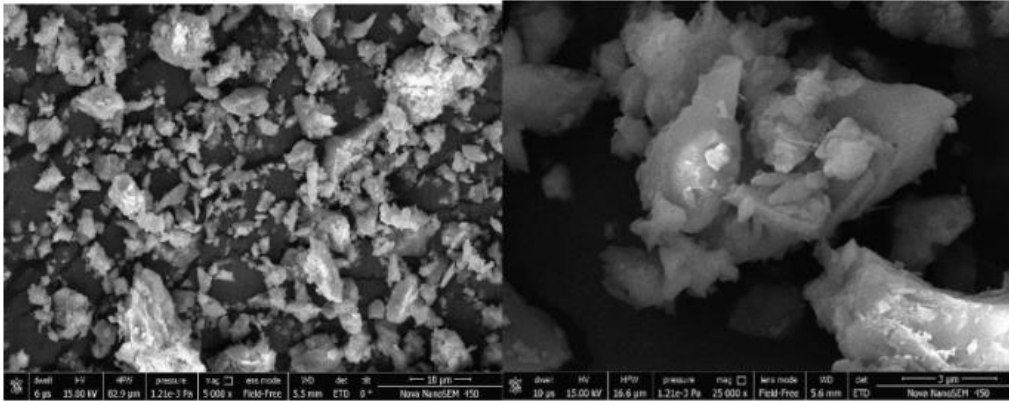


Figura 14- SEM do pó de vidro [45].

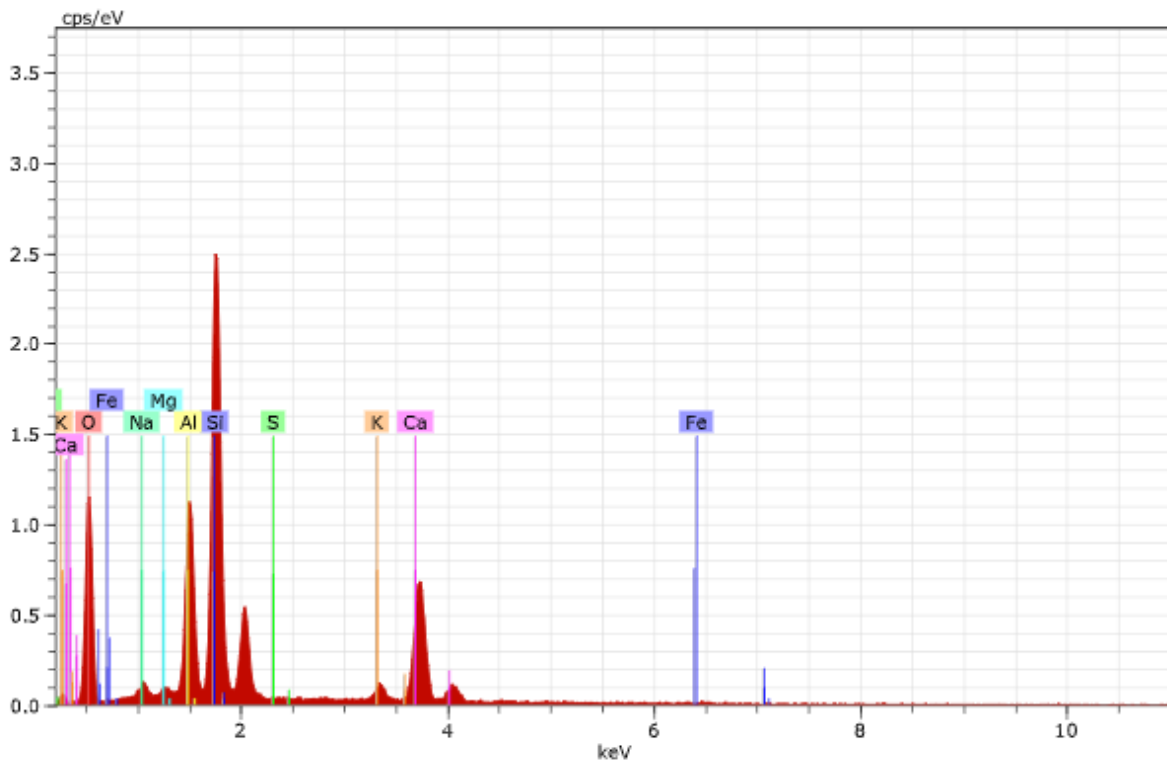


Figura 15 - Análises energéticas dispersivas por raio X (EDX) do vidro [46].

2.3.3 Vidro Sodo-Cálcico como adição

Com a extinção das cinzas volantes urge adotar uma nova adição, semelhante a esta ou que mantenha propriedades físicas e mecânicas semelhantes às do cimento. O vidro sodo-cálcico finamente moído, apresenta uma alta reatividade pozolânica, pois a sílica misturada com água reage com o hidróxido de cálcio, formando um composto aglomerante.

Vários estudos têm vindo a ser feitos com este material reduzido a pó, assegurando, alguns dos quais, que consoante a finura do pó de vidro aumenta e o tamanho das partículas diminui, a sua resistência à compressão e a reatividade aumentam.

Shao et al.[47] obtiveram um aumento de 30% da resistência à compressão aos 90 dias de idade no betão com pó de vidro, realizado com substituição de até 15% de cimento, em comparação com o betão com cinzas volantes, cuja resistência era equivalente à de uma mistura contendo apenas cimento. O trabalho de Shi et al.[48] confirmou este resultado, uma vez que argamassas contendo 20% de vidro de finura superior a $264 \text{ m}^2/\text{kg}$ tiveram um melhor desempenho mecânico que as argamassas com cinzas volantes em todas as idades estudadas (1, 3, 7 e 28 dias). Já Park et al.[49] e Sobolev et al.[50] encontraram diferenças significativas no desempenho dos vidros com diferentes cores, enquanto Karamberi e Moutsatsou [51] e Dhir et al.[52] mostraram que o vidro verde e o branco mostraram índices de atividade aos 28 dias de idade mais elevados do que o vidro âmbar, como se corrobora na seguinte Figura 16.

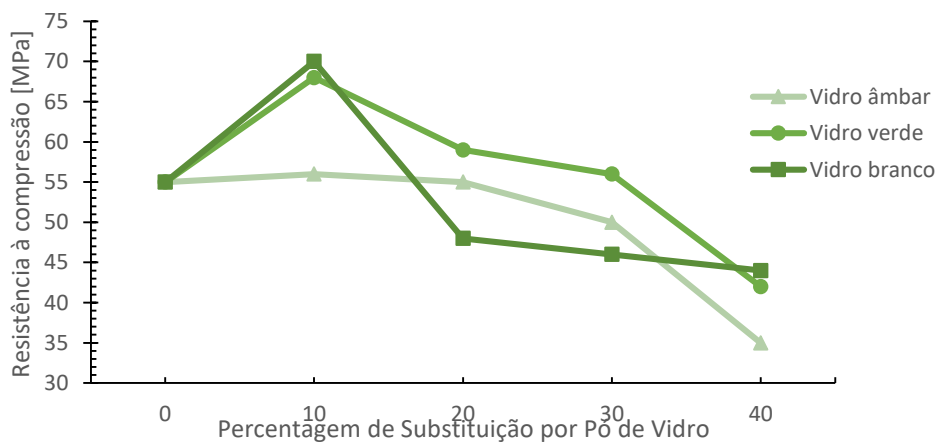


Figura 16 - Resistência à compressão com diferentes percentagens de substituição [51], [52].

A Figura 17 apresenta a resistência à compressão das argamassas contendo vidro moído com diferentes granulometrias (G2:1250 – 2500 μm ; G4: 630 – 1250 μm ; G18: 60 – 315 μm ; G200: <80 μm ; G540: <41 μm) com diferentes substituições de cimento por vidro em volume (0%, 10%, 20% 30% 40%) [53].

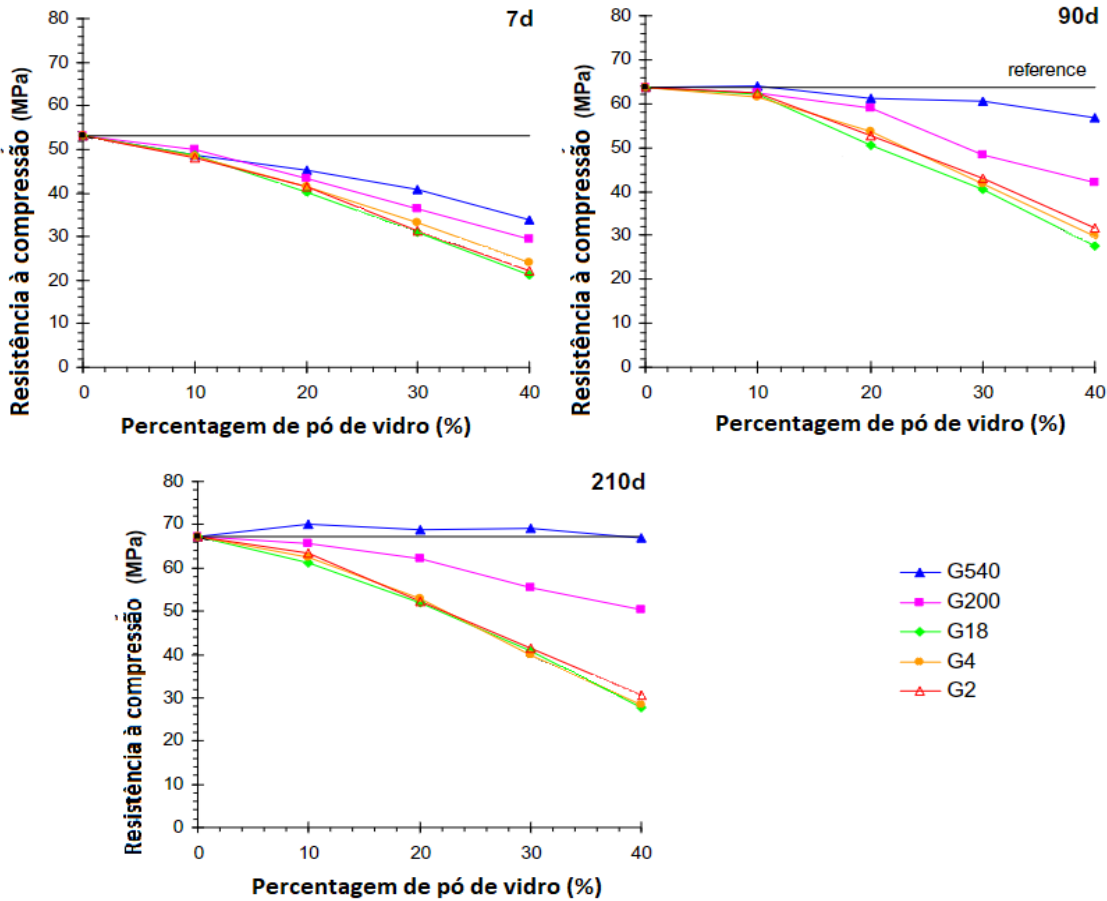


Figura 17- Resistência à compressão com diferentes granulometrias [53].

Como se pode analisar na Figura 13 as resistências dependem da finura e do teor substituição de cimento por vidro. As resistências mais elevadas, no caso, foram atingidas para as partículas mais pequenas (G540), que apresentaram valores superiores aos de referência sem vidro até uma substituição de 40%. Porém, é tendência geral ocorrer uma diminuição da concentração de cimento

consoante o aumento da incorporação do pó de vidro, o que se reflete posteriormente numa menor resistência à compressão [53].

Aliabdo [54], indica que 20% de substituição de cimento por pó de vidro com tamanho de partícula inferior a $63\mu\text{m}$, confere uma resistência à compressão comparável com a argamassa de referência aos 90 dias. Enquanto que no caso de partículas inferiores a $75\mu\text{m}$, apenas 10% a 15% de substituição de cimento por pó de vidro satisfazem as mesmas condições. Parghi et al.[55], concluíram que a resistência à compressão de uma argamassa que na sua constituição integre 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de pó de vidro, com partículas de tamanho inferior a $75\mu\text{m}$, evolui de forma crescente à medida que a substituição do cimento aumenta, em comparação com a argamassa de referência aos 7, 28 e 90 dias.

Analisando a Figura 18, verifica-se que Islam[56], em idades de curas mais longas, aos 28 e 90 dias, obteve uma variação aproximadamente linear entre os resultados obtidos para as diferentes percentagens de substituição, confirmando-se o cenário de que as resistências decrescem monotonamente à medida que se aumenta o valor da percentagem de incorporação do pó de vidro.

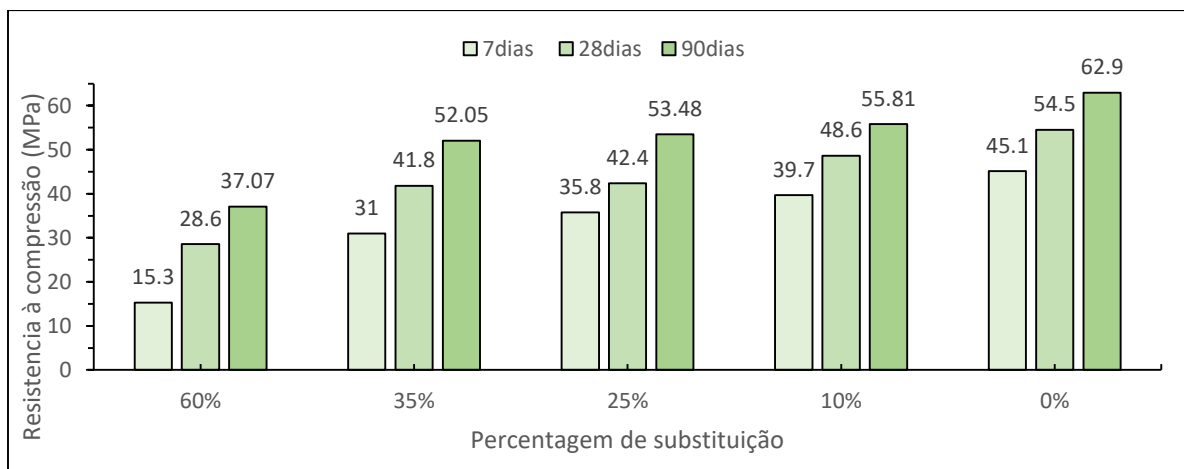


Figura 18 - Resistência à compressão de argamassas para diferentes idades de cura [26].

Islam [57], salienta que, aos 90 dias, a resistência à compressão para uma substituição de 10% foi superior à da argamassa de controlo. A mesma tendência foi observada para os 180 dias, sendo

15% de substituição de cimento por pó de vidro a mistura que apresentou os melhores resultados. À imagem dos 90 dias, aos 365 dias, 20% de substituição exibiu uma resistência de compressão 8% superior à argamassa de controle, como se verifica na Figura 19.

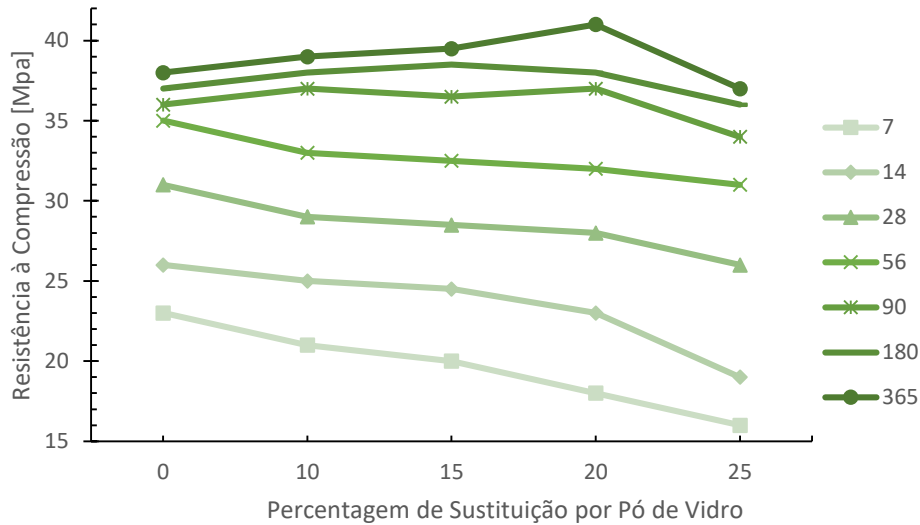


Figura 19 - Resistência à compressão para 180 e 365 dias [57].

Khan et al. [58], concluíram que a resistência à compressão, à flexão e à tração do betão e da argamassa aumentou significativamente devido à maior reação pozolânica e ao efeito de preenchimento dos vazios com partículas cada vez mais finas, provenientes do pó de vidro. Daí pode concluir-se que, em geral, as características mecânicas do betão e da argamassa aumentam com a diminuição do tamanho das partículas de vidro e são mais pronunciadas quando o tamanho da partícula se situa entre os 20 e os 45 μm .

Normalmente, as misturas cimentícias ganham resistência principalmente a partir da hidratação do cimento, enquanto no caso das misturas com pó de vidro esse aumento surge como resultado tanto da hidratação como das reações pozolânicas. A atividade pozolânica do pó de vidro é baixa nas idades iniciais, portanto o vidro incorporado nas misturas mostra resultados menos significativos nesse intervalo de tempo [58].

Korjakins et al. [54] relataram que a resistência à compressão aumentou gradualmente até aos 365 dias de cura e mostrou um valor mais elevado do que o betão de controlo em todas as idades de cura, entre 7 a 365 dias. A Figura 20 comprova o desenvolvimento da resistência do betão com a idade para diferentes percentagens de pó de vidro [59].

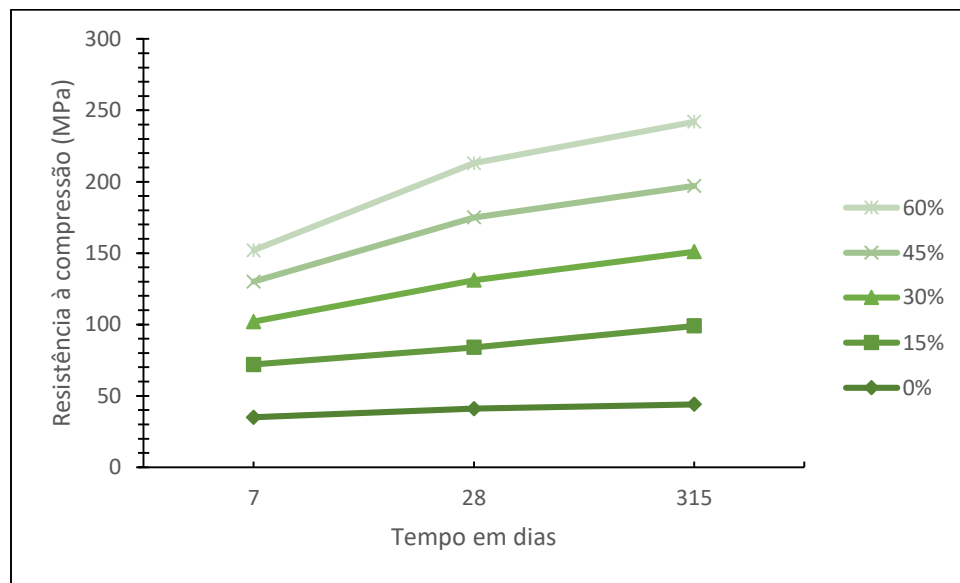


Figura 20 – Desenvolvimento da resistência à compressão com o tempo [59].

Outro campo de interpretação do impacto da incorporação do vidro nas argamassas é o que concerne às reações álcalis-sílica (RAS). As reações álcalis-sílica são reações químicas que causam expansão do agregado pela formação de um gel solúvel e viscoso de silicato de sódio, no qual este gel higroscópico incha e aumenta de volume ao absorver água, comprometendo o potencial do betão e/ou argamassa. De acordo com Stark et al. [60] estes géis são responsáveis pela expansão que ocorre nos materiais à base de cimento devido à chegada tardia dos iões de cálcio (que se difundem lentamente em comparação com os álcalis). Os álcalis que penetram nas partículas de vidro regem com a sílica e produzem géis de RAS contendo uma pequena quantidade de cálcio (Figura 21).

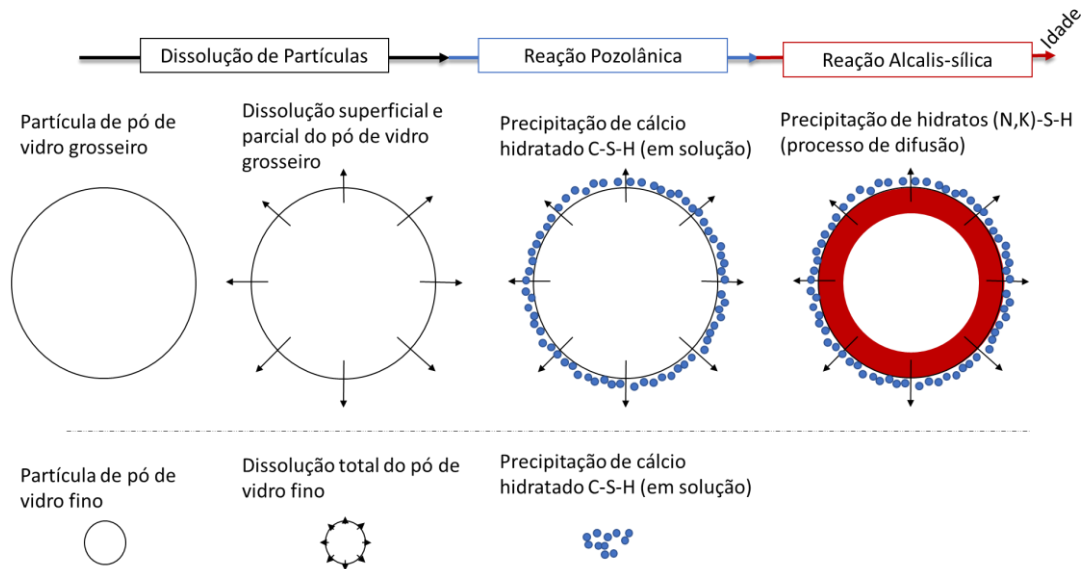


Figura 21- Reações álcalis-sílica sucessivas de pó de vidro fino e grossoiro [53].

Gupta et al. [46] afirmam que a absorção de água e a densidade são reduzidas pela utilização de vidro sodo-cálcico. O encolhimento por secagem atenua-se com a utilização de resíduos de vidro. A expansão associada à RAS reduz devido à menor dimensão das partículas de vidro. O refinamento dos poros e a diminuição da porosidade ocorre devido ao hidróxido de cálcio e à reação do pó de vidro, sendo esta uma reação pozolânica que produz hidrato de silicato de cálcio (C-S-H) gel.

Huanget al. [61], relataram que os álcalis no cimento aceleram a hidratação em idades precoces. A alta adição de cimento alcalino reduz o período de indução e promove a dissolução do silicato tricálcico e a formação do hidróxido de cálcio. De acordo com Du et al.[62], o pó de vidro fino acelera a hidratação através da adsorção de íons de cálcio da fase líquida e atua como locais de nucleação e crescimento do C-S-H e outros hidratos. Além disso, o maior teor de óxidos de sódio pode atuar como catalisador na formação e crescimento do C-S-H em idades precoces [63], [64]. A redução do transporte de massa de íons devido à densificação da microestrutura como resultado da reação pozolânica também foi notada como um fator que contribui para a redução dos álcalis na solução de poros para a reação RAS [45].

Bignozzi et al comprovam que a reação álcalis-sílica ocorre geralmente quando os álcalis contidos no cimento reagem com certas fases de sílica (principalmente fases amorfas) presentes nos agregados [65], como verificado na Figura 22.

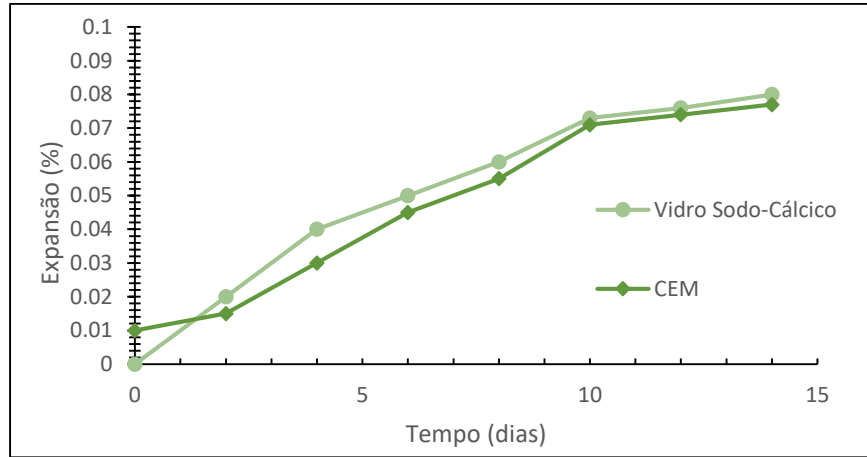


Figura 22 - Expansão da argamassa curada a 80°C imersa na solução de 1M NaOH por 14 dias [65].

Tal como as cinzas volantes, o pó de vidro tem efeito redutor na expansão RAS que pode ser atribuído à sua característica pozolânica, como se afere na Figura 23 [66].

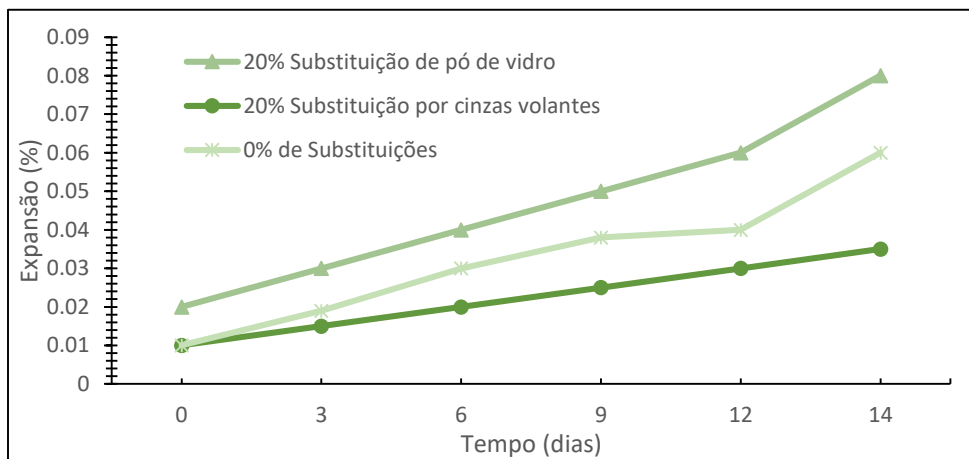


Figura 23 - Comparação entre a RAS do pó de vidro e das cinzas volantes [66]

3. MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A estruturação do presente capítulo foca essencialmente na exposição dos materiais utilizados e os procedimentos adotados desde a seleção das tipologias de vidro a utilizar, a sua transformação num formato que permita a sua inclusão em conjunto com outros elementos fundamentais em argamassas e betões. A preparação das diferentes misturas também é aqui abordada e, complementarmente, avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos provetes produzidos em laboratório.

3.1 Obtenção e caracterização do pó de vidro

3.1.1 Seleção da tipologia de vidro

Tal como mencionado na revisão da literatura, o vidro encontra-se implementado na sociedade nos mais variados formatos e utilizações. Assim, para levar a cabo a investigação inerente a esta dissertação, foi necessário definir a origem do vidro que seria alvo de estudo. Tendo por base critérios de natureza económica e logística, a escolha recaiu na utilização de vidro tipicamente proveniente de embalagens de uso comum, estando uma parte da amostra exposta na Figura 24.



Figura 24 - Lavagem e triagem de parte das embalagens de vidro utilizada durante a pesquisa.

É sabido que a diferentes cores de embalagens correspondem diferentes composições químicas, e como se quer definir qual a composição que trará melhores resultados na aplicação proposta (substituição parcial do cimento), foram obtidas embalagens de três cores distintas: vidro âmbar, vidro branco e vidro verde. Para mitigar a inclusão de impurezas indesejadas nas fases seguintes, as amostras foram devidamente lavadas e segregadas pela sua cor, tal como se comprova na Figura 25. A sua secagem foi feita ao ar livre durante 15 dias. Após este período, as garrafas foram sujeitas a uma cuidada análise visual para confirmar seu estado de secagem completa e a isenção de impurezas. Só depois foram encaminhadas para ensaio.



Figura 25 - Separação do vidro por cor.

3.1.2 Moagem do vidro

Para que o vidro possa ser incorporado em betões e argamassas e constituir uma adição com eventuais benefícios físicos e mecânicos, optou-se por transformá-lo no chamado pó de vidro. Uma vez que, segundo a literatura sobre o assunto [50], [51], a finura do material se encontra fortemente relacionada com a sua pozolanicidade e tendo em conta, também, os equipamentos disponíveis em laboratório, procurou-se atingir a menor finura possível (inferior a $75 \mu\text{m}$).

Este foi um dos primeiros grandes desafios do trabalho, pois trata-se um trabalho extremamente moroso, uma vez que, para obter 15 quilogramas de pó de vidro com as características esperadas para a utilização na argamassa, foram necessários 150 quilogramas de embalagens de vidro e 96 horas de moagem.

Fazendo uso das valências técnicas e dos equipamentos disponíveis no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, foi tomada a opção de utilizar a Máquina de desgaste de Los Angeles, Figura 26, como suporte central para a transformação mencionada anteriormente.



Figura 26 - Máquina de desgaste de Los Angeles utilizada durante a pesquisa.

Ainda que a finalidade prevista para este equipamento seja o desgaste de agregado, para determinar a sua resistência à fragmentação de acordo com o disposto na NP EN 1097-2 (2011) [67], o mesmo tem um mecanismo de funcionamento prático e eficaz na moagem de materiais de adição como o caso do vidro. O procedimento experimental adotado será descrito de seguida:

- ✓ Inserir 20 esferas de ferro fundido no interior da máquina (massa igual a 8,74 kg);
- ✓ Inserir 20 quilogramas de vidro (quantidade da amostra para cada tipologia);
- ✓ Fechar a máquina colocando a tampa e os respetivos parafusos;
- ✓ Dar início aos ciclos de moagem (15 minutos por ciclo);
- ✓ Executar 10 ciclos com intervalo de 15 minutos entre eles;
- ✓ Findados 10 ciclos (número de ciclos possíveis de realizar dentro do horário laboral), deixar repousar durante 12 horas para evitar perda das partículas mais pequenas aquando da abertura da máquina;

- ✓ Retirar uma porção de material da máquina e efetuar a peneiração registrando a percentagem de passados e retidos no peneiro de 75 μm .

Este procedimento foi estipulado após o estudo prévio para a escrita do estado do conhecimento, que permitiu verificar que vários autores afirmam que quanto mais refinado o pó melhor este se comportará e foi otimizado à medida que as tentativas foram sendo repetidas. A finura do material é uma propriedade relevante para o desenvolvimento de reações pozolânicas e, neste sentido, a variável de decisão que ditava a continuidade, ou não, do processo cíclico na máquina Los Angeles foi a percentagem de finos que passava no peneiro 75 μm . O objetivo era obter a maior percentagem possível.

Na Figura 27 é possível verificar, à esquerda, a componente de material que ficou retida no peneiro 75 μm , enquanto à direita se encontra a parte que passou nesse mesmo peneiro. Este primeiro processo de peneiração foi efetuado ao cabo de 10 ciclos de moagem na máquina de Los Angeles.



Figura 27 - Resultado da peneiração após 10 ciclos na máquina de Los Angeles.

Considerando que ainda seria possível aumentar razoavelmente a percentagem de resíduo com dimensões inferiores a 75 μm , o procedimento descrito anteriormente foi repetido consecutivamente, até perfazer 20 ciclos (Figura 28), 30 ciclos (Figura 29) e, por fim, 40 ciclos (Figura 30).

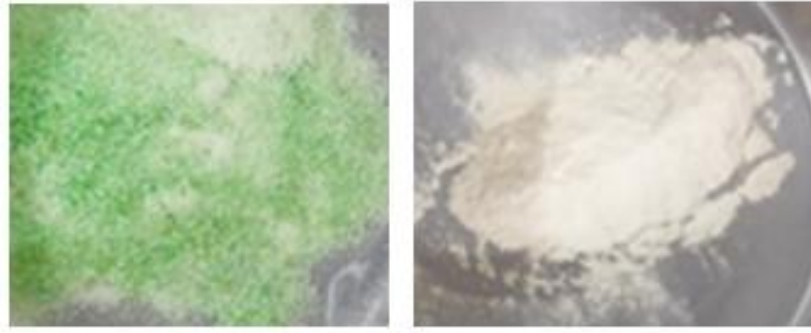


Figura 28 - Resultado da peneiração após 20 ciclos na máquina de Los Angeles.

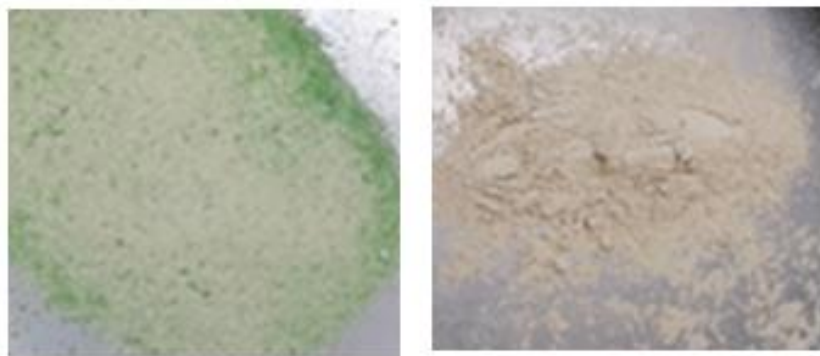


Figura 29 - Resultado da peneiração após 30 ciclos na máquina de Los Angeles.



Figura 30 - Resultado da peneiração após 40 ciclos na máquina de Los Angeles.

Paralelamente à execução da peneiração efetuou-se o registo da percentagem de massa de vidro que passava e que ficava retida no peneiro 75 μm , para cada subdivisão de ciclos, como será mostrado mais à frente. A massa retida no peneiro de 75 μm , foi novamente inserida na máquina do Los Angeles para que obtivesse a dimensão ótima.

É de salientar que o procedimento de peneiração foi efetuado de forma manual e de acordo com a NP EN 933-1 (2014) [68], sendo o princípio de controlo o facto de não poder passar no peneiro 75 μm , ao cabo de um minuto, mais do que 1% da amostra colocada inicialmente.

Ao cabo de 40 ciclos a percentagem de passados já era razoavelmente elevada (33,96%). No entanto, tomou-se a decisão de não efetuar mais ciclos na Máquina de Los Angeles devido a diversos fatores, nomeadamente: a limitação temporal do período do mestrado, pois todo este trabalho era muito demorado, e ainda o facto de que à medida que o tamanho dos grãos vai diminuindo, os mesmos tornam-se mais angulosos e, conseqüentemente, mais resistentes, reduzindo desse modo o rendimento/eficácia desta técnica de moagem.

Tendo por base as limitações mencionadas anteriormente, foi necessário recorrer a um método de moagem mais incisivo. Neste caso, optou-se pela utilização conjunta do moinho de bolas (Figura 31 (a)). Com a utilização deste equipamento, é previsível a obtenção de grãos muito mais finos após um determinado número de ciclos.

O processo de preparação da moagem neste equipamento consistiu na colocação de uma amostra de 110 gramas de resíduo proveniente da moagem pré-efetuada na máquina de Los Angeles (40 ciclos), sendo esta colocada dentro de um recipiente de porcelana com 1 litro de capacidade, juntamente com 10 bolas de cerâmica esféricas com 10 mm de diâmetro (Figura 31 (b)).



(a)



(b)

Figura 31 – (a) Moinho de bolas; (b) Recipiente de porcelana utilizado em conjunto com o moinho de bolas.

À imagem da metodologia da moagem anterior, foram adotados ciclos consecutivos com a duração de 15 minutos com o tambor da máquina de Los Angeles em funcionamento, alternando com intervalos de 15 minutos em repouso, efetuando-se a peneiração de uma pequena quantidade de resíduo ao final de cada conjunto de dois ciclos, tendo como objetivo controlar a percentagem de resíduo que passava no peneiro de 75 μm .

Sendo que um dos objetivos era a aferição do “número de ciclos ótimo”, constatou-se que existe um aumento expressivo da percentagem de passados até ao 4º ciclo, onde se atingiu praticamente 100% de resíduo passado, havendo aí uma pequena inversão na tendência de aumento que se arrasta ao longo dos seguintes ciclos. Esta tendência pode ser justificada pela degradação das bolas de porcelana que com o embate no pote de porcelana se degradavam. Assim, com base nos resultados experimentais obtidos, presentes no próximo capítulo, tomou-se a decisão de substituir todas as bolas de porcelana ao quarto ciclo, de modo a obter a maior percentagem de passados no peneiro 75 μm .

Um dos grandes objetivos, e ao mesmo tempo parte integrante do desafio deste trabalho, residia na obtenção do procedimento para a transformação do vidro sólido num pó passível de ser incorporado nas misturas. Assim, e após todo o procedimento acima descrito ter sido adotado para o vidro verde, aplicou-se o mesmo aos restantes tipos de vidro, ou seja, 40 ciclos de Los Angeles e 10 ciclos de moinho de bolas, moendo-se quantidades consideráveis com vista à realização dos trabalhos posteriores.

De forma meramente expositiva apresentam-se nas Figuras 32 e 33, o pó resultante da moagem no moinho do Los Angeles para o vidro âmbar e para o vidro branco.



Figura 32 - Resultado da peneiração após 10 (a), 20 (b), 30 (c) e 40 (d) ciclos do vidro âmbar, respetivamente, na máquina de Los Angeles.

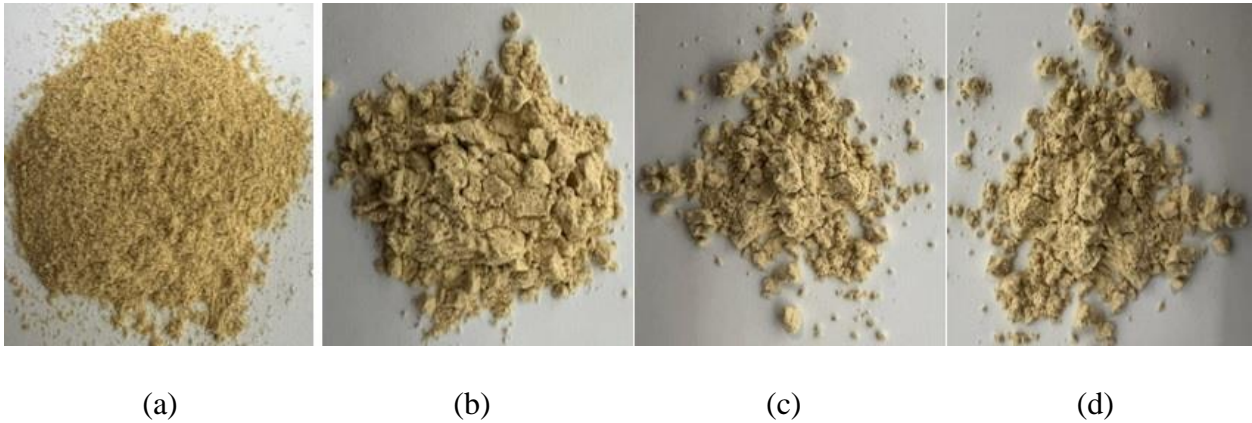


Figura 33 - Resultado da peneiração após 10 (a), 20 (b), 30 (c) e 40 (d) ciclos do vidro branco, respetivamente, na máquina de Los Angeles.

Para garantir que o pó de vidro cumpria os requisitos estabelecidos inicialmente, com recurso ao Laboratório de Engenharia Civil e do Ambiente do Instituto Politécnico de Viana do Castelo, realizou-se o ensaio de granulometria laser com recurso ao equipamento MasterSizer (Figura 34). Este ensaio, através de uma difração laser, mede o tamanho das partículas e a sua distribuição por tamanhos. Para que o ensaio ocorra da melhor forma possível, são introduzidas umas gramas de pó de vidro, gradualmente, na água destilada, até que o aparelho avise que a amostra já é satisfatória. Posto isto, a amostra interage com um feixe de laser, onde é medida a intensidade de luz espalhada. Estes dados são analisados e é automaticamente calculado o tamanho da partícula e criado o padrão de dispersão.



Figura 34 - Aparelho MasterSizer providenciado pelo Laboratório de Engenharia Civil e do Ambiente do IPVC.

3.1.3 Massa volúmica

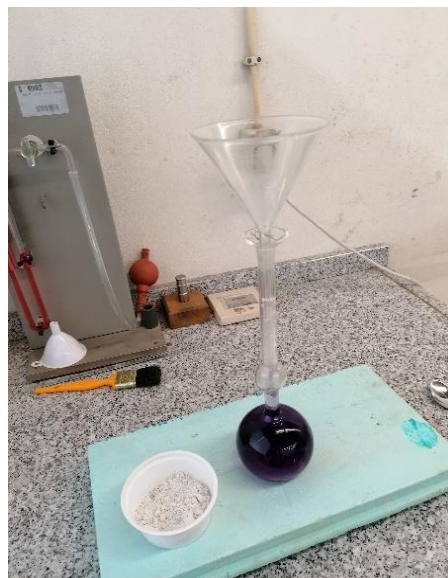
Tendo como foco principal atingir uma caracterização do material o mais exaustiva possível, prosseguiu-se para o estudo da massa volúmica do pó de vidro, de acordo com a norma NP EN 1097-6 (2016) [69]. A massa volúmica (ρ) corresponde, como o próprio nome indica, à propriedade de massa (m) por unidade de volume (V) ocupado pelas partículas sólidas, representada pela Equação 1 e expressa em g/cm^3 .

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{Equação 1}$$

O início deste ensaio é dado pelo enchimento, com gasolina, do balão volumétrico (Figura 35 (a)) entre as medidas de 0 a 1 cm, deixando-se depois repousar. Decorrido um intervalo de tempo igual a 15 minutos, efetua-se a leitura do valor inicial da altura do líquido.



(a)



(b)

Figura 35 – (a) Enchimento do balão Volumétrico de acordo com a norma NP EN 1097-6 (2016); (b) Introdução do pó de vidro no balão volumétrico.

Logo de seguida, é meticulosamente introduzido o pó de vidro no balão volumétrico tendo em atenção que o mesmo não fique retido nas paredes do mesmo. Agita-se o balão suavemente, para que ocorra dispersão das bolhas de ar e deixa-se repousar por mais 15 minutos, sendo no final desse tempo efetuada uma nova leitura (Figura 35 (b)).

Este procedimento foi efetuado 3 vezes para cada tipo de moagem: para os 0 ciclos (pó de vidro proveniente da moagem na máquina do Los Angeles (LA) após 40 ciclos), para os 2 ciclos efetuados no moinho de bolas (após 40 ciclos no LA), e sucessivamente para os 4, 6, 8 e 10 ciclos. O mesmo processo foi adotado para as diferentes colorações de pó de vidro em estudo, tendo os resultados obtidos sido bastante similares, como se poderá comprovar no capítulo 4. Contudo, para o pó de vidro âmbar e para o pó de vidro branco somente foram estudados os 0 ciclos (40 ciclos LA) e os 2 ciclos (40 ciclos LA + 2 ciclos no moinho de bolas), isto porque a metodologia foi sendo afinada com o pó de vidro verde, uma vez que era o que continha maior quantidade de embalagens para moagem.

3.1.4 Superfície específica

Para legitimar os resultados obtidos através do ensaio da massa volúmica e concluir a caracterização física do material, priorizou-se a determinação da superfície específica do pó de vidro.

A superfície específica correlaciona a superfície (área) de uma partícula e o seu volume (tamanho). Quanto maior for a partícula em estudo, menor será a sua superfície específica e, conseqüentemente, menor será sua porosidade do material granular.

Seguindo a norma NP EN 196-6 (2019) [70], para realizar este ensaio é necessário o aparelho de Blaine (Figura 36), discos de papel de filtro, um cronómetro, uma balança de precisão e a temperatura ambiente deverá rondar entre os 18°C e os 22°C com uma humidade relativa do ar não superior a 65%. Este modo consiste em fazer um controlo do tempo em que o gás atravessa a amostra contida na célula.



Figura 36 - Aparelho de Blaine.

Para dar início ao processo experimental, é necessário determinar a quantidade de amostra que cabe na célula tendo sido para isso necessário recorrer a uma folha de Excel previamente concebida. Posteriormente, limpa-se bem a célula e coloca-se o crivo metálico na parte inferior da célula, conferindo que os orifícios do mesmo não se encontrem obstruídos. Sobre o crivo, é colocado o papel de filtro e, recorrendo à balança de precisão, introduz-se meticulosamente a

quantidade de pó de vidro anteriormente calculada. De seguida, insere-se o segundo papel de filtro e com auxílio do êmbolo pressiona-se de forma suave, mas firme.

Posto isto, coloca-se a célula no topo do manómetro usando um pouco de vaselina para que este torne a superfície de contacto estanque. Retira-se o valor da temperatura ambiente e eleva-se o nível de líquido manométrico até a marca mais alta e retira-se o topo cronometrando o tempo entre a segunda e a terceira marca.

Tal como no ensaio da massa específica, este ensaio, também foi efetuado 3 vezes para cada tipo de moagem, e para cada cor de pó de vidro.

3.2 Argamassas com incorporação do resíduo de vidro moído

Para estudar as capacidades do pó de vidro como substituto parcial do cimento, conceberam-se argamassas em que o cimento Portland (CEM I 42,5 R) foi substituído por diferentes percentagens de pó de vidro, tendo sido tomadas decisões à medida que se iam obtendo e tratando os resultados experimentais relativos à obtenção do pó de vidro. Os pós de vidro verde foram apelidados consoante os ciclos de moagem como consta na Tabela 5, em que LA se refere à moagem na máquina de Los Angeles e MB ao moinho de bolas.

Tabela 5 - Nomenclatura para o pó de vidro verde.

Processo de Moagem	Nomenclatura
40LA	VV0c
40LA + 2 ciclos MB	VV2c
40LA + 4 ciclos MB	VV4c
40LA + 6 ciclos MB	VV6c
40LA + 8 ciclos MB	VV8c
40LA + 10 ciclos MB	VV10c

Numa fase inicial, incorporou-se sempre a mesma percentagem de pó de vidro (25%), mas com pó de vidro com diferentes ciclos de moagem. Posteriormente, decidiu-se estudar mais algumas percentagens de substituição, como por exemplo com 5%, 15% e 35%. Obviamente que, inerente a todas estas tentativas, esteve a necessidade de conceção de centenas de provetes. De forma a comparar os resultados obtidos com as argamassas com incorporação de pó de vidro, procedeu-se ao fabrico de duas argamassas padrão, uma apenas com cimento e outra com cinzas volantes. Assim, para facilitar a compreensão ao longo dos pontos seguintes, apresentam-se nas Tabelas 6, 7, 8 e 9 a nomenclatura utilizada para identificar as diferentes argamassas produzidas.

Tabela 6 - Nomenclatura de argamassas com 5% de substituição.

ARGAMASSAS COM 5% DE SUBSTITUIÇÃO					
<i>Nomenclatura</i>	<i>Referência</i>	<i>Cinzas Volantes</i>	<i>Vidro Âmbar</i>	<i>Vidro Branco</i>	<i>Vidro Verde</i>
REF CV 0 ciclos 2 ciclos	REF	CV_5%	VA0c_5% VA2c_5%	VB0c_5% VB2c_5%	VV0c_5% VV2c_5%

Tabela 7 - Nomenclatura de argamassas com 15% de substituição.

ARGAMASSAS COM 15% DE SUBSTITUIÇÃO					
<i>Nomenclatura</i>	<i>Referência</i>	<i>Cinzas Volantes</i>	<i>Vidro Âmbar</i>	<i>Vidro Branco</i>	<i>Vidro Verde</i>
REF CV 0 ciclos 2 ciclos	REF	CV_15%	VA0c_15% VA2c_15%	VB0c_15% VB2c_15%	VV0c_15% VV2c_15%

Tabela 8 - Nomenclatura de argamassas com 25% de substituição.

ARGAMASSAS COM 25% DE SUBSTITUIÇÃO					
<i>Nomenclatura</i>	<i>Referência</i>	<i>Cinzas Volantes</i>	<i>Vidro Âmbar</i>	<i>Vidro Branco</i>	<i>Vidro Verde</i>
REF CV 0 ciclos 2 ciclos 4 ciclos 6 ciclos 8 ciclos 10 ciclos	REF	CV_25%	VA0c_25% VA2c_25%	VB0c_25% VB2c_25%	VV0c_25% VV2c_25% VV4c_25% VV6c_25% VV8c_25% VV10c_25%

Tabela 9 - Nomenclatura de argamassas com 35% de substituição.

ARGAMASSAS COM 35% DE SUBSTITUIÇÃO					
<i>Nomenclatura</i>	<i>Referência</i>	<i>Cinzas Volantes</i>	<i>Vidro Âmbar</i>	<i>Vidro Branco</i>	<i>Vidro Verde</i>
REF CV 0 Ciclos 2 Ciclos	REF	CV_35%	VA0c_35% VA2c_35%	VB0c_35% VB2c_35%	VV0c_35% VV2c_35%

3.2.1 Materiais Utilizados

Para a constituição das argamassas foi utilizado o cimento CEM I 42,5 R, composto por mais de 95% de clínquer finamente moído e com 90% dos grãos com tamanho inferior a 25 μm (Figura 37), que permite produzir betões e argamassas de muito elevada resistência a curto prazo. De acordo com a sua ficha técnica, este deverá apresentar resistências à compressão superiores, aos 2 dias de aproximadamente 30 MPa e aos 28 dias de 42,5 MPa.

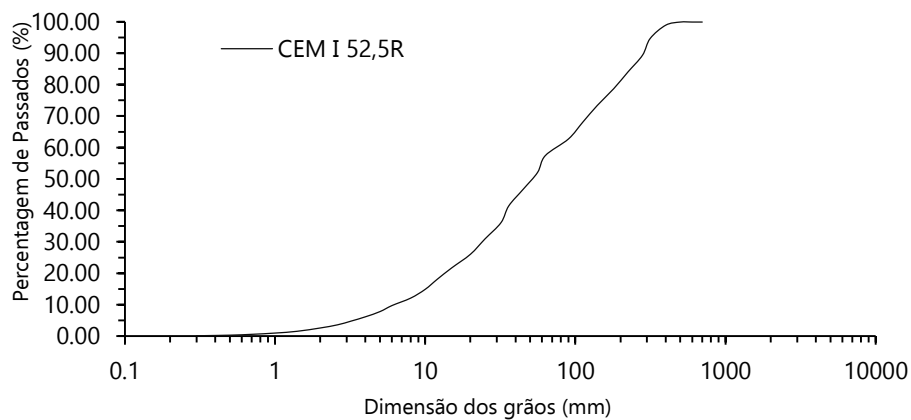


Figura 37 - Curva granulométrica do CEM I 42,5 R.

As embalagens de vidro, que foram transformadas em pó, como descrito no item 3.1.2 e que integrarão as argamassas como substituto parcial do cimento foram fornecidas por um estabelecimento comercial local.

As cinzas volantes que foram estudadas nas argamassas foram fornecidas pela Central Termoelétrica do Pego, apresentando 90% de partículas com dimensão inferior a 20 μm (Figura 38).

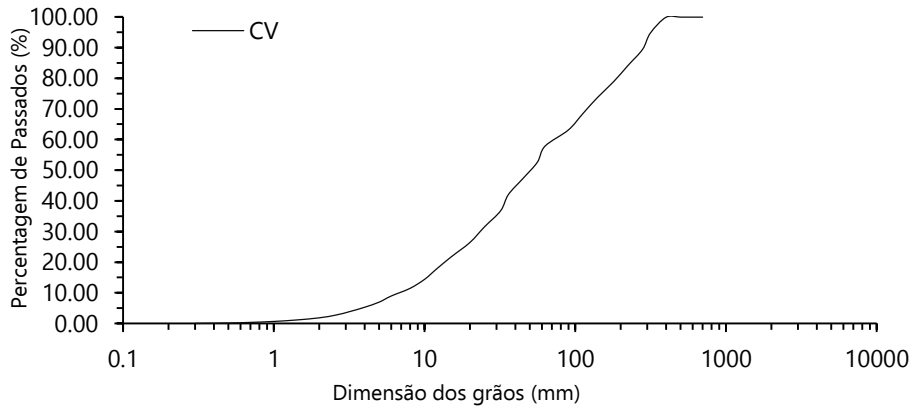


Figura 38 - Curva granulométrica das cinzas volantes.

A areia utilizada para o fabrico das argamassas, trata-se de uma areia fina de Rio Maior, fornecida pelo LMC. Resume-se a uma areia natural, com grãos arredondados e com um teor de pelo menos 99,4% de sílica. A sua dimensão máxima ronda os 500 μm , mas 78% das partículas tem grão inferior a 250 μm (Figura 39), apresenta uma massa volúmica de 2,62 Mg/m^3 .

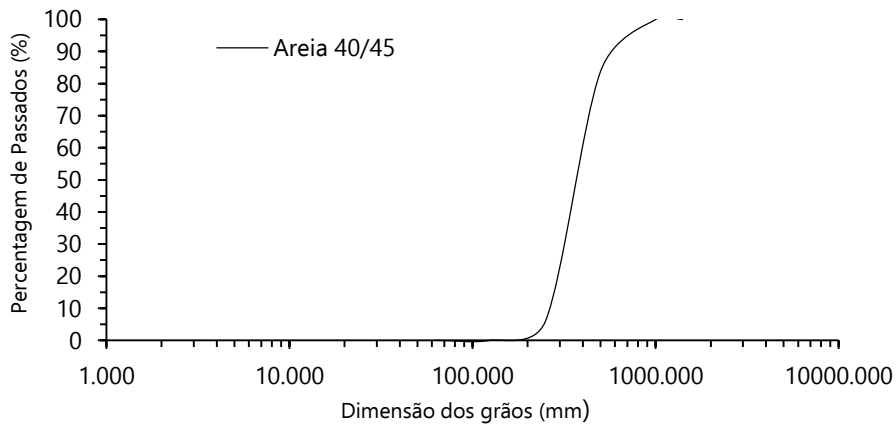


Figura 39 - Curva granulométrica da Areia 40/45.

3.2.2 Composição e fabrico de provetes

Concluída a caracterização do material, através dos ensaios descritos nos pontos anteriores, prosseguiu-se para o fabrico de provetes de argamassa, os quais posteriormente serviriam para obter as resistências à compressão para as diversas composições estudadas.

Numa primeira fase foi necessário avaliar qual a melhor razão água/ligante (a/l). Para isso, recorreu-se ao ensaio de trabalhabilidade, com base na NP EN 1015-3 (2006). Para realizar o ensaio de trabalhabilidade, e para economizar material foi preciso utilizar um molde cilíndrico com 25 mm de diâmetro e 60 mm de altura (Figura 40 (a)) diferente do normalmente usado neste ensaio, que por sua vez foi preenchido com a argamassa em duas camadas compactadas com 20 pancadas efetuadas na mesa de espalhamento (Figura 40 (b)).



Figura 40 - Ensaio de trabalhabilidade: (a) Molde adaptado; (b) Inserção da argamassa no molde.

Após a compactação, o molde foi removido e o comportamento apresentado pela argamassa foi avaliado. Em seguida, foram dadas 25 pancadas durante 15 segundos, medindo-se posteriormente o diâmetro da superfície apresentada (Figura 41).

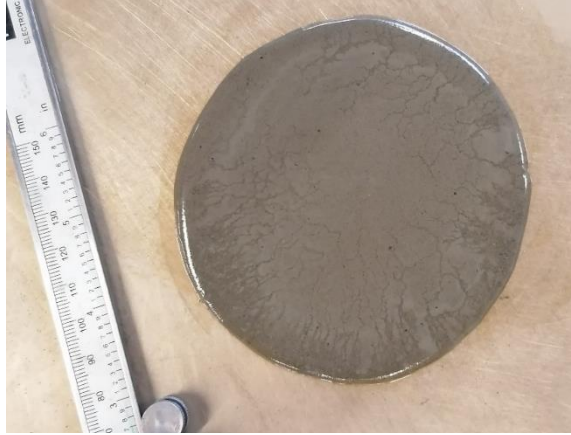


Figura 41 - Avaliação da trabalhabilidade.

Inicialmente adotou-se uma razão de $a/l=1$. No entanto, verificou-se a ocorrência de segregação de água. Optou-se por fazer uma redução da quantidade de água, para uma razão de $a/l=0,5$ e avaliar a trabalhabilidade da mesma.

Posteriormente, depois de avaliado o comportamento em fresco da amassadura, procedeu-se ao fabrico dos provetes de argamassa cúbicos com 20 mm de aresta. Estas dimensões foram definidas uma vez que exigem menos quantidade de material, nomeadamente, de pó de vidro que, como já foi dito, é de morosa obtenção. Em seguida, recorreu-se à Equação 2 para determinar as diferentes quantidades dos constituintes envolvidos na mistura. A Tabela 10 exhibe as quantidades utilizadas para cada molde e para $a/l=0,5$, sendo que cada um deles permite obter 15 provetes cúbicos (Figura 42), perfazendo então um total de 120 provetes cúbicos.

$$\frac{M_{Cem}}{\gamma_{Cem}} + \frac{M_{Areia}}{\gamma_{Areia}} + \frac{M_{Pó\ de\ Vidro\ ou\ Cinzas\ Volantes}}{\gamma_{Pó\ de\ Vidro\ ou\ Cinzas\ Volantes}} + \frac{M_{Água}}{\gamma_{Água}} + V_v = 1 \quad \text{Equação 2}$$

Designação:

M_x – Massa do material x , em kg, para $1m^3$ de argamassa;

γ_x – Massa específica real do material x , em kg/m^3 ;

V_v – Volume de vazios de $1m^3$ argamassa.

Tabela 10 - Quantidades necessárias para produzir $1m^3$ de argamassa.

	Componentes					
	Cimento (kg)	Cinzas Volantes (kg)	Pó de Vidro(kg)	Areia (kg)	Água (l)	Razão a/l
REF	717,2	----	0,00	1075,4	358,2	0,5
VA0c_5%	681,3	----	29,1	1075,4	358,2	0,5
VA0c_15%	609,6	----	87,2	1075,4	358,2	0,5
VA0c_25%	537,9	----	145,4	1075,4	358,2	0,5
VA2c_25%	537,9	----	148,0	1075,4	358,2	0,5
VA0c_35%	466,2	----	203,6	1075,4	358,2	0,5
VB0c_5%	681,3	----	29,4	1075,4	358,2	0,5
VB0c_15%	609,6	----	88,2	1075,4	358,2	0,5
VB0c_25%	537,9	----	147,0	1075,4	358,2	0,5
VV0c_5%	681,3	----	29,6	1075,4	358,2	0,5
VV0c_15%	609,6	----	88,7	1075,4	358,2	0,5
VV0c_25%	539,5	----	148,3	1075,4	358,2	0,5
VV2c_25%	539,5	----	139,3	1075,4	358,2	0,5
VV4c_25%	539,5	----	150,4	1075,4	358,2	0,5
VV6c_25%	539,5	----	158,8	1075,4	358,2	0,5
VV8c_25%	539,5	----	161,2	1075,4	358,2	0,5
VV10c_25%	539,5	----	167,6	1075,4	358,2	0,5
VV0c_35%	466,2	----	207,0	1075,4	358,2	0,5
CV_5%	681,3	27,4	----	1075,4	358,2	0,5
CV_15%	609,6	82,1	----	1075,4	358,2	0,5
CV_25%	539,5	102,9	----	1075,4	358,2	0,5
CV_35%	466,2	191,6	----	1075,4	358,2	0,5

Os valores apresentados anteriormente, na Tabela 10, correspondem à percentagem de substituição feita em volume, onde é determina a massa de cinzas volantes ou de pó de vidro que seria necessário incorporar de forma a corresponder ao volume ocupado por 5%, 15%, 25% e 35% da massa de cimento. Ou seja, primeiro calculou-se o volume correspondente à percentagem da massa de cimento a substituir. Depois, calculou-se a massa de adição necessária para ocupar esse mesmo volume de cimento.



Figura 42 - Moldes para os provetes cúbicos com 20 mm de aresta.

Tendo em vista a validação dos resultados dos provetes com 20 mm de aresta, para uma segunda fase da pesquisa, após a análise dos resultados de ensaios mecânicos que serão posteriormente descritos, foram ainda produzidos cubos de 50 mm de aresta, sendo estes fabricados seguindo exatamente o mesmo processo dos provetes de 20mm, para as misturas REF, VV0c_25%, VV2c_25% e CV_25% com uma razão de $a/l = 0,5$.

Passando para a exposição do procedimento adotado durante a conceção dos provetes, iniciou-se o processo efetuando, na balança de precisão, a medição da massa de todos os componentes acima mencionados. A amassadura foi praticada mecanicamente, num misturador existente no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho (Figura 43) com dimensões e características impostas na norma NP EN 196-1 (2017), consoante o procedimento determinado.

Para seguir a norma, as componentes de cimento, pó de vidro e água, por esta ordem, foram introduzidas todas de uma vez no misturador, onde foram envolvidas por 60 segundos sobre um movimento lento (145 ± 5 rpm) e nos seus 30 segundos finais, foi introduzida a areia. De seguida, a mistura sofreu um processo de rápido de 30 segundos. Depois, ocorreu uma pausa de 90 segundos, onde a argamassa descansou e se raspam as paredes do misturador. Este procedimento foi finalizado através da imposição de mais 60 segundos de mistura, mas com movimento rápido (285 ± 10 rpm).



Figura 43 - Misturadora do LMC utilizada durante a pesquisa.

Finalizada a amassadura, a argamassa foi colocada nos moldes (devidamente oleados) e, depois, foi compactada. A argamassa permaneceu nos moldes por 24 ± 2 horas, de acordo com a norma NP EN 196-1 (2017). Decorrido esse tempo, os provetes foram desmoldados e identificados consoante o grau de moagem e a cor do pó de vidro e a data de fabrico (Figura 44).

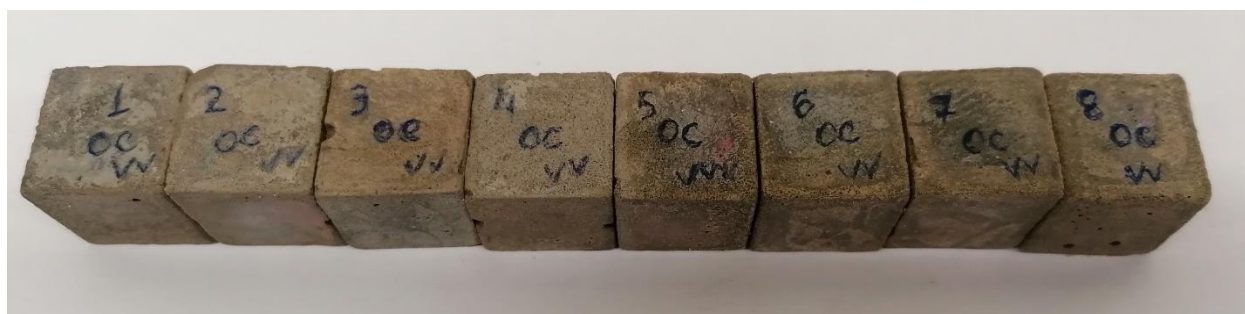


Figura 44 - Identificação dos provetes.

Para avaliar o efeito das diferentes condições de exposição sobre a resistência mecânica dos provetes, os provetes foram expostos aos seguintes cenários:

- i. submersos em água a uma temperatura de $20^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$;
- ii. submersos em água a uma temperatura de $90^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$;
- iii. Câmara de cura, a uma temperatura de $20^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$ e teor de humidade relativa não inferior a 90%.

3.2.3 Resistência à compressão

De modo a avaliar o desempenho mecânico, no que diz respeito à compressão, realizaram-se ensaios com base no que está estabelecido na Norma NP EN 196-1 (2017). Efetuaram-se ensaios para as idades de 7, 28 e 90 dias para cada tipo de argamassa e para cada tipo de cura.

Para este ensaio foi utilizada a prensa universal Loyds (Figura 46). Este equipamento regista a curva de resistência de cada provete, sendo que para isso foi necessário configurá-la para este tipo de material. Reserva-se para o Capítulo 4 a apresentação e discussão dos resultados obtidos para as diversas composições estudadas.



Figura 45 - Máquina Loyds.

3.2.4 Reação Álcali-silica (RAS)

Para avaliar o fenómeno da reação álcali-silica, já explicado no Capítulo 2, recorreu-se ao ensaio acelerado de expansão em barra de argamassa, seguindo a metodologia apresentada na norma americana ASTM C 1260 (2021), com a amassadura obtida de acordo com a Norma NP EN 196-1 (2017).

O molde utilizado para obter os provetes é o exposto na Figura 47, e tal como se pode denotar, possui dimensões distintas dos moldes cúbicos apresentados anteriormente. Foi, portanto, inicialmente necessário determinar qual a composição da argamassa para este novo tipo de provetes caracterizado pela dimensão de 250 x 25 x 25 mm, o processo de calculo utilizado, foi exatamente o mesmo.



Figura 46 - Molde para o ensaio RAS.

Expondo o procedimento experimental, inicia-se oleando o molde e depositando de seguida a argamassa produzida da mesma forma como descrito anteriormente, compactando-se a mesma de forma a criar um provete o mais homogéneo possível. Assim como nos provetes cúbicos com 20 mm de aresta, estes também permaneceram nos moldes durante 24 ± 2 h. Ao fim deste tempo, desmoldaram-se os provetes, meticolosamente para não os quebrar, identificando os mesmo por dia de fabrico, cor e número de ciclos de moagem do pó de vidro (Figura 48), fazendo ainda uma marca que permite saber qual a posição a medir.

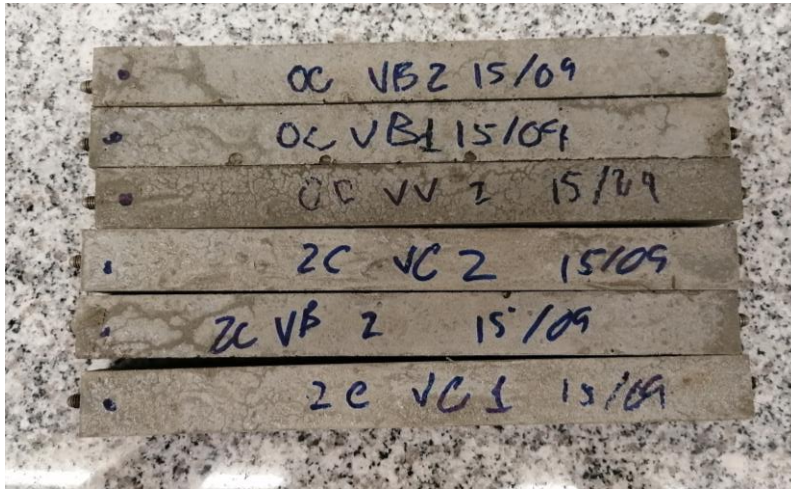
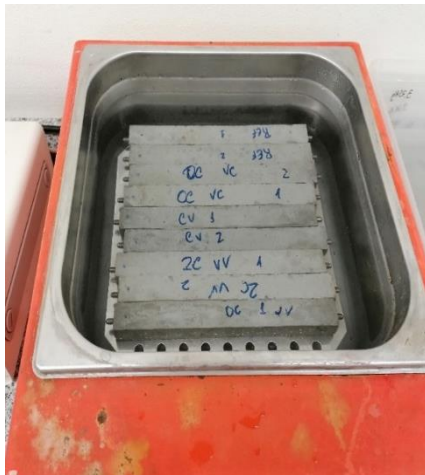
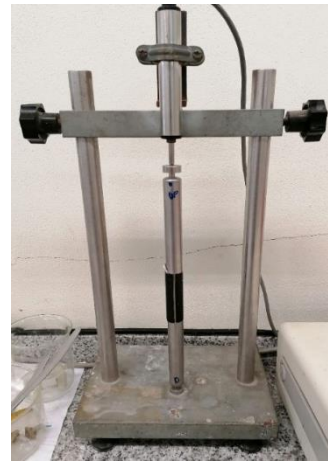


Figura 48 - Identificação dos provetes.



(a)



(b)

Figura 47 - Ensaio ARS: (a) Provetes imersos em água destilada a $80\pm 2^\circ\text{C}$; (b) Calibração do defletómetro.

Os provetes foram, posteriormente, imersos em água destilada a uma temperatura de $80\pm 2^\circ\text{C}$ por mais 24 horas (Figura 49 (a)). Passado esse período de tempo, mede-se a barra padrão (Figura 49 (b)), de aço inoxidável, que apresenta normalmente à temperatura ambiente um comprimento de 264 mm. Esta temperatura pode variar consoante a temperatura ambiente do espaço envolvente ($18\pm 2^\circ\text{C}$), porém considera-se que esta oscilação será muito reduzida tendo em conta o local onde as

medições foram efetuadas. A medição inicial serve para calibrar o defletómetro, avaliando a variação entre a barra-padrão e o provete.

Para medir os provetes, um a um, estes são retirados da água, e imediatamente secos com um pano seco, principalmente na região dos pernos, efetuando-se de seguida a medição. Todos os passos anteriormente descritos, não deverão ultrapassar os 15 ± 5 segundos a partir do momento em que o provete é retirado da água.

Na fase seguinte, os provetes passam para um novo estágio, onde são colocados em banho-maria numa solução de hidróxido de sódio (NaOH), numa proporção de 40g de NaOH para 1L de água destilada. Durante 14 dias foram efetuadas medições diárias, sensivelmente a cada 24 horas.

Quando necessário, o nível de água destilada e de NaOH foram repostos.

Para obter os resultados dos ensaios, foram utilizadas as seguintes equações:

- Cálculo da média aritmética do comprimento real em cada provete

$$L_x = \frac{\sum_{i=1}^2 L_i}{2} \quad \text{Equação 3}$$

Onde L_i é igual à medição do provete (depois do defletómetro zerado).

- Cálculo da expansão, ou seja, diferença entre o comprimento médio em cada dia e a leitura zero (L_0), em percentagem:

$$e = \frac{L_x - L_0}{250} * 100\% \quad \text{Equação 4}$$

Remete-se para o Capítulo 4 a apresentação e discussão dos resultados obtidos para todo este processo de avaliação da reação álcali-sílica.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Após apresentação dos materiais e dos procedimentos experimentais adotados, surge o presente capítulo que tem como principal diretriz a apresentação e devida análise dos resultados obtidos através das metodologias anteriormente descritas, sendo o objetivo a posterior realização de um conjunto de conclusões parciais e globais acerca do assunto em investigação - a incorporação do pó de vidro como substituto parcial do cimento em argamassas quando comparado com argamassas de controlo e argamassas contendo cinzas volantes.

4.1 Estudo do pó de vidro

4.1.1 Moagem

O procedimento para obtenção do pó de vidro foi devidamente descrito no Capítulo 3, pelo que de seguida apenas se apresentam os resultados de peneiração obtidos para as diversas fases do processo.

Inicialmente foram efetuados 10, 20, 30 e 40 ciclos de moagem no Los Angeles, tendo-se obtido os resultados presentes na Tabela 11. Importa salientar que os resultados apresentados abaixo foram obtidos para a tipologia de vidro verde. Este vidro serviu como referência para o trabalho e foi com ele que se realizou a maioria das abordagens iniciais à investigação levada a cabo.

Tabela 11 - Resultados da moagem no Los Angeles.

	Nº de Ciclos no Los Angeles			
	10 Ciclos	20 Ciclos	30 Ciclos	40 Ciclos
Massa Amostra (g)	54.80	157.10	121.59	193.70
Massa Retida no peneiro 75 µm (g)	47.00	123.50	87.59	127.91
Massa Passada no peneiro 75 µm (g)	7.80	33.60	34.00	65.79
Retidos no peneiro 75 µm (%)	85.77	78.61	72.04	66.04
Passados no peneiro 75 µm (%)	14.23	21.39	27.96	33.96

Posteriormente aos 40 ciclos efetuados no Los Angeles, ao que se intitulou de 0 ciclos, as amostras foram sujeitas a ciclos consecutivos de moinho de bolas, apresentando-se na Tabela 12 os resultados obtidos desde o ciclo 0 até ao ciclo número 10.

Tabela 12 - Resultados da moagem no moinho de bolas.

	Nº de Ciclos no Moinho de Bolas					
	0 Ciclos	2 Ciclos	4 Ciclos	6 Ciclos	8 Ciclos	10 Ciclos
Massa Amostra Peneirada (g)	193.70	75.70	13.82	8.89	4.06	13.90
Massa Retida no peneiro 75 μm (g)	127.91	33.15	0.10	0.14	0.09	0.63
Massa Passada no peneiro 75 μm (g)	65.79	42.55	13.72	8.75	3.97	13.27
Retidos no peneiro 75 μm (%)	66.04	43.79	0.72	1.57	2.22	4.53
Passados no peneiro 75 μm (%)	33.96	56.21	99.28	98.43	97.78	95.47

De modo a compreender a evolução ao longo dos ciclos da percentagem de passados, efetuou-se ainda a representação gráfica dos resultados obtidos (Figura 50).

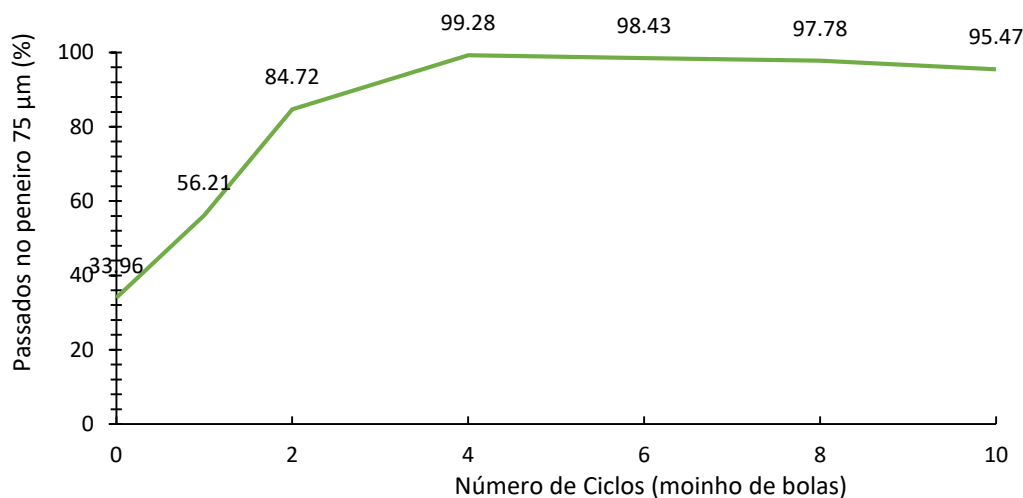


Figura 49 - Evolução da percentagem de passados no peneiro 75 µm.

Analisando os valores obtidos, conclui-se que existe um aumento significativo da percentagem de passados até ao 4º ciclo, onde se atingiu praticamente 100% de resíduo passado, havendo aí uma pequena inversão na tendência de aumento que se arrasta ao longo dos seguintes ciclos. Esta tendência pode ser justificada pela aglomeração de partículas finas e/ou pela degradação das bolas de porcelana que funcionam como massa abrasiva que por sua vez, perdem a eficácia por se tornarem mais pequenas e mais angulosas.

4.1.2 Granulometria

A análise da granulometria foi efetuada tendo por base os resultados obtidos no Laboratório de do Instituto Politécnico de Viana do Castelo, sendo os valores representativos ($D_x(0,10)$, $D_x(0,50)$ e $D_x(0,90)$) que são valores correspondente do tamanho de partículas abaixo das percentagens avaliadas (10%, 50% e 90%), apresentados na Tabela 13, para as diversas amostras selecionadas para esse estudo. Em relação a essas amostras, optou-se por efetuar a granulometria do cimento (CEM I 42,5R), das Cinzas Volantes (CV) e ainda do pó de vidro, das diferentes cores, obtido imediatamente após a finalização da moagem no Los Angeles, 40 ciclos (VA0c; VB0c e VV0c) e após 2 ciclos de moinho de bolas, 40 ciclos de LA + 2 de MB (VA2c; VB2c e VV2c).

Tabela 13 - Resultados da Granulometria Laser.

	Dx (0,10) μm	Dx (0,50) μm	Dx (0,90) μm
CEM I 52,5R	1,33	9,30	24,16
CV	1,53	8,55	20,19
VA0c	5,45	75,20	129,00
VA2c	5,20	32,50	107,40
VB0c	70,20	1007,80	1032,00
VB2c	12,00	108,00	130,00
VV0c	12,89	1006,00	1007,30
VV2c	4,79	11,50	107,00

De acordo com os resultados da Tabela 13, pode-se dizer que o cimento e as Cinzas Volantes utilizado(as), apresentam valores da mesma ordem de grandeza. Cerca de 10% das partículas de cimento possuem tamanho inferior a $1,3 \mu m$, enquanto no caso das CV 10% são inferiores a $1,5 \mu m$. Passando para o Dx (0,50), este indicador permite aferir que aproximadamente 50% das partículas de cimento possuem tamanho inferior a $9,30 \mu m$, enquanto no caso das CV 50% são inferiores a $8,50 \mu m$. Por fim, relativamente ao Dx (0,90), observa-se que cerca de 90% das partículas de cimento possuem tamanho inferior a $25 \mu m$, enquanto no caso das CV 90% são inferiores a $20 \mu m$.

No que diz respeito ao pó de vidro, independentemente da cor do vidro e dos ciclos a que foram submetidos, os valores dos parâmetros granulométricos apresentados são, pelo menos, 5 vezes maiores do que os valores obtidos para as CV, por exemplo. Contudo, o vidro verde foi o que apresentou grão mais reduzido em relação aos restantes (Figura 51), seguido do vidro âmbar (Figura 52) e, por fim, o vidro branco (Figura 53).

A Figura 54, sumariza todas as curvas granulométricas em estudo, ao que se observa que as curvas de pó de vidro que mais se aproximam das curvas granulométricas do cimento e das cinzas volantes, são aquelas que sofreram mais moagem, ou seja, os dois ciclos efetuados no moinho de bolas.

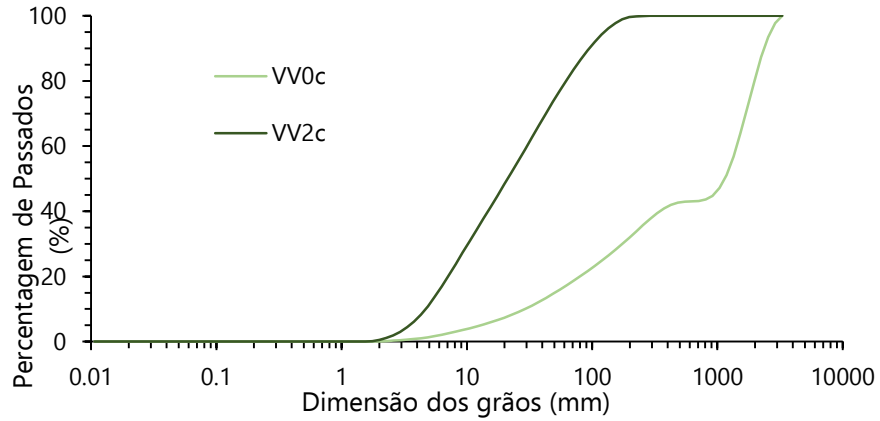


Figura 50 – Resultados da Granulometria Laser para o pó de VV.

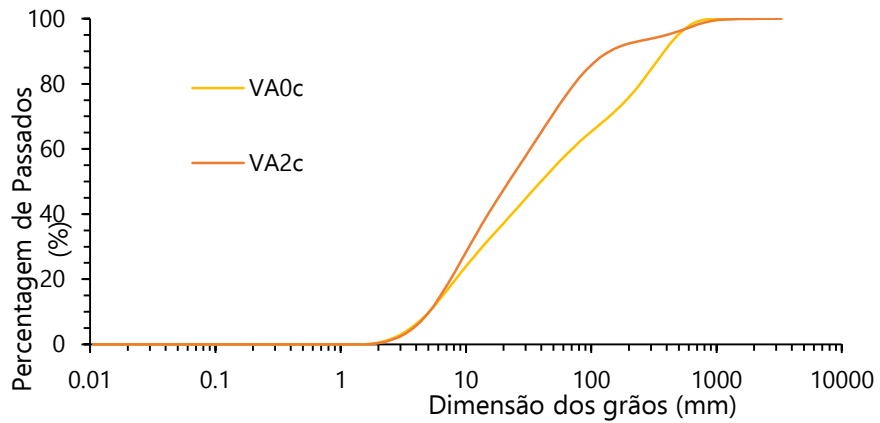


Figura 51 - Resultados da Granulometria Laser para o pó de VA.

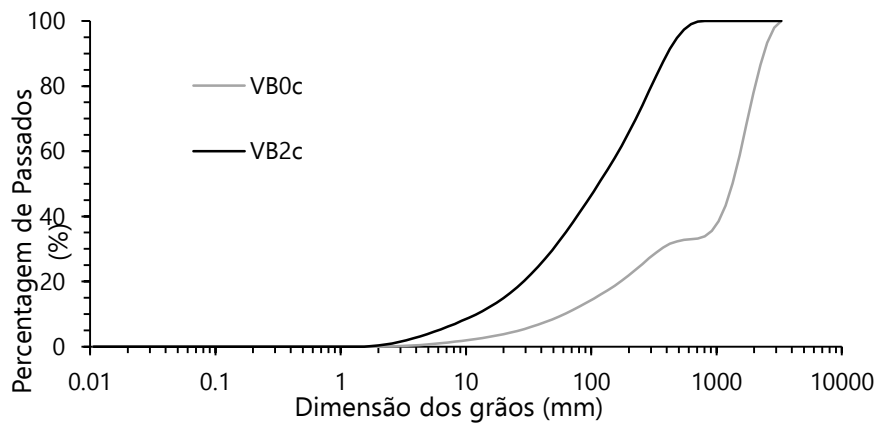


Figura 52 - Resultados da Granulometria Laser para o pó de VB.

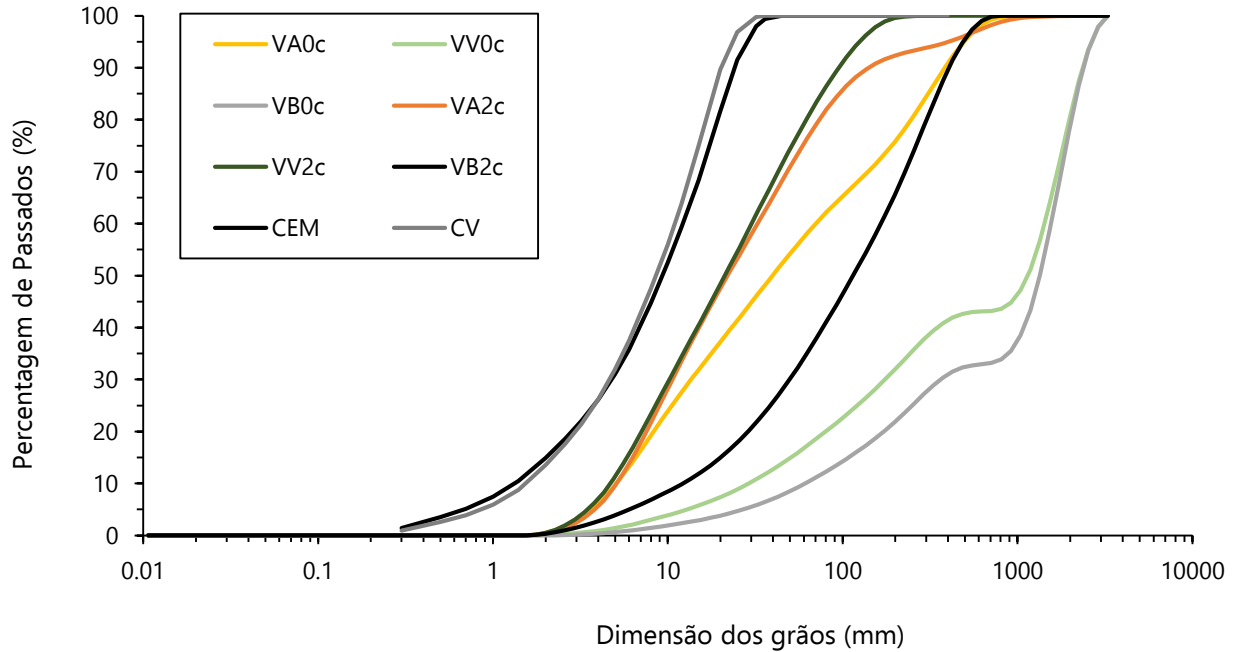


Figura 53 – Sumário das curvas granulométricas em estudo.

4.1.3 Massa Volúmica

De acordo com o ensaio descrito no capítulo anterior e aplicando as respectivas fórmulas associadas, obtiveram-se os valores médios de massa volúmica para um conjunto de amostras (Tabela 14). Referir que no caso do vidro de referência, vidro verde, o ensaio foi efetuado para um conjunto mais alargado de amostras, enquanto para os demais apenas se efetuou o ensaio para 0 ciclos e 2 ciclos de moinho de bolas, tal como para o ensaio da granulometria.

Tabela 14 - Resultados do Ensaio da determinação Massa Volúmica.

Massa Volúmica (g/cm^3)	
Cimento Portland	
C	3,10
Cinzas Volantes	
CV	2,36
Pó de Vidro Âmbar	
VA0c	2,51
VA2c	2,56
Pó de Vidro Branco	
VB0c	2,54
VB2c	2,62
Pó de Vidro Verde	
VV0c	2,53
VV2c	2,46
VV4c	2,57
VV6c	2,75
VV8c	2,75
VV10c	2,81

Os ensaios efetuados permitem, *a posteriori*, efetuar uma comparação com os valores típicos para as tipologias de materiais em estudo. De acordo com as pesquisas bibliográficas efetuadas e esplanadas no capítulo do estado do conhecimento, a massa específica do vidro sodo-cálcico (para todo o tipo de colorações: âmbar, branca e verde) ronda os $2,60 g/cm^3$, a massa específica das cinzas volantes ronda os $2,36 g/cm^3$ e a do cimento $3,12 g/cm^3$.

Analisando os valores da Tabela 14, relativamente ao pó de vidro, verifica-se a existência de uma alguma oscilação do valor obtido face ao valor comumente apresentado na literatura. Estas variações podem ser justificadas pelo refinamento do pó à medida que se avança no número de ciclos de moagem, como também devido ao facto da coloração de cada uma das tipologias apresentar diferentes constituintes químicos, o que atribui características específicas e distintas. No caso das cinzas volantes, o valor obtido está perfeitamente alinhado com o referido nos vários trabalhos científicos anteriormente efetuados.

No que diz respeito ao vidro verde, a Figura 55 deixa claro que há uma tendência linear para o aumento da massa volúmica com o aumento do número de ciclos no moinho de bolas, em que o R

se mostra com uma tendência considerável e no desvio padrão não se encontra uma grande dispersão de resultados (Tabela 15). Contudo, a diferença entre a massa volúmica com 0 ciclo e a massa volúmica com 10 ciclos mostra-se pouco expressiva, aproximadamente 10 %.

Tabela 15 - Resultados do desvio padrão da massa volúmica.

	VV0c	VV2c	VV4c	VV6c	VV8c	VV10c
Média da massa volúmica (g/cm^3)	2,49	2,51	2,66	2,75	2,78	2,81
Desvio Padrão	18,06	57,18	21,45	6,73	28,97	39,30

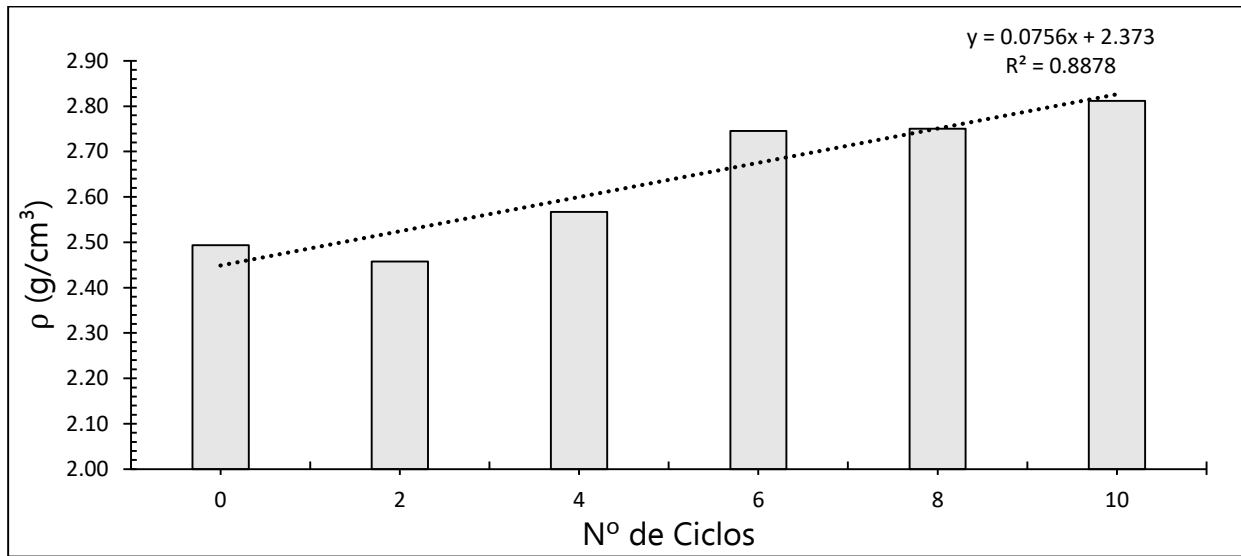


Figura 54 - Evolução média da massa volúmica para o pó de VV.

4.1.4 Superfície específica

A determinação da superfície específica foi efetuada recorrendo ao ensaio de Blaine. Na Tabela 16 apresentam-se os resultados obtidos para o conjunto de amostras semelhante ao utilizado no caso da massa volúmica.

Tabela 16 - Resultados obtidos do ensaio de Blaine.

Superfície específica (m^2/kg)	
Cimento Portland	
C	350-380*
Cinzas Volantes	
CV	250-500*
Pó de Vidro Âmbar	
VA0c	398,4
VA2c	448,4
Pó de Vidro Branco	
VB0c	211,6
VB2c	261,2
Pó de Vidro Verde	
VV0c	283,0
VV2c	440,7
VV4c	487,3
VV6c	536,9
VV8c	621,3
VV10c	583,8

*Valor da superfície específica não foi calculado para estes elementos, estes valores são padrão.

Segundo as pesquisas bibliográficas efetuadas para a superfície específica, apresentadas no Capítulo 2, o cimento Portland apresenta valores que variam entre os 350 e os 380 m^2/kg , enquanto que para as CV os valores rondam os 250 e os 500 m^2/kg . No caso do vidro (independentemente da coloração) este valor depende da moagem que este sofre, no entanto, os estudos mostram que para obter melhor desempenho mecânico a sua superfície específica deve ser superior a 264 m^2/kg [48]. Resultado este, equivalente ao caso em estudo, onde somente o pó de vidro branco apresentou valores anormais.

Uma vez que a superfície específica correlaciona a área da partícula com o seu tamanho, era teoricamente previsível que com o aumento do número de moagens a partícula de pó de vidro reduzisse de tamanho e, conseqüentemente, os seus espaços intrínsecos diminuíssem também, aumentando o valor da área por unidade de volume. Isso aconteceu para todos os vidros estudados, sendo apresentada na Figura 56 a evolução da superfície específica de acordo com o número de ciclos de moagem no moinho de bolas para o vidro verde. Assim como para o caso da massa volúmica, também aqui se observa uma tendência linear de crescimento da superfície específica

com o aumento do número de ciclos. Contudo, neste caso, a diferença entre a superfície específica com 0 ciclo e com 10 ciclos mostra-se bem mais expressiva, chegando aos 51 %.

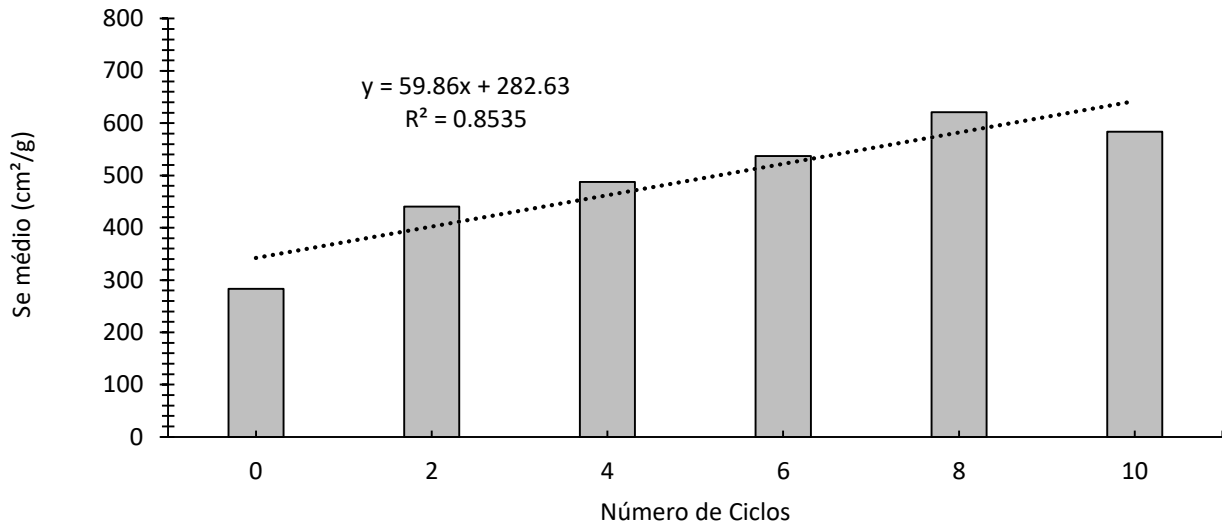


Figura 55 - Evolução da superfície específica para o pó de VV.~

4.2 Estudo das argamassas no estado fresco: trabalhabilidade

Como foi referido no Capítulo 3, foram estudadas duas razões de água/ligante diferentes, sendo uma de $a/l = 1$ e outra de $a/l = 0,5$. Considerando a morosidade para obtenção do pó de vidro, para minimizar os gastos de material utilizou-se um molde adaptado, daí os resultados de espalhamento não se encontrarem dentro dos valores normativos. Porém, esta avaliação serviu para distinguir qual a melhor razão de água/ligante a utilizar. Constatou-se que, para a razão $a/l = 1$, a argamassa se encontrava demasiado fluida e ocorria segregação, o que para a razão $a/l = 0,5$ tal não acontecia. Os valores auferidos encontram-se na Tabela 17, onde é possível constatar que os ensaios realizados não permitiram distinguir a trabalhabilidade das misturas em função do tamanho das partículas de pó de vidro, nem da presença de adições. Constata-se ainda que o espalhamento para estas argamassas seguindo este procedimento devesse rondar os 75 mm de diâmetro.

Tabela 17 - Resultados do ensaio da trabalhabilidade.

Mistura	Diâmetro (mm)
	a/l=0,5
REF	75
CV	75
VV0c	75
VV2c	77
VV4c	77
VV6c	78
VV8c	79
VV10c	75

4.3 Estudo das argamassas no estado endurecido: resistência à compressão

A resistência à compressão é uma das propriedades mais importantes de um material cimentício. Devido a esse facto, na presente dissertação decidiu-se incidir com especial relevância no estudo desta característica, quando sobre o cimento recai uma substituição parcial por pó de vidro.

4.3.1 Resistência à compressão em provetes cúbicos após 7 e 28 dias

Tendo em vista a aferição da influência da razão água/ligante no valor da resistência à compressão e sem atenção às condições de cura, foram então concebidas séries de provetes cúbicos, nas quais o cimento foi, respetivamente, substituído por 25% de CV e por 25% de pó de vidro, sujeito a diferentes moagens, desde 0 ciclos até 10 ciclos de moinho de bolas. Durante esta etapa do trabalho apenas o vidro de referência, vidro verde, foi estudado. E para efeitos de comparação fora ainda concebidas e testadas as argamassas de referências: REF, fabricada sem substituição de cimento por qualquer tipo de adição; CV_25%, fabricada com substituição de 25% da massa de cimento por cinzas volantes.

Após 24 horas os provetes foram desmoldados e permaneceram em cura na câmara húmida ($20^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$ e HR = 90%) sem imersão em água até 28 dias.

Os provetes foram ensaiados à compressão após 7 e 28 dias de cura. Apresenta-se na Figura 57 o resumo de resultados obtidos para as duas idades, num mesmo eixo.

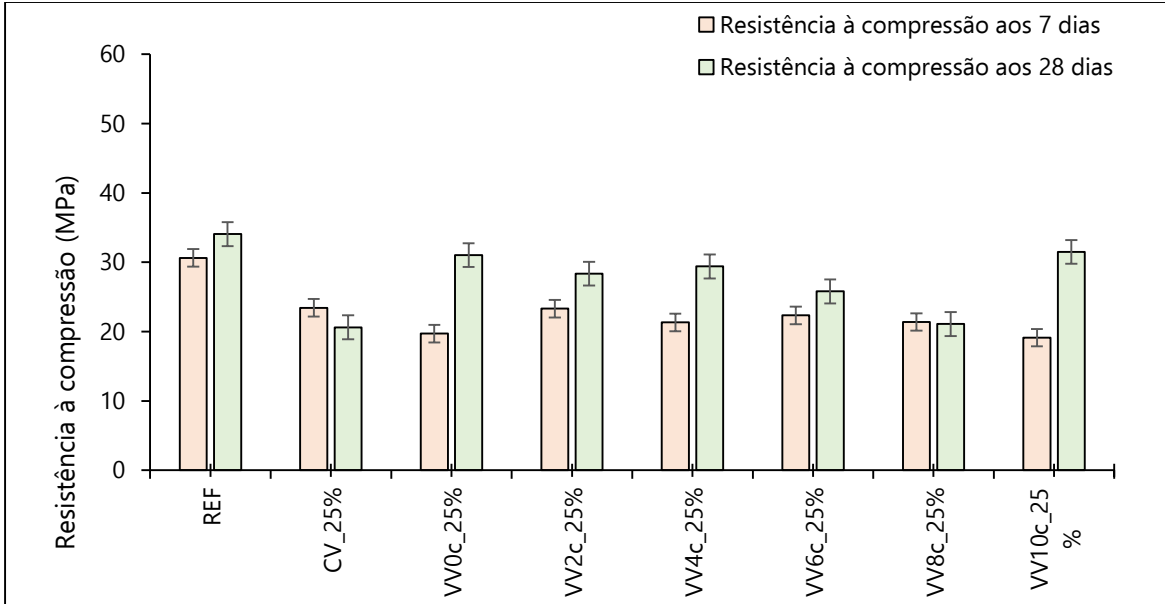


Figura 56 - Resistência à compressão para os 7 e 28 dias de idade com temperatura $20^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$ sem submersão em água.

Importa referir que cada uma das barras apresentadas nos gráficos resulta da média aritmética de 7 provetes ensaiados, ou seja, para cada tipologia em estudo foram obtidas 7 resistências e posteriormente foi efetuada a média.

Considerando os 7 dias de cura, observa-se uma redução na resistência à compressão dos provetes com CV quando comparados aos provetes de referência, sem incorporação de adições (composição REF). Esta redução era esperada e está relacionada com o desenvolvimento das reações pozolânicas que, aos 7 dias, ainda não estão completas nos provetes com CV. Comparando os provetes com CV com aqueles que possuem pó de vidro, observa-se uma ligeira redução na resistência à compressão para os provetes VV0c_25% e VV10c_25%. Contudo, os provetes VV2c_25%, VV4c_25%, VV6c_25% e VV8c_25% alcançaram valores muito semelhantes aos provetes com CV, indo ao encontro do pretendido, ou seja, a potencialidade da utilização do pó de vidro como substituto parcial do cimento.

Para os 28 dias era expectável um aumento da resistência à compressão para todas as misturas, no entanto, o mesmo não se verificou em plenitude para todos os ciclos analisados. No que diz respeito à argamassa REF, a resistência aumentou significativamente, porém para as cinzas volantes aconteceu o oposto, tendo a resistência decrescido. Para VV2c_25%, VV4c_25%, VV6c_25% e

VV10c_25% seguiu-se a tendência de crescimento da resistência e, para VV8c_25% o valor medido foi praticamente igual.

Destaca-se, também, o facto da argamassa com pó de VV2c_25%, aos 28 dias de cura, apresentar uma resistência à compressão semelhante à argamassa de REF e, para os 7 dias de cura, ligeiramente superior à argamassa com CV. Assim, nas fases seguintes do trabalho de investigação focou-se concisamente no pó obtido até esse ciclo de moagem. Ou seja, admitiu-se que a moagem correspondente a 2 ciclos, seria a ideal e, para este trabalho, serviu de fator de decisão para seleccionar o procedimento de moagem nos trabalhos a desenvolver no futuro. No entanto, uma vez que o recurso ao moinho de bolas é particularmente moroso, continuou-se a testar, simultaneamente, misturas incorporando pó de vidro moído apenas no equipamento de Los Angeles,

4.3.2 Efeito das condições de cura na resistência à compressão de provetes cúbicos após 7 e 28 dias

Na fase seguinte da investigação, pretendia-se procurar compreender o efeito das condições de cura na resistência à compressão. Depois do conhecimento obtido através dos resultados apresentados no ponto anterior, prosseguiu-se o trabalho com o seguinte conjunto de tipologia de argamassas: REF, CV_25%, VV0c_25%, de VV2c_25%. Estas novas argamassas foram também produzidas para a razão água/ligante = 0,5 e sujeitas à camara de cura onde estiveram sob duas condições de exposição distintas: $20^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$ imersas em água à mesma temperatura e $60^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$ igualmente imersas em água a essa temperatura. Esta análise permitiu despistar o efeito da temperatura e ainda o efeito da imersão, tendo para tal sido efetuados ensaios de resistência à compressão aos 7 dias e aos 28 dias de idade para ambos os cenários de exposição. Nas figuras abaixo apresentam-se os resultados obtidos para o conjunto de cenários de estudo descritos.

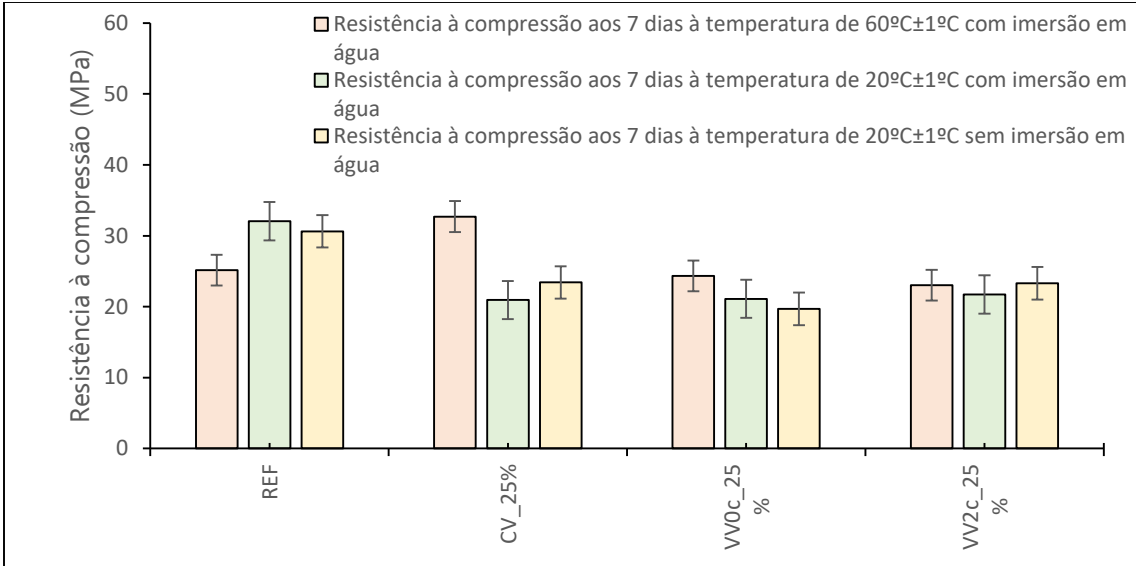


Figura 57 - Resistência à compressão para as diferentes condições de cura aos 7 dias de idade.

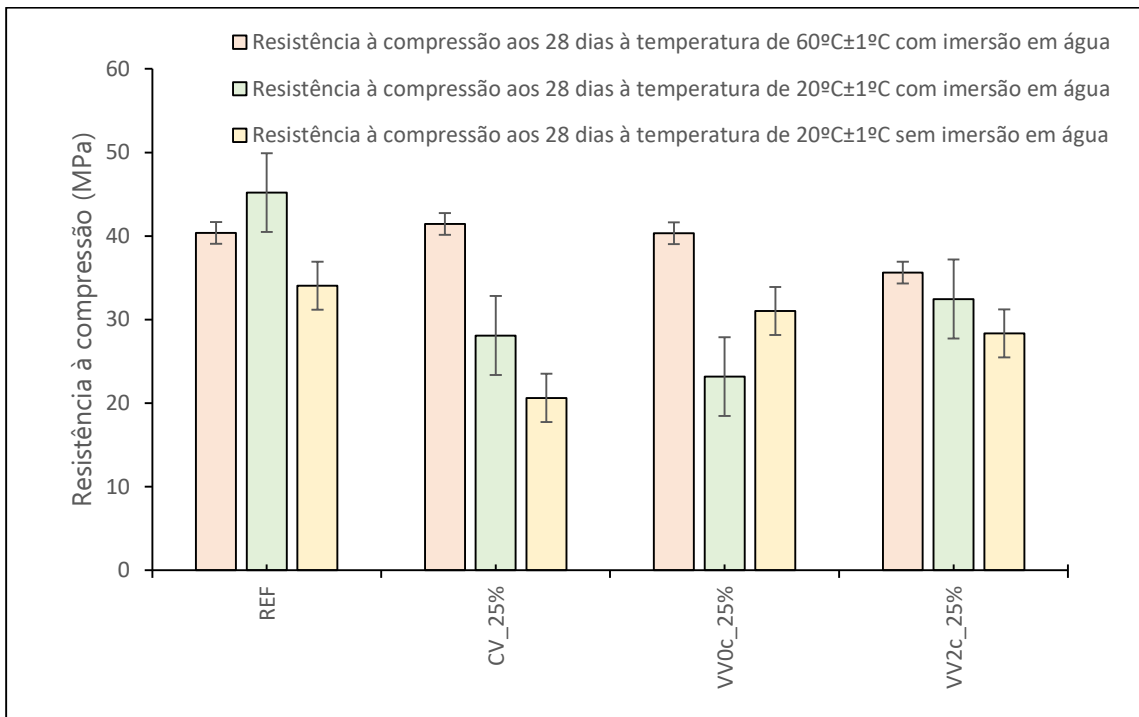


Figura 58 - Resistência à compressão para as diferentes condições de cura aos 28 dias de idade.

Através da análise da Figura 58, compreende-se que para as argamassas CV_25%, VV0c_25% e VV2c_25%, existe uma redução geral da resistência à compressão no cenário em que existiu cura

à temperatura ambiente, ocorrendo, ao contrário do que seria de esperar, exatamente o oposto para a REF.

Essa mesma tendência verificou-se, também, para os 28 dias de idade, tal como se comprova na Figura 59.

Comparativamente os resultados dos provetes sujeitos a temperaturas de $20^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$ com imersão em água, com os provetes não sujeitos à imersão em água, denota-se que aos 7 dias, com a exceção do VV0c_25%, apresentaram valores inferiores. Porém, para os 28 dias os resultados inverteram o que significa que a água tem um efeito de aceleração na cura, aumentando a resistência.

Pode então concluir-se que, à exceção da REF, as argamassas expostas a temperaturas mais elevadas ($60^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$) apresentam, genericamente, valores de resistência mecânica ligeiramente mais elevadas, em comparação aquelas que estiveram expostas a $20^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$. Tal pode ser justificado pelo facto de a temperatura elevada acelerar a cura, o que se traduz em resistências superiores. Estudos feitos por Wang [24] condizem com os resultados apresentados neste ponto, ou seja, temperaturas de cura elevadas aumentam a resistência à compressão para idades de cura precoce [25], correspondendo a o efeito do aumento da temperatura de cura a um acelerar das reações de hidratação.

4.3.3 Efeito da dimensão do provete na resistência à compressão após 7 e 28 dias

Os provetes cúbicos com aresta de 20 mm são pouco comuns neste tipo de estudo. Como mencionado anteriormente, estas dimensões foram definidas no sentido de reduzir a quantidade material utilizado, nomeadamente de pó de vidro. Contudo, considerou-se importante efetuar um estudo com provetes de maior dimensão de modo a comprovar a viabilidade do uso destes provetes com 20 mm de aresta, uma vez que estes são de pequena dimensão, pelo que se poderia estar a obter resultados com dispersões elevadas. Assim, fabricaram-se um conjunto de provetes cúbicos de argamassa com 50 mm de aresta, mantendo-se as constituições mencionadas no subtítulo anterior, ou seja, REF, CV_25%, VV0c_25% e VV2c_25%.

Os provetes foram concebidos e, posteriormente, colocados na camara húmida, com uma temperatura de $20^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$, submersos em água. Ao cabo de 7 e 28 dias foram efetuados ensaios de resistência à compressão, estando os resultados obtidos apresentados nas Figuras 60 e 61.

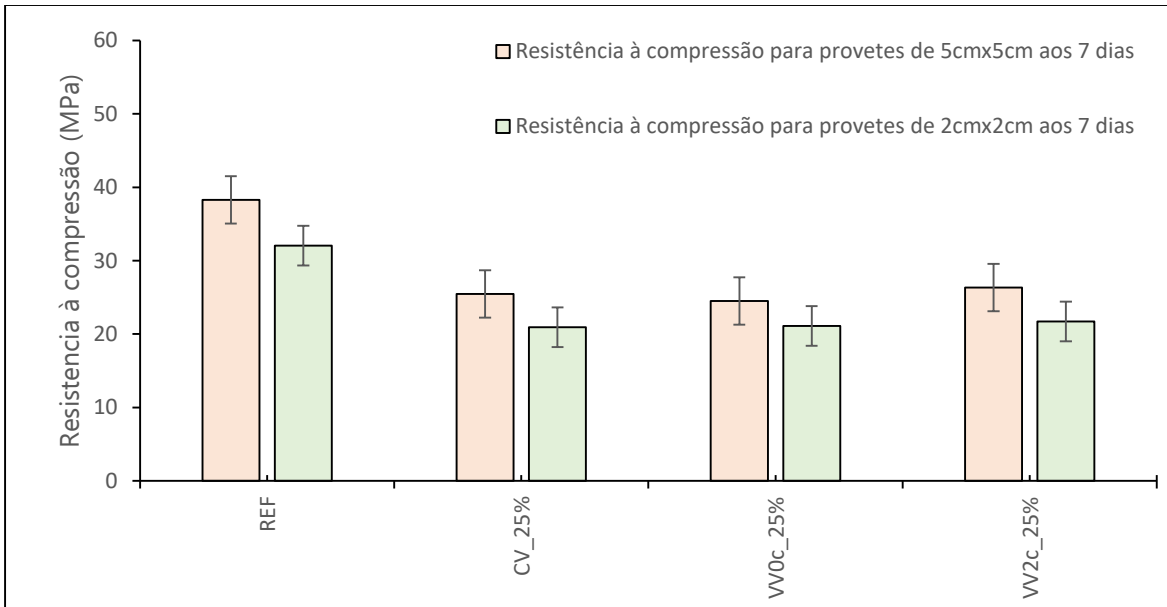


Figura 59 – Resistência à compressão aos 7 dias de idade para cubos 20 mm e 50 mm de aresta.

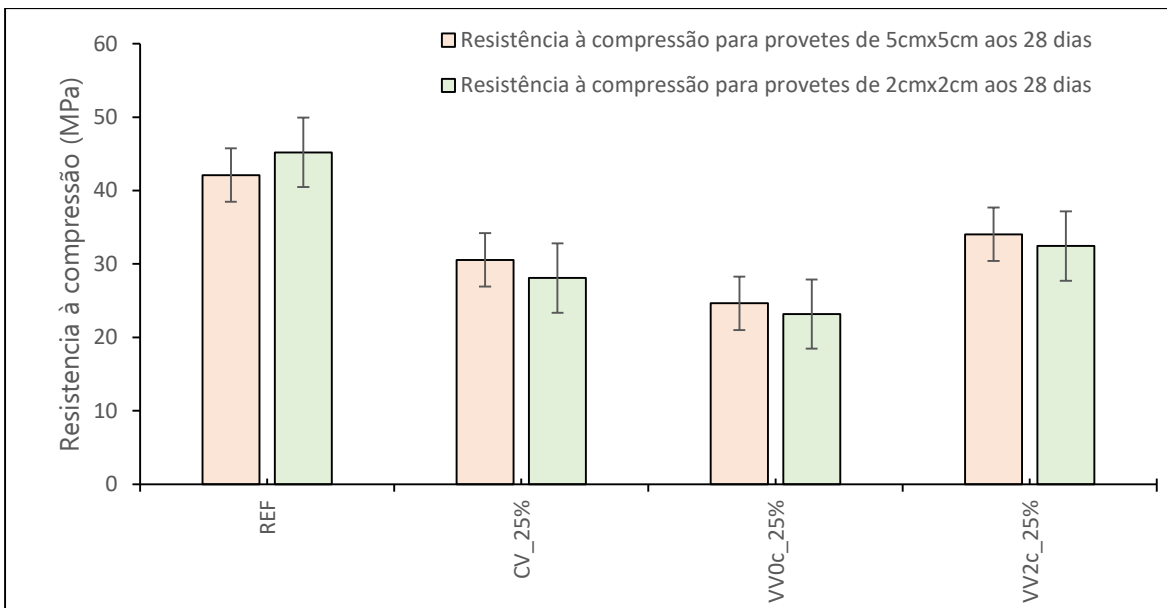


Figura 60 – Resistência à compressão aos 28 dias de idade para cubos 2x2 cm e 5x5 cm.

Avaliando os resultados obtidos para os 7 dias, na Figura 60, em todos os casos: REF, CV_25%, VV0c_25% e VV2c_25%, verifica-se uma ligeira redução no valor da resistência à compressão nos cubos de 20 mm quando comparados aos cubos de 50 mm. Contudo, a tendência de

comportamento permanece, ou seja, diminuição da resistência à compressão de acordo com a seguinte ordem: REF > VV2c_25% > CV_25% > VV0c_25%.

Por outro lado, para os 28 dias, na Figura 61, verifica-se que no caso da REF o valor da resistência foi superior nos cubos de 20 mm e, para os restantes: CV_25%, VV0c_25% e VV2c_25%, o valor foi ligeiramente mais reduzido, sendo essa diferença menos acentuada face aos resultados obtidos aos 7 dias.

De maneira geral, comparando com os resultados obtidos para os cubos de 20 mm e de 50 mm de aresta, sob as mesmas condições de exposição, observa-se que a dimensão do provete parece não interferir significativamente com a magnitude da resistência à compressão. Assim sendo, optou-se por continuar o trabalho de investigação recorrendo aos exemplares mais reduzidos, sem prejuízo para os resultados de resistência à compressão e, ao mesmo tempo, com ganhos logísticos consideráveis.

4.3.4 Estudo da resistência à compressão para as restantes cores de vidro para os 7, 28 e 90 dias de idade

Depois de todo o conhecimento adquirido com a utilização do pó de vidro verde, iniciou-se o estudo das restantes cores, ou seja, o vidro âmbar e o vidro branco. Além disso, considerando a importância dos 90 dias de idade para o desenvolvimento das reações pozolânicas, o estudo do vidro verde foi alargado até este período. Nesta etapa efetuaram-se ensaios de resistência à compressão para três idades distintas: 7 dias, 28 dias e 90 dias para os provetes de 20mm em condições de cura de $20^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$ com imersão em água. Nas Figuras 62, 63 e 64, apresentam-se os resultados obtidos para o vidro verde, vidro âmbar e vidro branco, respetivamente.

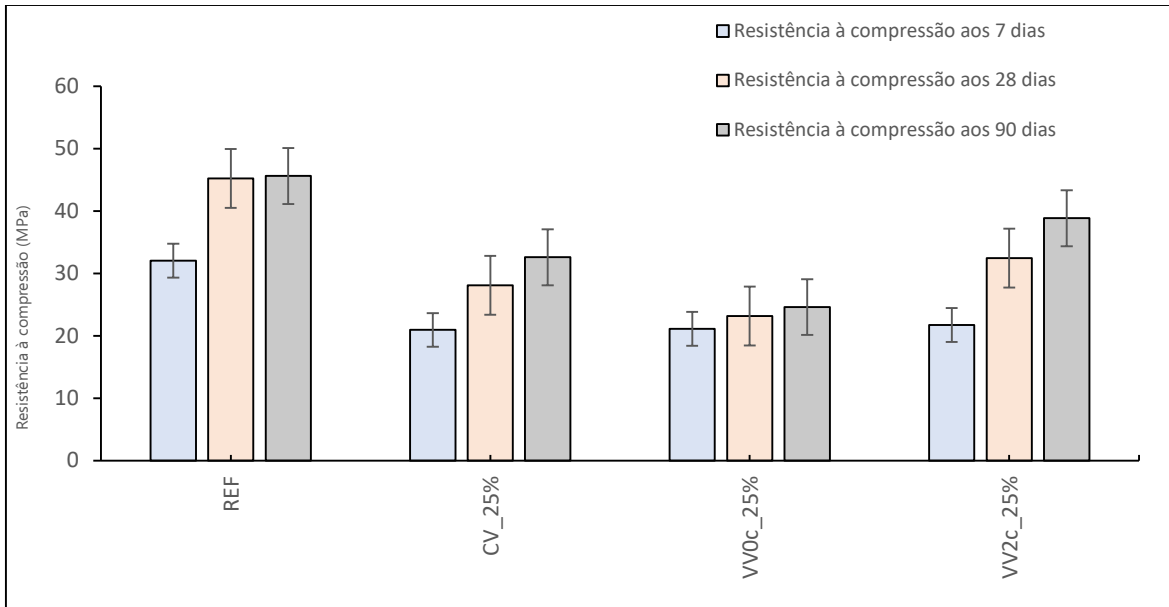


Figura 61 - Resistência à compressão para os 7, 28 e 90 dias de cura de argamassas com vidro verde sujeitas à camara húmida com $20^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$ imersas em água.

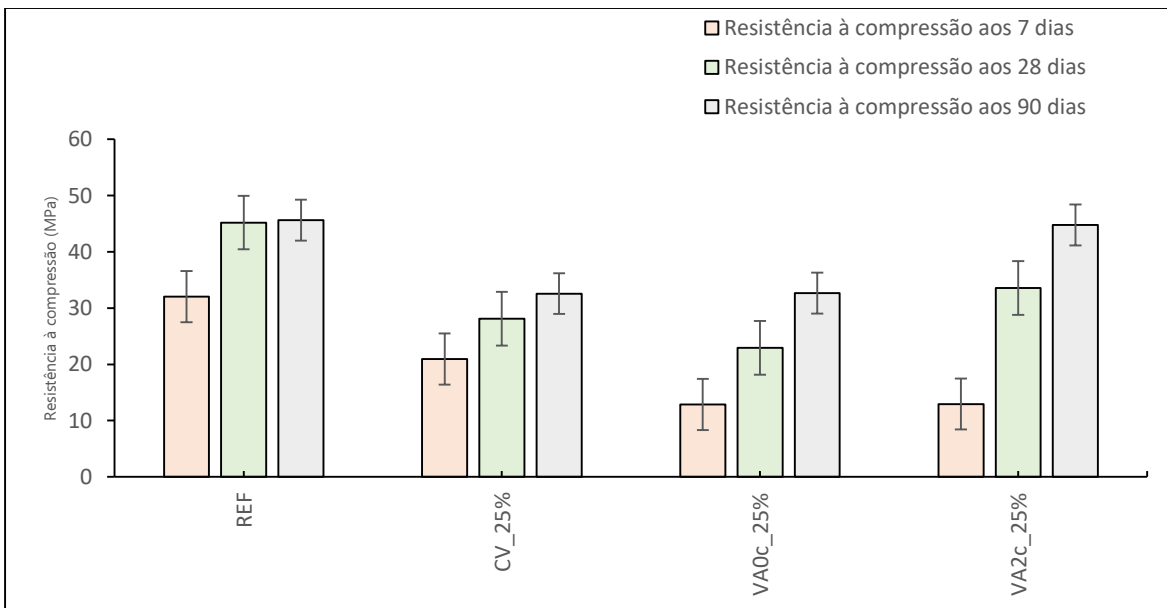


Figura 62 - Resistência à compressão para os 7, 28 e 90 dias de cura de argamassas com vidro âmbar sujeitas à camara húmida com $20^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$ imersas em água.

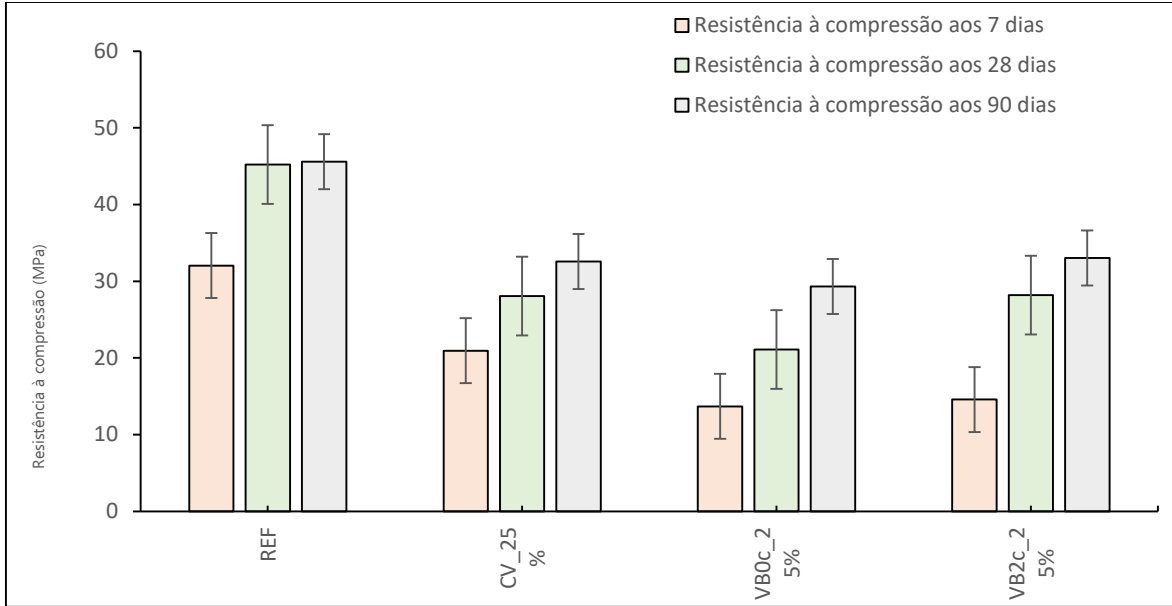


Figura 63 - Resistência à compressão para os 7, 28 e 90 dias de cura de argamassas com vidro branco sujeitas à camara húmida com $20^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$ imersas em água.

Considerando os resultados apresentados nas Figuras 62, 63 e 64, observa-se que os provetes de referência possuem um comportamento esperado, ou seja, com um significativo aumento na resistência à compressão entre os 7 e os 28 dias, mantendo o valor da resistência para os 90 dias. Para os materiais cimentícios sem adição, como é o caso dos provetes de referência, a maior parte das reações de hidratação processam-se até aos 28 dias. No caso dos provetes com adição, independentemente da adição e da cor do vidro, observa-se um aumento faseado na resistência à compressão entre os 7 e os 90 dias, o que também era esperado. Como já explicado, este comportamento está relacionado com o desenvolvimento das reações pozolânicas ao longo do tempo. Mais uma vez, os provetes VV2c_25%, VA2c_25% e VB2c_25% destacam-se por apresentar resistência à compressão igual ou superior os provetes com CV, para os 28 e 90 dias de cura.

Na Figura 65 consideram-se especificamente os resultados obtidos aos 90 dias de cura.

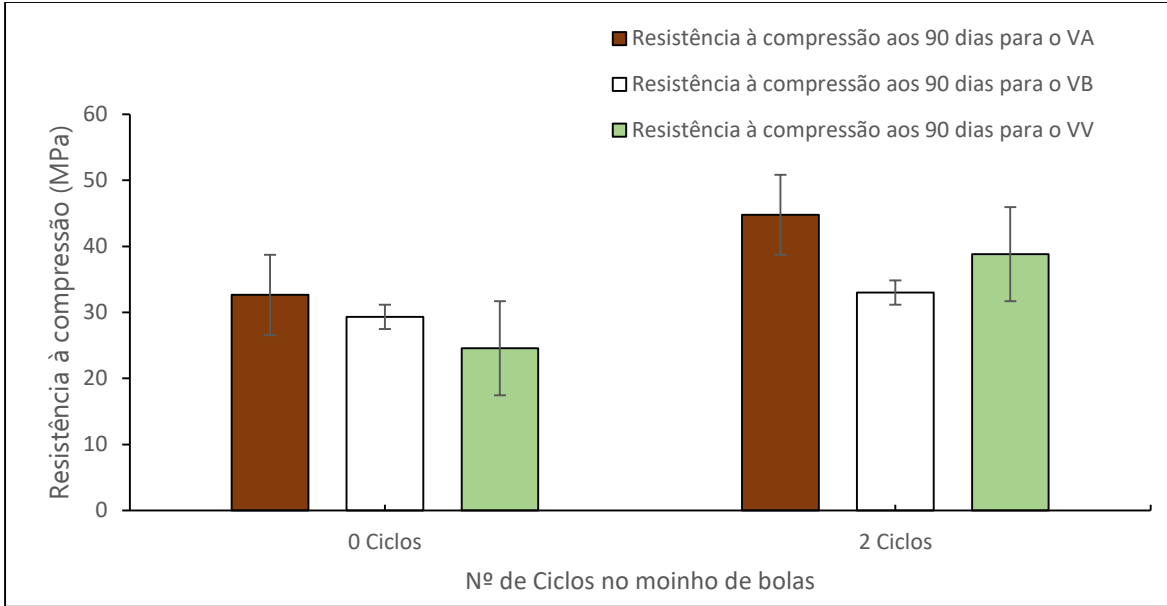


Figura 64 - Resistência à compressão aos 90 dias de cura para as diferentes colorações.

Os valores de resistência à compressão obtidos ao cabo de 90 dias demonstram que para os 0 ciclos (ou seja, 40 ciclos no Los Angeles apenas) o vidro âmbar apresenta os melhores resultados, seguido do branco e por fim o verde. Face aos resultados obtidos para 2 ciclos, é de salientar que o vidro âmbar permanece como o que transmite melhores resultados, seguido agora do vidro verde e, mais reduzido, o vidro branco.

De acordo com os resultados obtidos, e à imagem do que tinha sido aferido na revisão da literatura [51], pode-se dizer que o pó de vidro como substituto parcial do cimento que apresentou melhores resultados para a resistência à compressão, quando sujeito às mesmas condições, é o pó de vidro âmbar. No entanto, os resultados obtidos para as demais tipologias de cor (branco e verde) não apresentam uma redução muito expressiva face aos resultados do vidro âmbar, com uma variação percentual sempre dentro de um intervalo limitado entre os 5 a 15%, dependendo do número de dias de cura em consideração.

Por outro lado, face aos resultados obtidos com argamassas de REF e com incorporação de CV, tal como já mencionado anteriormente, os resultados obtidos com os diversos vidros conseguem assemelhar-se em muito com os obtidos na composição com cinzas volantes e, como esperado,

quando se compara com a REF os resultados são mais reduzidos, numa ordem de grandeza percentual a rondar os 25 a 30%.

A análise dos resultados como um todo, considerando desde as características do pó de vidro estudado até os resultados de resistência à compressão aos 90 dias dos provetes moldados, apontam para a possibilidade da utilização do pó de vidro como substituto parcial do cimento, sendo esta uma contribuição importante no que diz respeito à sustentabilidade e à economia circular. Além disso, independentemente da cor do vidro, mas, sob as condições estudadas, com destaque para o vidro âmbar, o pó de vidro parece ser uma opção adequada para substituição do uso das cinzas volantes em materiais cimentícios. A substituição de 25% de cimento por pó de vidro, com D50 variando entre 20 e 65 μm e a superfície específica variando entre 210 e 440 m^2/kg , não mostra perdas significativas na resistência à compressão quando comparada a substituição de 25% de cimento por cinzas volantes.

Esta é uma das principais contribuições deste trabalho, indo ao encontro dos objetivos inicialmente propostos, uma vez que há uma forte tendência para diminuição da produção de cinzas volantes na Europa, neste momento, com especial destaque para Portugal, que tem em curso o fechamento das suas centrais termoelétricas. A escassez de cinzas volantes no país já se reflete no aumento do preço final do betão e no maior impacto ambiental das construções atuais uma vez que o betão atual possui maior teor de cimento. Neste sentido, é urgente dar resposta ao problema da escassez de cinzas volantes e, de acordo com os resultados obtidos nesta pesquisa, o uso do pó de vidro mostra-se como um caminho bastante promissor.

4.3.5 Índice de Atividade

O índice de atividade corresponde à razão entre a resistência à compressão dos provetes normalizados de uma argamassa preparados com 75% de cimento e 25% do pó em estudo (em massa), e a resistência à compressão de provetes normalizados de argamassa preparados somente com cimento, ambos ensaiados aos 28 dias e aos 90 dias. Para isso utilizou-se a seguinte equação:

$$IA = A \div B \times 100$$

Equação 3

Onde:

A – Corresponde à resistência à compressão (MPa) da argamassa com adição pozolânica;

B – Corresponde à resistência à compressão (MPa) da argamassa de controle.

Assim sendo, foram calculados os índices de atividade para os provetes de 20 mm, tratando-se, portanto, de provetes com dimensão não normalizados, com condições de cura de $20^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$ e imersão em água, aos 28 dias e 90 dias, segundo a norma NP EN 450-1:2012 [20]. A Tabela 18, apresenta os valores obtidos.

Tabela 18 – Índice de Atividade.

	<i>Índice de Atividade</i>	
	28 dias	90 dias
CV_25%	62,1%	71,4%
VA0c_25%	50,7%	71,6%
VA2c_25%	74,3%	98,2%
VB0c_25%	46,6%	64,3%
VB2c_25	62,4%	72,4%
VV0c_25%	51,3%	53,9%
VV2c_25%	71,8%	85,1%

Analisando os dados da tabela anterior constata-se que os índices de atividade, para os 28 dias apesar de muito próximos dos 75% nunca ultrapassam este valor, não respeitando a norma. No caso dos 90 dias, a norma indica que o valor deve ser superior a 85%, o que na maioria dos casos não ocorre, à exceção do VA2c_25% e do VV2c_25% que cumprem os requisitos mínimos. No entanto, o mesmo se passa relativamente ao não cumprimento da NP EN 450-1:2012 [20] por parte das cinzas volantes selecionadas e que, sabemos, são correntemente utilizadas em composições de betão.

4.4 Efeito na resistência mecânica da variação da percentagem de incorporação de pó de vidro

Para além de todo o trabalho até aqui exposto, ainda se considerou existir uma variável que era interessante avaliar, mais especificamente o efeito da variação da percentagem de incorporação de pó de vidro na argamassa no que à resistência mecânica diz respeito.

Para levar a cabo essa avaliação, foram fabricadas argamassas para o seguinte conjunto de amostras: REF, CV e para as três tonalidades de pó de vidro (nesta fase utilizou-se o pó resultante de 40 ciclos LA, ou seja, 0 ciclos de moinho de bolas). Relativamente aos graus de substituição estes foram os seguintes: 5%, 15%, 25% e 35%. Para cada uma das amostras obtiveram-se 15 provetes cúbicos de 20 mm de aresta, perfazendo então um conjunto total de 120 provetes.

Após serem concebidos, os provetes foram colocados na camara húmida a $20^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$ submersos em água, tendo sido, posteriormente, os ensaios realizados aos 7 e aos 28 dias de idade. Os resultados obtidos podem ser evidenciados nas Figuras 66 e 67.

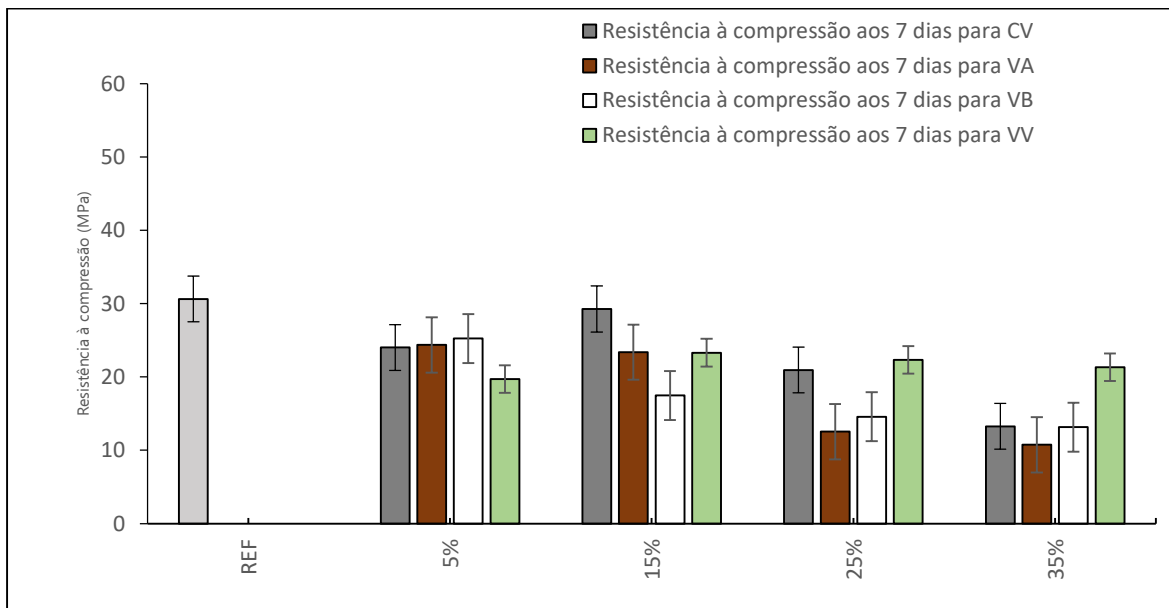


Figura 65 - Resistência à compressão de argamassas com 7 dias de cura, com diferentes percentagens de substituição, sujeitas à camara húmida com $20^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$ submersas em água.

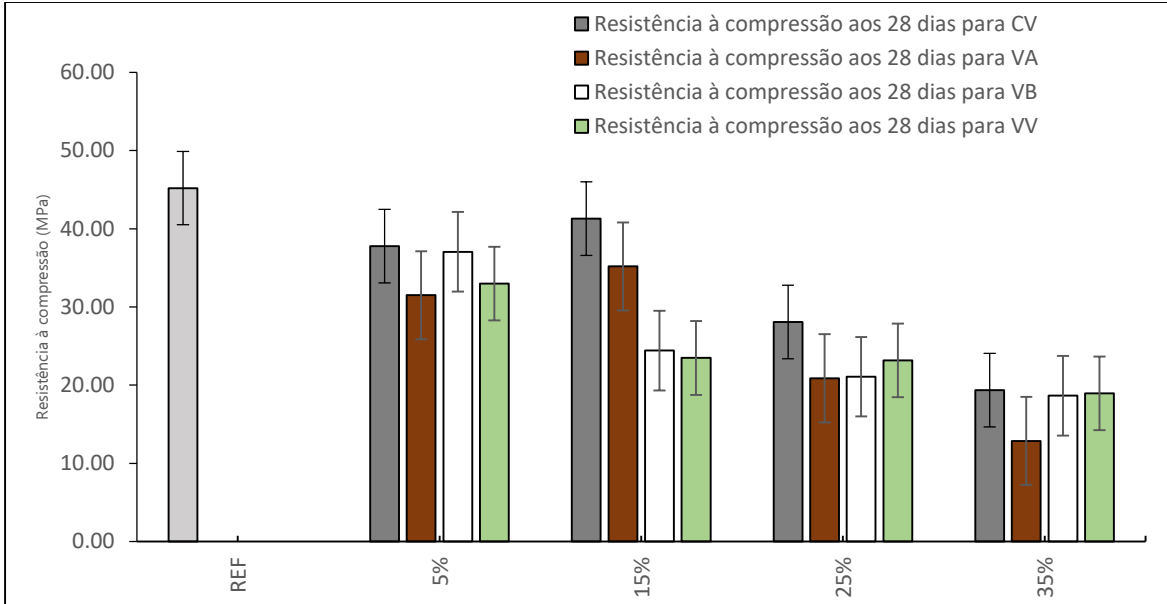


Figura 66 - Resistência à compressão de argamassas com 28 dias de cura, com diferentes percentagens de substituição, sujeitas à camara húmida com $20^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$ submersas em água.

Observa-se nas Figuras 66 e 67 que, independentemente do tipo de incorporação e do período de cura, há uma queda na resistência à compressão dos provetes com CV e com pó de vidro, quando comparados aos provetes de referência. Observa-se também que, até 15% de incorporação, esta queda na resistência é menos acentuada do que aquela que ocorre para os provetes com incorporação de 25 e 35% de CV e pó de vidro.

No que diz respeito aos diferentes vidros utilizados, ao contrário do que foi observado em outras pesquisas [46], [47], as argamassas com pó de vidro que obtiveram melhores resultados globalmente para os 7 dias de cura, foram aquelas que na sua composição continham pó de vidro verde. Contudo, à medida que os dias foram avançando, o pó de vidro que se mostrou mais capacitado a substituir as cinzas volantes foi o âmbar, que em quase todos os graus de substituição apresentou valores idênticos.

Importa referir que a diferença nas resistências à compressão verificadas para as diferentes cores de vidro (Figuras 67 e 68) pode estar relacionada não com a cor propriamente dita (que estão relacionadas com características químicas), mas com as características físicas obtidas para cada uma das amostras após o processo de moagem (ver Capítulo 3).

Analisando o resultado de forma conjunta, para as condições estudadas, a substituição de cimento por 15% de pó de vidro âmbar, com D50 igual a 23,40 μm e superfície específica igual a 398,4 m^2/kg , apresenta-se como a solução mais eficaz para substituir o uso das CV, neste caso, em 15%, tal pode também ser justificado pelo índice de atividade que se encontrou mais próximo dos valores estipulados pela norma. É importante referir que o comportamento identificado pode sofrer alguma alteração até aos 90 dias, resultado da continuidade do desenvolvimento das reações pozolânicas inerentes às CV e ao pó de vidro, pelo que se recomenda a continuidade do estudo.

4.5 Estudo da durabilidade: reação álcalis-sílica (RAS)

Considerando o pó de vidro, sob o ponto de vista das características mecânicas, como potencial substituto das CV para uso nos materiais cimentícios, importa estudar o seu comportamento no que diz respeito à durabilidade. Neste sentido, há vários estudos que podem ser realizados como, por exemplo, absorção de água, resistência à penetração de cloretos, carbonatação e RAS. Devido à limitação temporal do trabalho, optou-se por avaliar apenas a RAS por ser considerada a de maior importância neste contexto devido ao elevado teor de sílica apresentado pelo pó de vidro.

O ensaio teve como base a ASTM C1260 (2007), porém, classificou-se o pó de vidro segundo o LNEC E 461 (2007). Para uma expansão inferior a 0,10% o agregado pertence à classe I (agregado não reativo), para expansões entre 0,10% e 0,20% o agregado pertence à classe II (agregado potencialmente reativo), e expansões acima de 0,20% pertence à classe III (agregado reativo).

Na presente dissertação foi avaliada a reatividade pozolânica do pó de vidro face aos álcalis do cimento durante 16 dias, comparando-se os provetes de REF com os provetes de CV_25%, de VA0c_25%, VA2c_25% (Figura 68), VB0c_25%, VB2c_25% (Figura 69), VV0c_25% e VV2c_25% (Figura 70).

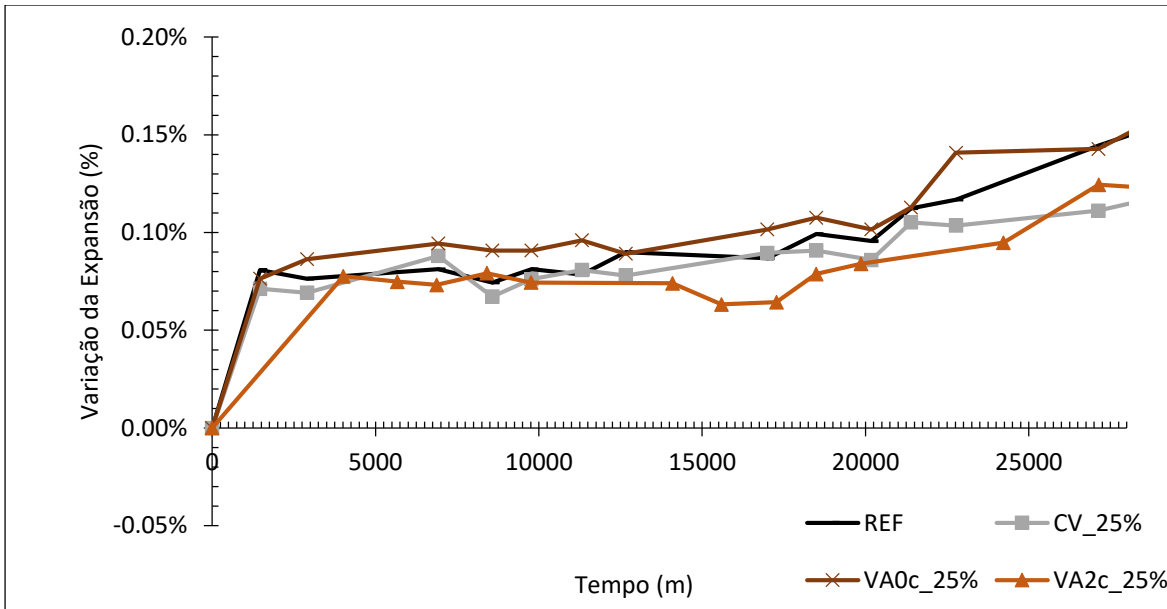


Figura 67 - Resultados do ensaio Álcalis-Sílica para o VA.

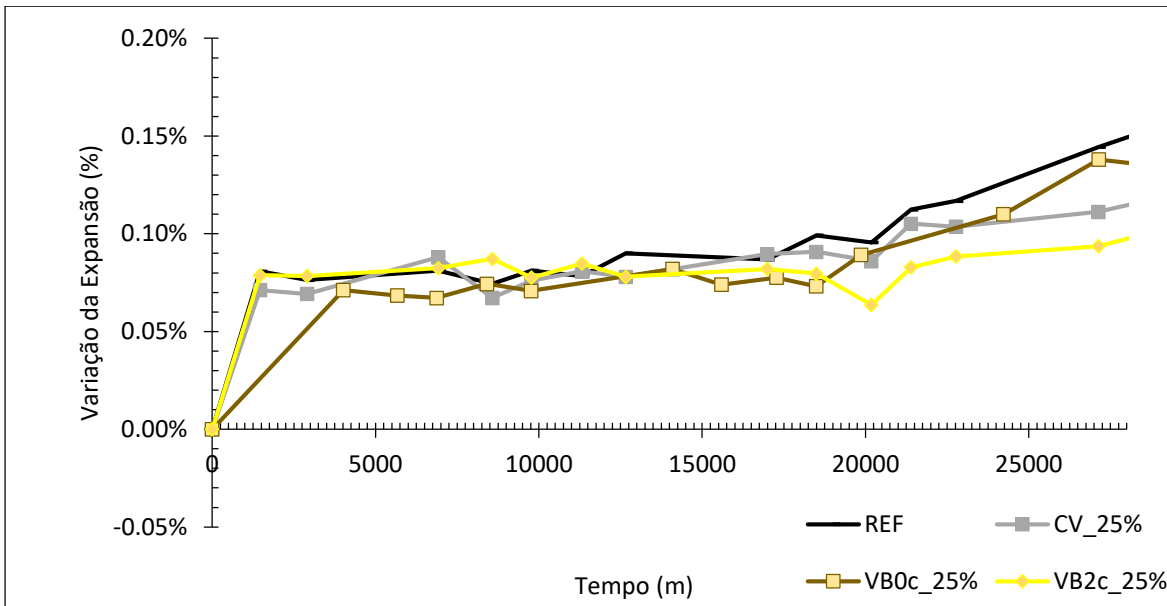


Figura 68 - Resultados do ensaio Álcalis-Sílica para o VB.

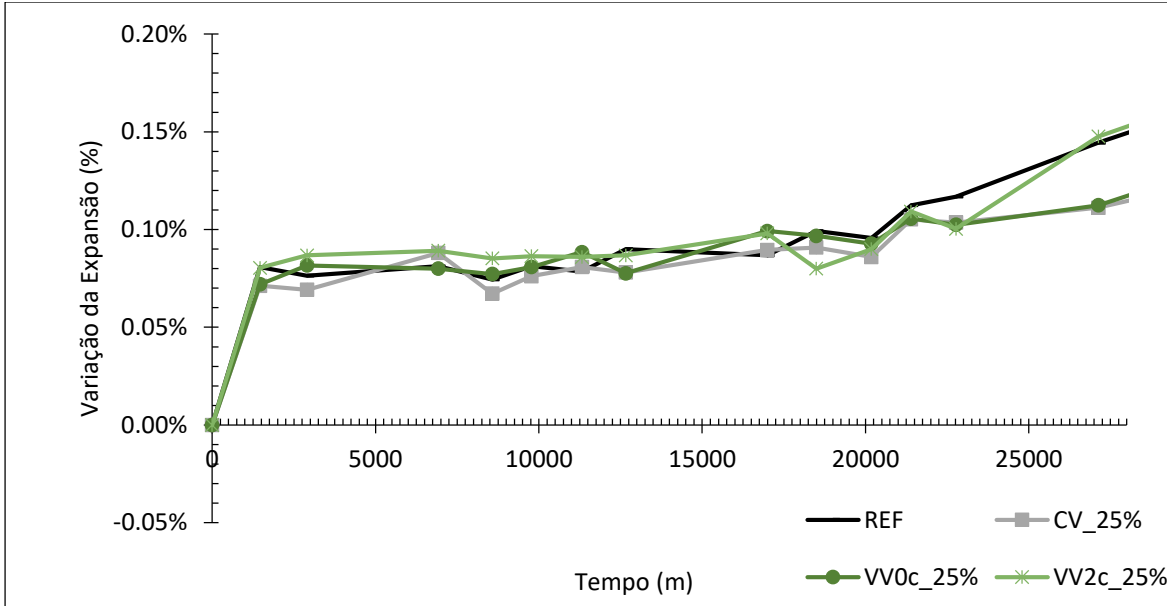


Figura 69 - Resultados do ensaio Álcalis-Sílica para o VV.

Referir ainda que, analisando os dados anteriores, o pó de vidro pode ser classificado segundo o LNEC 461 (2007), como Classe I, pois apesar de conter um alto teor de álcalis (como foi referido no capítulo 2), este não apresentou expansão RAS significativa, como pelo contrário: ainda ajudou a atenuar o seu efeito. Apesar do provete de argamassa de REF não ter sido fabricado segundo a LNEC 461 (2007), mas seguindo a tipologia utilizada para os restantes provetes anteriormente produzidos, comprovou-se que as argamassas onde era introduzido o pó de vidro apresentavam menos RAS.

Assim como Stark [60] e Gupta [41] já o tinham demonstrado, o ensaio RAS realizado no LMC da Universidade do Minho, não foi exceção e demonstrou que a expansão RAS para o pó de vidro é tendencialmente não perigosa. Sabe-se, também, que a mesma só provocaria expansão significativa se as partículas apresentassem dimensão, igual ou superior a 1mm, o que não foi o caso.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

No presente capítulo serão apresentadas as conclusões originadas pelo trabalho efetuado na dissertação, as principais limitações e problemas existentes, mencionando-se no fim um conjunto de sugestões de trabalhos futuros que venham complementar os resultados obtidos.

5.1 Conclusões

De forma introdutória, importa referir que o trabalho elaborado veio mostrar que o vidro aparenta ser um material sobre o qual se deve debruçar a investigação, pois possui características físicas e químicas que podem viabilizar a sua utilização em misturas cimentícias. Mais ainda, conforme referido anteriormente, a quantidade de pó de vidro que pode resultar de uma mais eficaz reciclagem das embalagens de vidro, pode vir a suprir as necessidades da indústria dos betões e argamassas e, assim, pode contribuir significativamente para que o betão seja um material sustentável.

Em relação ao processo de transformação do vidro sólido em pó, é sem dúvida muito moroso e engloba um dispêndio de alguma energia. Apesar do muito tempo despendido, o resultado final é promissor pois obtiveram-se percentagens de passados no peneiro 75 μm que praticamente atingiram os 100% após 40 ciclos de Los Angeles e 4 ciclos de Moinho de Bolas, o que significou aproximadamente 40 horas de trabalho. No entanto, o processo de moagem poderá ser industrializado e, facilmente, ser muito mais eficaz do que o processo que foi adotado e que pode ser considerado artesanal.

Quanto aos ensaios de caracterização física efetuados, vieram comprovar uma aproximação considerável entre as características específicas das diferentes cores de pó de vidro e as cinzas volantes. É importante que exista uma relação entre estes parâmetros uma vez que quando se pretende sugerir a substituição de um constituinte, o seu substituto deve respeitar, pelo menos, o desempenho que o anterior desempenhava.

No que diz respeito aos ensaios de resistência mecânica, já foram sendo mencionadas algumas conclusões parciais ao longo da apresentação e discussão de resultados, devendo globalmente mencionar-se que os melhores valores de resistência à compressão foram obtidos para o cenário

em que se inclui uma incorporação de 25% de pó de vidro da cor âmbar (D50 igual 23,40 μm e superfície específica igual a 398,4 m^2/kg) e, simultaneamente, com a cura efetuada a uma temperatura controlada de $60^\circ\text{C}\pm 1^\circ\text{C}$. Considerando os provetes curados imersos em água a $20^\circ\text{C}\pm 1^\circ\text{C}$, situação mais comum no controlo da resistência de argamassas e betões, o melhor resultado aos 90 dias foi para o pó de vidro âmbar com 2 ciclos de moagem no moinho de bolas. Porém, em todas as idades de cura (7, 28 e 90 dias) a discrepância de resultados não foi muito relevante. Os demais resultados obtidos com as diferentes tipologias de cor também foram, em regra, superiores aos obtidos com as cinzas volantes. Ou seja, este é um fator fundamental que indica o sucesso da substituição, sendo ainda necessário analisar características que vão para além da resistência à compressão.

Por fim, em relação à reação álcalis-sílica, é importante apenas referir que se verifica uma redução do efeito dessa reação nas argamassas com incorporação de pó de vidro como substituto parcial das cinzas volantes, mais uma virtude desta alternativa e que valida a sua aplicação em misturas cimentícias

5.2 Trabalhos Futuros

Inerente a qualquer trabalho de investigação que se encerra em determinado momento, está sempre a necessidade de se fazer uma reflexão daquilo que se pode fazer para melhorar as metodologias e os resultados obtidos.

Atendendo ao *know-how* depreendido nesta dissertação, sugerem-se os seguintes trabalhos:

- Utilização de vidro proveniente de fontes especializadas na sua recolha e reciclagem. Ou seja, desse modo poder-se-á obter uma visão mais clara e real da granulometria de vidro que resultaria de um aproveitamento em maior escala. Permitiria ainda a clarificação do impacto das impurezas sólidas e químicas nas características quer do pó obtido quer nas argamassas e/ou betões produzidos;
- Tentar efetuar um controlo da quantidade de energia necessária para a transformação do vidro sólido em pó, de modo a poder, posteriormente, efetuar uma comparação com outros processos efetuados para a obtenção de materiais similares;

- Sugere-se, também, um maior aprofundamento naquilo que são as características microscópicas do grão obtido, através de análises SEM e FTIR;
- No que diz respeito aos ensaios de durabilidade, podem complementar-se aqueles que foram efetuados nesta dissertação através da realização de outras tipologias de análise como: absorção de água por capilaridade, resistência aos cloretos, etc;
- Propõem-se o estudo do efeito da incorporação de pó de vidro em amassaduras de betão, avaliando o seu desempenho no estado fresco e endurecido (durabilidade e resistências mecânicas);
- Recomenda-se ainda a possibilidade de fabricar betões com reduzido teor de cimento, ou seja, fabricar betões recorrendo a substituições de cimento por pó de vidro com percentagens superiores a 50%, avaliando o seu desempenho.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Lefebure, P. Horjak, S. (2021). Cimeira sobre as alterações climáticas (COP26).Concelho Europeu, Consultado em janeiro 4, 2022, em <https://www.consilium.europa.eu/pt/policies/climate-change/paris-agreement/cop26/>
- [2] Neville & A. M. (2002) Properties of concrete (4th ed.). Longman Scientific & Technical.
- [3] Lefebure, P. Horjak, S. (2021). Cimeira sobre as alterações climáticas (COP26).Concelho Europeu, Consultado em janeiro 4, 2022, em <https://www.consilium.europa.eu/pt/policies/climate-change/paris-agreement/cop26/>
- [4] Redação SustentArqui. (2019). Impactos Ambientais da Construção Civil. *SustentArqui, Consultado a 10 janeiro, 2022, em* <https://sustentarqui.com.br/impactos-ambientais-da-construcao-civil/>
- [5] Torgal, F. P. Castro-Gomes, J. P. Jalali, S. (2005) Ligantes geopoliméricos: Uma alternativa ambiental ao cimento Portland no contexto da economia do carbono, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.
- [6] Helene P. (2010) Concreto de Cimento Portland. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais (chap. 29). Consultado em janeiro 4, 2022, na base de dados www.sciencenews.org.
- [7] NP 197 – 1. 2012, Cimento Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes.
- [8] Aguiar, J. B. (2009) *Materiais de Construção II*. Apontamentos da Unidade Curricular, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.
- [9] Gomes, A. Ferreira, A. P. João, P. & Pinto, B. (2013) *Materiais de Construção: Cimento Portland e Adições*. Apontamentos da Unidade Curricular, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- [10] Rocha, J. A. F. (2016) *Desempenho de argamassas produzidas com cimento reciclado Mestrado Integrado em Engenharia Civil*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em construção e Reabilitação, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.

- [11] eCycle, (2022) Clínquer: impactos ambientais e alternativas. Consultado em janeiro 4, 2022, em <https://www.ecycle.com.br/clinquer/>
- [12] Rodgers, L. , (2018) Aquecimento global: a gigantesca fonte de CO2 que está por toda parte, mas você talvez não saiba. *BBC News*, Consultado em janeiro 4, 2022, em noticias.uol.com.br/meio-ambiente/ultimas-noticias/bbc/2018/12/17/aquecimento-global-a-gigantesca-fonte-de-co2-que-esta-por-toda-parte-mas-talvez-voce-nao-saiba.htm?msclid=3d964d3fbac311eca6e5b8bbce03883a
- [13] Maury, M. B. Blumenschein, R. N. (2012). Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente. *Sustentabilidade em Debate*, 3 (1), (pp-75-96). [14] Costa, A. & Appleton, J. (2002) Estruturas de Betão I, Parte II- Materiais. Apontamentos da Unidade Curricular, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- [15] NP EN 196 - 1. 2017, Métodos de ensaio de cimentos Parte 11: Determinação das resistências mecânicas.
- [16] Lima de Almeida, J. L. M. S. (2010). Argamassas Tradicionais e Industriais de Alvenaria em edifícios. Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de mestre em Engenharia Civil- especialização em materiais e processos de construção. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- [17] A. Margarida, D. Brito Da Mana. (2013). Influência das cinzas volantes não conformes em argamassas de cal aérea. Dissertação para obtenção do Grau Mestre em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- [18] Camões de Azevedo, A. F. F. L. (2002). Betões de Elevado Desempenho com Incorporação de Cinzas Volantes. Dissertação de Doutoramento, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.
- [19] Raposeiro da Silva, P. M. S. (2013). Avaliação da Durabilidade de Betões Autocompactáveis (BAC). Dissertação de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- [20] NP EN 450 –1. 2012.Cinzas volantes para betão Parte 1: Definição, especificações e critérios de conformidade.

- [21] Alonso, J. L. & Wesche, K. (1991). Fly ash in concrete: properties and performance. Report of technical committee 67-FAB – use of fly ash in building, (pp. 3-23).
- [22] Assadi, S. (2009). De M. Impact of cofiring biomass with coal in power plants – A techno-economic assessment. *Biomass Bioenergy*, 33(2), (pp. 283–293). [23] Wang, S. & Baxter, L. (2007). Comprehensive study of biomass fly ash in concrete: strength, microscopy, kinetics and durability. *Fuel Process Technol*, 88, (pp. 1165–1170).
- [24] Wang, S. Baxter, L. & Fonseca, F. (2008). Biomass fly ash in concrete: SEM EDX and ESEM analysis. *Fuel*, 87(3), (pp. 372–379).
- [25] Wang, S. Llamazos, E. Baxter, L. & Fonseca, F. (2008). Durability of biomass fly ash concrete: Freezing and thawing and rapid chloride permeability tests. *Fuel*, 87(3), (pp. 359–364).
- [26] Wang, S. & Baxter, L. (2009). Biomass ash in concrete- mitigation of Alkali Silica Reactions (ASRs) expansions with different opal percentages. *Key Eng Mater*, 131(6), (pp. 400–402).
- [27] S. Wang, (2014). Compressive strengths of mortar cubes from hydrated lime with cofired biomass fly ashes. *Construction and Building Materials*, 50, (pp. 414–420).
- [28] Esteves, T. C. Rajamma, R. Soares, D. Silva, A. S. Ferreira, V. M. & Labrincha, J. A. (2012). Use of biomass fly ash for mitigation of alkali-silica reaction of cement mortars. *Construction and Building Materials*, 26(1), (pp. 687–693).
- [29] Crouch, L. K. Kelley, A. Mathews, S. Badoe, D. & Sparkman, A. (2012). Preliminary Study of the Potential of a Beneficiated Ultrafine Class F Fly Ash. Consultado em janeiro 6, 2022, em www.worldofcoalash.org.
- [30] Silva, P. (2008). Argamassas de reparação. Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- [31] Medeiros, R. (2018). Estudo da influência das características das cinzas volantes nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido: proposta de método simplificado.

- Dissertação submetida ao Programa de pós-graduação em Engenharia civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.
- [32] Latifee, E. R. (2016). State-of-the-Art Report on Alkali Silica Reactivity Mitigation Effectiveness Using Different Types of Fly Ashes. *Journal of Materials*, vol. 1, (pp. 1–7).
- [33] Wang, Y. Acarturk, B. C. Burris, L. Hooton, R. D. Shearer, C. R. & Suraneni, P. Physicochemical characterization of unconventional fly ashes. *Fuel*, 316.
- [34] Abdollahnejad, Z. Kheradmand, M. & Pacheco-Torgal, F. (2017). Short-Term Compressive Strength of Fly Ash and Waste Glass Alkali-Activated Cement-Based Binder Mortars with Two Biopolymers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(7).
- [35] Wang, S. Miller, A. Llamazos, E. Fonseca, F. & Baxter, L. (2008). Biomass fly ash in concrete: Mixture proportioning and mechanical properties. *Fuel*, 87(3), (pp. 365–371).
- [36] Trentin, P. O. Manica, J. Vanzetto, S. C. Marangoni, B. & Zaleski, A. (2020). Substituição parcial de agregado miúdo por resíduo de vidro moído na produção de argamassa. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 25(1).
- [37] Neto, M. K. (2017). Elaboração do Vidro, *Introdução ao Vidro e sua Produção*. Consultado em janeiro 8, 2022, em https://wikividros.eesc.usp.br/introducao_ao_vidro_e_sua_producao/elaboracao
- [38] “Vidro: história, composição, tipos, produção e reciclagem. Consultado em janeiro 6, 2022, em <https://www.recicloteca.org.br/material-reciclavel/vidro/>.
- [39] Reciclagem de Resíduos de Embalagens. (2021). Consultado em janeiro 6, 2022, em <https://rea.apambiente.pt/content/reciclagem-de-res%C3%ADduos-de-embalagens?language=pt-pt>
- [40] APA. (2021). Recycling rate of packaging waste by type of packaging. Consultado em janeiro 6, 2022, em <https://rea.apambiente.pt/content/recycling-packaging-waste?language=en>
- [41] ATIC.(2019). Importância do setor para a Economia Nacional. Consultado em fevereiro 3, 2022, em <https://www.atic.pt/industria-economia-nacional-2/>

- [42] Owens, L. Plate, P. & Company, G. (2011). Apontamentos, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- [43] Neto, M. K. (2017). Elaboração do Vidro, *Introdução ao Vidro e sua Produção*. Consultado em janeiro 8, 2022, em https://wikividros.eesc.usp.br/introducao_ao_vidro_e_sua_producao/elaboracao
- [44] Chen, G. Lee, H. Lun Young, K. Lock Yue, P. Wong, A. Tao, T. Keung Choi, K. (2002). Glass recycling in cement production-an innovative approach. Waste Management. Univesity of Science and Technology, Hong Kong. (pp. 747-753).
- [45] M. Kamali and A. Ghahremaninezhad, “Effect of glass powders on the mechanical and durability properties of cementitious materials,” *Construction and Building Materials*, vol. 98, pp. 407–416, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.010.
- [46] Gupta, J. Jethoo, A. S. & Ramana, P. V. (2021). Valorization of soda lime glass in cement sand matrix. *Materials Today: Proceedings*.
- [47] Shao, Y. Lefort, T. Moras, S. & Rodriguez, D. (2000). Studies on concrete containing groundwaste glass. *Cem Concr Res*, 30(1), (pp. 91–100).
- [48] Shi, C. Wu, Y. Rieflerb, C. & Wang, H. (2005). Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. *Cem Concr Res*, 35(5), (pp. 987–993).
- [49] Park, SB. Lee, BC. & Kim, JH. (2004). Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate. *Cem Concr Res*, 34(12), (pp. 2181–2189).
- [50] Sobolev, K. Turker, P. Soboleva, S. & Iscioglu, G. (2007). Utilization of waste glass in ECO-cement: strength properties and microstructural observations. *Waste Manage*, 27, (pp. 971–976).
- [51] Karamberi, A. & Moutsatsou, A. (2005). Participation of coloured glass cullet incementitious materials. *Cem Concr Compos*, 27, (pp. 319–327). [47] Dhir, R. Dyer, T. Tang, A. & Ayongjun, C. (2004). Towards maximizing the value and sustainable use of glass. *Concrete*, 1(38), (pp. 38–40).

- [52] Dhir R, Dyer T, Tang A, and Ayongjun C, “Towards maximizing the value and sustainable use of glass,” *Concrete*, vol. 1, no. 38, pp. 38–40, 2004.
- [53] Idir, R. Cyr, M. & Tagnit-Hamou, A. (2011). Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet. *Cement and Concrete Composites*, 33(1), (pp. 19–29)
- [54] Aliabdo, A.A. M, A.E. Elmoaty, Abd & Aboshama, A.Y. (2016). Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete. *Constr. Build. Mater*, 124, (pp. 866–877).
- [55] Parghi, A. & Shahria Alam, M. (2016). Physical and mechanical properties of cementitious composites containing recycled glass powder (RGP) and styrene butadiene rubber (SBR). *Constr. Build. Mater*, 104, (pp. 34–43).
- [56] Nahi, S. Leklou, N. Khelidj, A. Oudjit, M. N. & Zenati, A. (2020). Properties of cement pastes and mortars containing recycled green glass powder. *Construction and Building Materials*, 262.
- [57] Islam, G. M. S. Rahman, M. H. & Kazi, N. (2017). Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(1), (pp. 37–44).
- [58] Khan, M. N. N. Saha, A. K. & Sarker, P. K. (2020). Reuse of waste glass as a supplementary binder and aggregate for sustainable cement-based construction materials: A review. *Journal of Building Engineering*, 28.
- [59] Du, H. & Tan, K. H. (2017). Properties of high volume glass powder concrete. *Cement and Concrete Composites*, 75, (pp. 22–29).
- [60] Stark, D. Helmuth, R. Diamond, S. & Moranville-Regourd, M. Alkali–silica reactivity: an overview of research. Washington.
- [61] Huang, L. & Yan, P. (2019). Effect of alkali content in cement on its hydration kinetics and mechanical properties. *Constr. Build. Mater*.
- [62] H. Du and K.H. Tan, “Waste glass powder as cement replacement in concrete,” *J. Adv. Concr. Tech.*, pp. 468–477, 2014.

- [63] Jawed, I. & Skalny, J. (1978). Alkalies in cement: a review II. Effects of alkalies on hydration and performance of Portland cement. *Cem. Concr. Res*, (pp. 37–52).
- [64] Khmiri, A. Chaabouni, M. & Samet, B. (2013). Chemical behavior of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars. *Constr. Build. Mater*, (pp. 74–80).
- [65] Bignozzi, M. C. Sacconi, A. Barbieri, L. & Lancellotti, I. (2015). Glass waste as supplementary cementing materials: The effects of glass chemical composition. *Cement and Concrete Composites*, 55, (pp. 45–52).
- [66] Duchesne, J. & City, Q. (1994). The effectiveness of supplementary cementing materials in suppressing expansion due to ASR: another look at the reaction mechanisms. *Part 2: pore solution chemistry*, *Cem Concr Res*, 24, (pp. 221–230).
- [67] NP 1097 –2. 2011, Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados Parte 2: Métodos para a determinação da resistência à fragmentação.
- [68] NP EN 933 – 1. 2014, Ensaios das propriedades geométricas dos agregados Parte 3: Determinação da forma das partículas Índice de achatamento.
- [69] NP EN 1097 – 6. 2016, Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água.
- [70] NP EN 196 – 6. 2019, Métodos de ensaio de cimentos Parte 6: Determinação a finura.