

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Othon de Oliveira Moreira Junior

Betão de elevado desempenho com grandes
incorporações de pó de vidro.

Dissertação de Mestrado em
Construção e Reabilitação Sustentáveis

Trabalho efetuado sob a orientação de
Aires Fernando F. L. Camões Azevedo
Raphaele de Lira Meireles de Castro Malheiro

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 praticas 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 RepositorioUM 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

Este trabalho só se tornou realidade devido a colaboração de diversas pessoas que, independentemente do tamanho de sua contribuição, das formas mais simples às mais complexas, foram fundamentais para a conclusão deste trabalho. Na eventualidade de não serem citados nominalmente a seguir, registro desde já meus sinceros agradecimentos a todos.

Um especial agradecimento aos meus orientadores, Professor Aires Camões e a Doutora Raphaele Malheiro, pela orientação sempre muito dedicada e atenciosa. Suas sugestões e recomendações contribuíram demais para meu aprendizado. Foram grandes incentivadores deste percurso em todos os sentidos.

Ao Carlos Jesus pela parceria, dedicação e apoio laboratorial incondicional. Estive ao meu lado sempre que precisei. Um amigo que facilitou, em muito, o meu percurso. Compartilhamos bons momentos de convivência.

Um agradecimento também a todos colegas de Laboratório que em alguns momentos forneceram uma “força” extra para a condução dos ensaios. Sua companhia me permitiu conhecer pessoas maravilhosas, com caminhos inspiradores.

A minha esposa Adriana que é minha alma gêmea. Sempre estive ao meu lado me incentivando e ajudando, com muito amor e carinho. Se sacrificou para que eu pudesse realizar um sonho e me ajudou a construir uma família da qual muito me orgulho. Aos meus filhos Rafael e Julia que, dia após dia, me inspiram a lutar. É uma imensa satisfação saber que eles vão conseguir trilhar seus caminhos com total autonomia, com muita dedicação, humildade, responsabilidade, perseverança e alegria de viver.

Enfim, o meu muito obrigado por tudo!

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho 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 União Europeia tem definido metas ambientais cada vez mais ambiciosas como, por exemplo, a neutralidade carbónica e a redução dos consumos energéticos. A indústria do betão tem um papel relevante neste contexto e, por isso, tem intensificado o desenvolvimento de investigações na área da sustentabilidade.

O betão é o produto manufaturado mais consumido no planeta. São cerca de 14 bilhões de metros cúbicos utilizados a cada ano, sendo que este número deve crescer entre 12 a 23% até 2050. A emissão de gases de efeito estufa do setor ronda os 7% das emissões globais de CO₂. Os números são tão expressivos que qualquer ação que possa vir a apresentar melhorias no betão, mesmo que pequenas, permitirá ganhos enormes, pois os efeitos serão potencializados devido ao seu elevado uso. Até recentemente, as cinzas volantes (CV) eram um dos grandes aliados na mitigação dos efeitos da indústria cimenteira, porém com o encerramento das centrais termoelétricas de Sines e do Pego, deixou de haver CV em Portugal.

O propósito deste trabalho foi ampliar o conhecimento acerca da adição de pó de vidro (PV), oriundo do resíduo de embalagens, em betões. Neste trabalho pretende-se maximizar a redução do teor de cimento em betões, considerando que aproximadamente 86% do betão consumido é da classe C30/37. Para avaliar a produção de um betão sustentável, com baixo teor de cimento, desenvolveu-se uma campanha experimental, promovendo um elevado percentual de substituição do cimento por PV (50% e 70%), em provetes de betão com diferentes dosagens. O comportamento mecânico e alguns indicadores de durabilidade foram avaliados.

A alta incorporação de PV apresentou resultados promissores. Dentre as composições estudadas, aquela com menor teor de cimento (150 kg/m³), atingiu 32,09 MPa em 28 dias e 46,42 MPa aos 90 dias. Em composições com menor percentual de redução no teor de cimento (250 Kg/m³), conseguiu-se obter 71,50 MPa aos 90 dias. Ou seja, em termos mecânicos, os objetivos foram superados por misturas com significativas reduções no teor de cimento, sem comprometer os indicadores de durabilidade. Mesmo nas comparações com foco na substituição das CV pelo PV, em dosagens equivalentes, obteve-se resultados equiparáveis ou mesmo melhores. Os resultados indicam que a alta substituição do cimento por PV pode ser uma alternativa viável para reduzir o teor de cimento ou mesmo substituir as CV, promovendo a redução das emissões de CO₂ e do consumo de energia relacionado à produção de cimento.

Palavras chave: Betão, Cinza Volante, Durabilidade, Pó de Vidro, Sustentabilidade.

ABSTRACT

The European Union has been setting increasingly ambitious environmental goals, such as carbon neutrality and energy consumption reduction. The concrete industry plays a significant role in this context and has, therefore, intensified its research efforts in sustainability.

Concrete is the most consumed manufactured product on the planet, with approximately 14 billion cubic meters used each year, a number expected to increase by 12 to 23% by 2050. The greenhouse gas emissions from this sector account for around 7% of global CO₂ emissions. These numbers are so significant that any action that can lead to improvements in concrete, even if small, will yield substantial gains due to its extensive use. Until recently, fly ash (FA) was one of the primary means to mitigate the effects of the cement industry; however, with the closure of the Sines and Pego thermoelectric power plants in Portugal, the availability of fly ash has been reduced.

The purpose of this study was to expand knowledge about the addition of glass powder (GP), derived from packaging waste, in concrete. This study aims to maximize the reduction of cement content in concrete, considering that approximately 86% of the consumed concrete is of class C30/37. To evaluate the production of sustainable concrete with low cement content, an experimental campaign was conducted, promoting a high percentage of cement replacement with GP (50% and 70%) in concrete specimens with different mix designs. The mechanical behaviour and some durability indicators were assessed.

High incorporation of GP yielded promising results. Among the compositions studied, the one with the lowest cement content (150 kg/m³) achieved 32.09 MPa at 28 days and 46.42 MPa at 90 days. In compositions with a lower percentage reduction in cement content (250 kg/m³), it was possible to obtain 71.50 MPa at 90 days. In other words, in terms of mechanical properties, the objectives were exceeded by mixtures with significant reductions in cement content without compromising durability indicators. Even in comparisons with a focus on replacing FA with GP at equivalent dosages, comparable or even better results were achieved. The results suggest that the high substitution of cement with GP can be a viable alternative to reduce cement content or even replace FA, thereby promoting a reduction in CO₂ emissions and energy consumption associated with cement production.

Keywords: Concrete, Glass Powder, Sustainability, Durability, Fly Ash.

ÍNDICE

Agradecimentos	iii
Declaração de Integridade	iv
Resumo	v
Abstract	vi
Índice	vii
Lista de Abreviaturas	ix
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO	1
1.2 CONTEXTO DA INDÚSTRIA DE CONSTRUÇÃO	2
1.3 MOTIVAÇÕES	3
1.4 OBJETIVOS	5
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	6
2 ESTADO DO CONHECIMENTO	7
2.1 O BETÃO E OS SEUS CONSTITUINTES	7
2.2 O MERCADO DO BETÃO	8
2.3 CIMENTO	9
2.3.1 Impactos ambientais do cimento	10
2.3.2 Adições minerais	11
2.4 CINZAS VOLANTES	13
2.4.1 Origem e generalidades	13
2.4.2 Betões com altos volumes de cinzas volantes (HVFA)	14
2.4.3 Usos e efeitos das cinzas volantes	16
2.4.4 Indisponibilidade das cinzas volantes	18
2.5 RESÍDUO DE EMBALAGENS DE VIDRO – PÓ DE VIDRO	20
2.5.1 Fabricação do vidro	20
2.5.2 Impactos do vidro	20
2.5.3 Tipos e caracterização do vidro	22
2.5.4 Uso e condicionantes para uso do vidro em betão	25
3 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS	39
3.1 MATERIAIS	39
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	42
3.3 PROCEDIMENTO PARA PRODUÇÃO DOS PROJETOS	46
3.4 PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS	49
3.4.1 Abaixamento (Slump Test)	49
3.4.2 Resistência Mecânica	49
3.4.3 Indicadores de durabilidade	50
3.4.3.1 Absorção de água por capilaridade (LNEC E 393)	50
3.4.3.2 Absorção de água por imersão (LNEC E 394)	51
3.4.3.3 Carbonatação acelerada (LNEC E 391)	52
3.4.3.4 Migração de Cloretos (LNEC E463)	53
3.4.3.5 Resistividade elétrica	54

4	RESULTADOS E ANÁLISES.....	56
4.1	ABAIXAMENTO	56
4.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	56
4.3	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	61
4.4	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO	64
4.5	CARBONATAÇÃO ACELERADA	68
4.6	DIFUSÃO DE CLORETOS	71
4.7	RESISTIVIDADE ELÉTRICA	73
4.8	DESEMPENHO GERAL DAS COMPOSIÇÕES ESTUDADAS	75
4.9	AValiação DA SUSTENTABILIDADE	76
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	84
5.1	PRINCIPAIS CONCLUSÕES	84
5.2	SUGESTÕES DE DESENVOLVIMENTO FUTURO.....	86
	REFERÊNCIAS.....	87

LISTA DE ABREVIACÕES

Al_2O_3 - Óxido de alumínio ou alumina
A/L - Razão água/ligante
AIVE- Associação dos Industriais do Vidro de Embalagem
AIE- Agência Internacional de Energia
APA – Agência Portuguesa do Ambiente
ASTM - American Society for Testing and Materials
ASR – Reação álcalis sílica
CaO – Óxido de Cálcio
 Ca_3SiO_5 ou C_3S - Silicato tricálcico
 Ca_2SiO_4 ou C_2S - Silicato dicálcico
 $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ - Aluminato tricálcico
 $\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5$. Tetracálcio aluminoferrite
 CO_2 – Dióxido de Carbono
C-H – Hidróxido de cálcio
C-S-H - Silicato de cálcio hidratado
CV – Cinzas volantes
DGEG - Direção geral de energia e geologia
EUA – Estados Unidos da América
FA – Fly Ash (Cinzas Volantes)
FEVE – European Glass Container Glass Federation
FGA – Areia de vidro moído
GCCA – Global Cement and Concrete Association
GEE – Gases do efeito estufa
GGA - Agregado grosso de vidro
GJ – Giga joules
GP – Glass powder (vidro em pó)
HVFA – *High Volume Fly Ash* (Alto volume de cinzas volantes)
INETI - Instituto Nacional de Engenharia Tecnologia e Inovação
ITZ - Zona de Transição Interfacial
kg – Quilograma

LMC – Laboratório de Materiais de Construção
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil
m – Metro
MEV – Microscopia eletrônica de varredura
MgO – Óxido de Magnésio
mm – Milímetro
MPa – Mega Pascal
NaOH - Hidróxido de sódio
Na₂O – Óxido de Sódio
PV – Pó de vidro
RAS – Reação álcalis-silica
SCM's – Materiais substitutos do cimento
SiO₂ – Sílica
TGA – Análise por termogravimetria
UE – União Europeia
μm – Micrómetro
°C – graus centígrados

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Consumo % de betão por classe - Europa (ERCMO, 2019).....	8
Figura 2 - Consumo de betão por setor na Europa (a) e em Portugal (b) (ERCMO, 2019).	8
Figura 3 - Consumo por tipo de cimento Europa (Cembureau, 2013).....	9
Figura 4 – Máxima resistência à compressão betão HVFA – 50 a 80% de CV (Herath 2020).	14
Figura 5 - Evolução da produção anual de vidro europeia (FEVE, 2022).	21
Figura 6 - Morfologia por microscopia MEV, a) do cimento e b) do vidro (Jiang et al, 2022).	24
Figura 7 - Curva teor de álcalis do betão ao longo do tempo (Taha e Noumu, 2008).....	25
Figura 8 – Efeito da inclusão do pó de vidro no abatimento (Deepa Paul et al. 2022).	27
Figura 9 - Resistência x idade e granulometria do betão com 30% de vidro (Shao et al. 2000).	27
Figura 10 - Efeito da adição do vidro no betão (Aliabdo et al., 2016).	29
Figura 11 - Conteúdo de Ca(OH)_2 de acordo com % de pó de vidro (Aliabdo et al., 2016).	31
Figura 12 - Resultado teste rápido de cloretos, por idade e material (Kamali, 2015).	33
Figura 13 – Profundidade penetração d’água em betão com PV aos 28 dias (Du e Tan, 2014).	36
Figura 14 – Resistividade elétrica em betão (Kamali, 2015).	38
Figura 15 – Areia utilizada nos ensaios.....	39
Figura 16 – Brita utilizada nos ensaios.	39
Figura 17 – Metodologia de obtenção do pó de vidro.....	41
Figura 18 – Equipamento Mastersizer 3000.....	42
Figura 19 – Curva de granulometria dos materiais.	43
Figura 20 – MEV (x 1.00k) do: (a) PV , (b) Cimento e (c) Cinzas volantes.....	45
Figura 21 – Percentual de material por composição.....	47
Figura 22 – (a)Pesagem, (b), (c) e (d) procedimento de mistura.....	48
Figura 23 – Moldagem (a), compactação (b) e cura (c).	48
Figura 24 – Ensaio de abaixamento (Slump).	49
Figura 25 – Prensa para ensaio de resistência à compressão.	50
Figura 26 – Ensaio de absorção por capilaridade (a) secagem, (b)silicone e (c) ensaio em execução.	51
Figura 27 – Ensaio de absorção por imersão.....	52
Figura 28 – Camara de carbonatação (a) e medição da profundidade de carbonatação (b).	53
Figura 29 – Camara de vácuo (a), ensaio em execução (b) e medição dos resultados (c).	54
Figura 30 – Marcação dos provetes (a) e equipamento Resipod (b).....	55
Figura 31 – Slump vs. A/L.....	56
Figura 32 – Resistencia média à compressão aos 7, 14, 28, 90 e 180 dias.	57
Figura 33 – Evolução da resistência média à compressão ao longo do tempo.....	57

Figura 34 – Ruptura característica ocorrida nos provetes.	57
Figura 35 – Evolução percentual da resistência à compressão por idade.	58
Figura 36 – Resistência à compressão aos 90 dias (análises comparativas)	59
Figura 37 – Curva de absorção capilar (após cura de 28 dias).	61
Figura 38 – Curva de absorção capilar (após cura de 90 dias).	62
Figura 39 – Absorção capilar após cura de 28 dias, 4 horas iniciais.	63
Figura 40 – Absorção capilar após cura de 90 dias, 4 horas iniciais.	63
Figura 41 – Coeficiente de absorção capilar aos 28 e 90 dias.	64
Figura 42 – Coeficiente de absorção por imersão aos 28 e 90 dias.	65
Figura 43 – Comparação entre composições de PV com 150 kg/m ³ de cimento, aos 28 e 90 dias. ...	66
Figura 44 – Comparação CV versus PV com dosagem equivalente, 28 e 90 dias.	66
Figura 45 – Correlação entre porosidade e resistência à compressão aos 28(a) e 90(b) dias.	67
Figura 46 – Evolução da profundidade de carbonatação das composições.	68
Figura 47 – Coeficiente de difusão de cloretos por migração aos 28 e 90 dias.	71
Figura 48 – Coeficiente de difusão de cloretos por migração aos 28 e 90 dias.	72
Figura 49 – Relação entre porosidade x resistência x difusão de cloretos aos 90 dias.	73
Figura 50 – Evolução da resistividade elétrica aos 7, 28 e 90 dias.	74
Figura 51 – Indicador sustentável das composições comparadas ao betão de referência.	80
Figura 52 – Indicador sustentável das composições comparadas ao betão de CV.	81
Figura 53 – Distribuição dos indicadores ambiental, económico e funcional por cenário.	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo (adaptado) composições betões HVFA x autor (Herath, 2020).	14
Tabela 2 – Densidade e superfície específica dos vidros por cor (Oliveira, 2012).	22
Tabela 3 - Composição química do vidro por tipo (McLellan, 1984).	23
Tabela 4 – Requisitos químicos para pozolanas de vidro (ASTM C1866)	24
Tabela 5 – Requisitos físicos para pozolanas de vidro (ASTM C1866)	24
Tabela 6 – Composição das misturas utilizadas por Aliabdo et al. (2016).	28
Tabela 7 – Resumo com especificações gerais e resistências obtidas por alguns autores.	30
Tabela 8 - Características do vidro vs. requisitos ASTM C618 (Aliabdo et al., 2016).	31
Tabela 9 – Índice atividade por cor do vidro e ciclo de moagem (Moreira, 2022).	32
Tabela 10 – Classificação qualitativa para absorção capilar (Browne, 1991).	36
Tabela 11 – Classificação qualitativa para absorção por imersão (AFGC, 2004).	37
Tabela 12 – Distribuição do tamanho das partículas de cimento, CV e PV.	43
Tabela 13 – Superfície específica e densidade.	44
Tabela 14 – Composição química do cimento, CV e PV.	46
Tabela 15 – Composição das misturas.	46
Tabela 16 – Ensaios, Idades e Provetes (por mistura).	48
Tabela 17 – Fotos da evolução da carbonatação das composições.	69
Tabela 18 – Desempenho geral das composições.	75
Tabela 19 – Valores de referência utilizados na simulação de desempenho sustentável.	76
Tabela 20 – Parâmetros Sustentáveis e seus respectivos pesos.	78
Tabela 21 – Parâmetros sustentáveis e seus respectivos valores calculados, por composição.	79
Tabela 22 – Parâmetros sustentáveis normalizados.	80
Tabela 23 – Notas sustáveis das composições de acordo com cenário proposto.	82

1 Introdução

1.1 Enquadramento

A União Europeia tem assumido o protagonismo mundial em ações que visem combater o aquecimento global, a escassez de energia, a preservação de recursos naturais, a deposição adequada de resíduos e a promoção da economia circular. Ao adotar metas desafiadoras para as indústrias e fornecedores que pretendam negociar com o mercado europeu, estabeleceu-se um ciclo vicioso na busca pela eficiência e melhoria da qualidade em geral. Os próprios consumidores têm sido cada vez mais exigentes e criteriosos, levando em consideração os efeitos do produto para o meio ambiente ao fazer suas escolhas.

Estas exigências tem incentivado o desenvolvimento contínuo de ações relacionadas a pesquisa e inovação, com foco na redução dos impactos ambientais. Dentre as ações mais relevantes nestas pesquisas cita-se a busca pela neutralidade carbónica e a redução dos consumos energéticos. Neste contexto, a indústria do betão passou a ser um dos principais alvos por apresentar uma enorme relevância.

O betão é o produto feito pelo homem mais consumido no planeta. São cerca de 14 bilhões de metros cúbicos utilizados a cada ano, sendo que este número deve crescer entre 12 a 23% até 2050 (GCCA, 2022). A produção de cimento, ligante base do betão, gera cerca de 7% das emissões globais de CO₂ (AIE, 2021). Os números são tão expressivos que qualquer ação que possa vir a apresentar melhorias neste processo, mesmo que pequenas, permitirá ganhos enormes, pois os efeitos serão potencializados devido ao seu elevado uso. Passados longos anos após os primeiros registos de seu uso, ainda não se desenvolveu um substituto à altura para o cimento Portland. Sendo assim, é necessário assumir uma postura de torná-lo mais ecológico, reduzindo ao máximo os seus impactos ao meio ambiente.

Investigações atuais têm procurado encontrar substituições parciais do cimento, tentando não só reduzir o consumo de matéria prima nobre, como também possibilitando a inserção de resíduos no processo, alguns inclusive já consolidados. Em Portugal, utilizava-se as cinzas volantes oriundas da geração de energia a partir da queima do carvão, porém estas centrais a carvão foram encerradas recentemente (em novembro de 2021 fechou a última, do Pego), no âmbito das medidas implementadas para atingir a meta da neutralidade carbónica, e com isto surgiu a necessidade de encontrar, de maneira célere, um substituto para elas.

Este trabalho foi desenvolvido no CTAC – Centro de Território, Ambiente e Construção da Universidade do Minho, no âmbito do projeto GlassCON - referência 2000.03197.PTDC.

1.2 Contexto da indústria de construção

O setor da construção possui extrema relevância para o desenvolvimento da humanidade. Se por um lado é um setor com grande impacto, responsável pelo consumo de 50% a 75% dos recursos naturais do mundo, por 40% da energia consumida no mundo, pelo consumo de 15% dos recursos hídricos, por 30% a 40% das emissões de CO₂, além de ser grande gerador de resíduos (SustentArqui, 2019). Porém, pode-se dizer que possui a capacidade de melhorar a condição de vida das pessoas, pois à medida que as cidades se desenvolvem, são promovidas intervenções para ampliar o número de moradias, escolas, hospitais, ruas e estradas, obras de saneamento, dentre outras várias infraestruturas, que são construídas para promover o bem-estar das pessoas.

Com o evoluir das tecnologias e demandas, a indústria da construção tem sido pressionada a criar alternativas inovadoras, incentivando cada vez mais o desenvolvimento de novos materiais, buscando otimizar os processos e inserindo conceitos de sustentabilidade. O potencial de transformação e a capacidade de produzir efeitos significativos do setor, se tornaram um objetivo geral. Muitas melhorias já foram desenvolvidas e grande quantidade de pesquisas tem sido conduzidas no sentido de tornar as atividades de construção mais sustentáveis e de explorar a potencialidade do setor, gerando uma mudança de hábitos global.

O cenário atual, do expressivo aumento no consumo de cimento, aliado a indisponibilidade de cinzas volantes em Portugal, leva a urgência e a busca por substitutos capazes de suprir as lacunas ocasionadas pela falta deste resíduo e ao mesmo tempo contribuir para um processo construtivo mais sustentável.

1.3 Motivações

As principais motivações deste trabalho serão apresentadas nos itens a seguir.

1.3.1 Promover a economia circular e preservar recursos naturais

A demanda crescente por novas obras, eleva a pressão sobre os recursos naturais não renováveis existentes. Estes recursos não são infinitos e para garantir que as próximas gerações tenham acesso aos mesmos é preciso haver um consumo sustentável, que permita suprir as demandas sem comprometer de maneira significativa as reservas. Por este motivo, pode-se dizer que um dos principais fundamentos deste estudo é encontrar um material que seja considerado um resíduo e que seja abundante, barato, fácil de ser transformado em insumo e cumpra os requisitos para substituir o cimento, não só quanto as demandas mecânicas, mas também em relação a sua durabilidade, sendo uma solução ambientalmente interessante. Importa deixar claro que o que se pretende não é atuar no fabrico do cimento, mas sim adicionar o resíduo como substituto parcial do cimento, através da redução de seu teor em mistura, na betoneira.

1.3.2 Reduzir emissões de gases de efeito estufa (GEE) e consumos energéticos

Ao introduzir o resíduo na produção do betão pretende-se contribuir de maneira significativa para diminuir a demanda de clínquer Portland e, assim, reduzir as emissões de (GEE) e os consumos energéticos envolvidos no processo de fabricação do cimento, considerados bastante elevados.

1.3.3 Suprir parcialmente a falta de cinzas volantes

Com o fechamento das termoelétricas ocorrido em Portugal, espera-se ainda um outro grande benefício deste estudo, que seria evitar a perda dos avanços ambientais obtidos com o uso das CV. Na medida que não se tem disponibilidade das CV, indiretamente haveria um efeito contrário, pressionando para uma elevação no consumo de clínquer, o que seria um grande retrocesso para a sustentabilidade do betão.

1.3.4 Contribuir para a redução dos impactos dos aterros sanitários

Ao introduzir o resíduo de vidro proveniente de embalagens haverá redução do descarte deste material em aterros, o que é extremamente relevante pois o vidro não é biodegradável. Apesar do aumento considerável na quantidade de vidro reciclado em países desenvolvidos, a disposição deste material traz grandes transtornos principalmente em grandes cidades onde os volumes são elevados e causam grandes prejuízos para a gestão dos aterros.

1.3.5 Contribuir para os objetivos da ONU de desenvolvimento sustentável

Em 2016, a ONU propôs aos líderes mundiais 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) para que, coletivamente, a humanidade pudesse dissociar o crescimento econômico da pobreza, da desigualdade e das mudanças climáticas. Três em especial, têm estreita relação com o este trabalho:



Segundo a ONU, atualmente 55% da população mundial vive em áreas urbanas e a expectativa é de que esta proporção aumente para 70% até 2050. Por essa razão, é de suma importância garantir a sustentabilidade das comunidades e das edificações a longo prazo.



Focado na promoção de recursos e eficiência energética, infraestrutura sustentável e na prevenção de resíduos por meio da redução, reciclagem e reutilização – princípios de “economia circular”, em que os recursos não são desperdiçados.



Os edifícios são responsáveis por mais de 30% das emissões globais de gases de efeito estufa, segundo a ONU. Portanto, são um dos principais contribuintes para as mudanças climáticas. Por essa razão, as construções sustentáveis têm um enorme potencial para combatê-las por meio de medidas como a eficiência energética e redução das emissões incorporadas nos materiais utilizados.

1.3.6 Contribuir para a ampliação do conhecimento sobre o tema

Há uma tendência na literatura de usar pó de vidro em misturas de betão na faixa de 10% a 30% devido aos benefícios demonstrados serem melhores dentro desse intervalo. No entanto, não há tanta informação disponível para taxas de incorporação mais altas, entre 50 e 70%, em substituição parcial ao cimento, especialmente quando se utiliza redutores de água na mistura. Muitos estudos têm se concentrado em encontrar a dosagem ideal que maximize os efeitos da incorporação de pó de vidro. No entanto, em 2019, 86% do betão produzido na Europa estava na classe C30/C37 ou abaixo (ERCMO 2022). Portanto, o betão que atinge em torno de 35 MPa a 40 MPa de resistência média em corpos de prova cúbicos padrão deve ser viável para a maioria das aplicações usuais. Este trabalho procura contribuir na sequência de estudos já conduzidos na Universidade do Minho, que já demonstraram a viabilidade do uso do vidro moído como substituto ao cimento, com dosagens ótimas na faixa de 25 a 35% de incorporação (Moreira, 2022; Malheiro, 2022). Nestes estudos, já foram definidas algumas características que tiveram seus efeitos comprovados, tais como granulometria e cor do vidro mais adequada.

1.4 Objetivos

Considerando as motivações citadas anteriormente, foi realizada uma campanha de investigação experimental cujo principal objetivo era produzir betão sustentável de alto desempenho, reduzindo a percentagem de cimento na sua composição para 150, 200 ou 250 kg/m³, sem comprometer a sua resistência à compressão e durabilidade, para aplicações habituais. Para atingir este objetivo, foram avaliadas composições com altas taxas de incorporação de pó de vidro, 50% ou 70%, em substituição ao cimento, em volume. Para permitir avaliar e comparar os resultados utilizou-se uma composição de referencia com 300 kg/m³ (300C) de teor de cimento, sem adições, que foi dimensionada para representar um betão convencional.

Um segundo objetivo desta campanha foi avaliar a condição de se utilizar PV como um substituto para as CV na produção de betão. As composições utilizadas foram as mesmas anteriores, apenas alterando a referencia nas comparações. Desta forma, definiu-se uma segunda composição para permitir comparações com as CV, considerando uma substituição de cimento por CV (50%) e com uma dosagem de ligante de 500 kg/m³ (500C50CV). Esta segunda referência teve objetivo de permitir avaliar as composições PV como eventual substituto para as CV.

No decorrer da campanha experimental os materiais foram caracterizados, física e quimicamente. Realizou-se ensaios para determinar os efeitos da elevada substituição do cimento por PV na resistência mecânica (compressão) ao longo de 180 dias, aferindo a durabilidade do betão mediante ensaios de absorção (por imersão e capilaridade), carbonatação, migração de cloretos e resistividade, de modo a permitir a comparação com as duas referências citadas.

1.5 Estrutura da dissertação

Para atingir os objetivos apresentados no item anterior, o documento foi elaborado em cinco capítulos, procurando organizar o desenvolvimento dentro de uma lógica que seja capaz de abordar integralmente o assunto de maneira sucinta e objetiva.

No Capítulo 1 foram expostas as considerações gerais sobre o tema, a contextualização do setor da construção, as motivações e os objetivos a serem alcançados, além de uma descrição de como o documento foi desenvolvido.

No Capítulo 2 foi feita uma revisão bibliográfica, um retrato do estado do conhecimento sobre o tema. O foco estará no cimento Portland, nas cinzas volantes e no pó de vidro enquanto constituinte de misturas cimentícias (argamassas e betões). Uma descrição sobre a importância destes materiais, sua caracterização física e química, seus efeitos e suas condicionantes para uso, vantagens e desvantagens, cenário de consumo e seu impacto ambiental.

No Capítulo 3 foi detalhada a campanha experimental conduzida, com a apresentação e caracterização dos materiais utilizados. Os métodos e ensaios serão pormenorizados, justificando as decisões adotadas. Será apresentada a listagem de provetes, a composição das misturas e toda a preparação dos insumos e suas condicionantes.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos com sua respectiva análise e discussão. Foi também avaliada a sustentabilidade das soluções propostas.

No Capítulo 5 é são apresentadas as considerações finais, onde se apresentam as principais conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

2 Estado do conhecimento

2.1 O betão e os seus constituintes

Ao longo dos anos o betão ganhou importância e se tornou o material manufaturado mais utilizado no planeta, permitindo ao ser humano revolucionar seu sistema construtivo. Algumas de suas características o tornam singular. É um material fácil de moldar, que permite confeccionar estruturas relativamente complexas com baixo custo, utilizando materiais correntes, com processo produtivo e manutenção simples e durabilidade elevada.

Durante muitos anos, a composição do betão era restrita a mistura de cimento, agregados e água. Hoje em dia, diz-se de modo simples que se trata de uma mistura de cimento Portland, com agregados grossos e finos, areia e água com ou sem adições ou adjuvantes.

A partir do momento em que as adições minerais passaram a ser incorporadas no betão, foi possível reduzir o calor de hidratação e melhorar a resistência, trabalhabilidade e durabilidade. Este ponto foi especialmente importante para este e vários outros estudos que pretendem tornar o betão mais sustentável. Ao permitir a introdução de resíduos na mistura, consegue-se promover a economia circular, reduzir custos de produção, reduzir emissões de gases e ainda melhorar alguns parâmetros das misturas cimentícias. As cinzas volantes, até então uma das adições mais utilizadas, passa por uma demanda de substituição, devido ao facto de terem futuro incerto quanto a sua disponibilidade, principalmente em Portugal, onde as usinas termoelétricas a carvão foram fechadas recentemente, em novembro de 2021 fechou a última, do Pego.

Pode-se afirmar que muito se evoluiu na mistura original, mas não podemos deixar de mencionar outros avanços importantes. Hoje em dia existe um conhecimento profundo sobre como fazer a preparação adequada, o transporte, a aplicação, a cofragem, a cura e até mesmo sua conservação. Houve desenvolvimento de várias técnicas e ensaios para garantir uma perfeita seleção de insumos e manutenção ao longo de seu ciclo de vida. A ampliação do conhecimento permitiu o desenvolvimento de especificações adequadas a cada tipo de uso ou agente degradante a que o betão estará exposto.

Atualmente, o betão também assume um papel relevante no sentido de buscar contribuir para o desenvolvimento sustentável, embutindo na sua conceção meios de o tornar mais ecológico. Suas qualidades são enormes, conforme dito antes, ao ponto de que ainda hoje não existir um substituto que possa superá-lo.

2.2 O mercado do betão

Segundo a análise estatística produzida pela *European Ready Mixed Concrete Organization* (ERCMO), em 2019, 86% do betão produzido na Europa estava na classe C30/C37 ou abaixo, Figura 1. Esta informação mostra que um betão que atinge em torno de 35 MPa de resistência média em provetes cúbicos tem uma enorme aplicabilidade no mercado, pode-se dizer inclusive que é o mais usual.

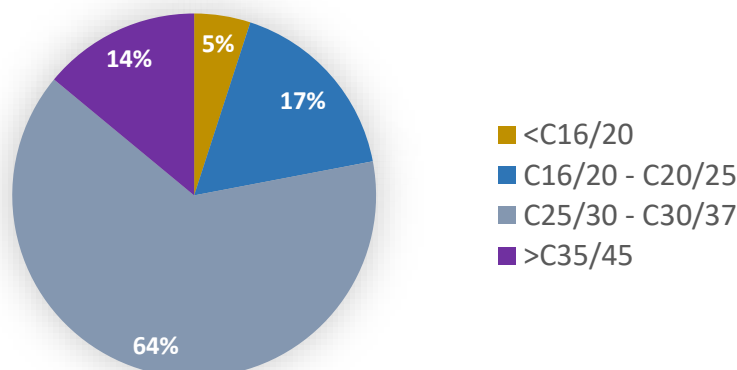


Figura 1 - Consumo % de betão por classe - Europa (ERCMO, 2019).

Segundo esta mesma organização, em 2019, a dosagem de ligante média (cimento + adições), utilizada na Europa, foi de aproximadamente 320 kg/m³. Em Portugal esta dosagem foi de 287 kg/m³. Nestas composições utiliza-se na média algo em torno de 9,1% de adições na Europa e 15,2% em Portugal. Estes percentuais de adição poderiam ser maiores, sendo em muitos limitados devido a indisponibilidade de insumos suficientes para atender a demanda.

A principal utilização de betão, tanto na Europa (Figura 2a) quanto em Portugal (Figura 2b), é nas edificações, e chega a 62,4% e 73,7% respetivamente.

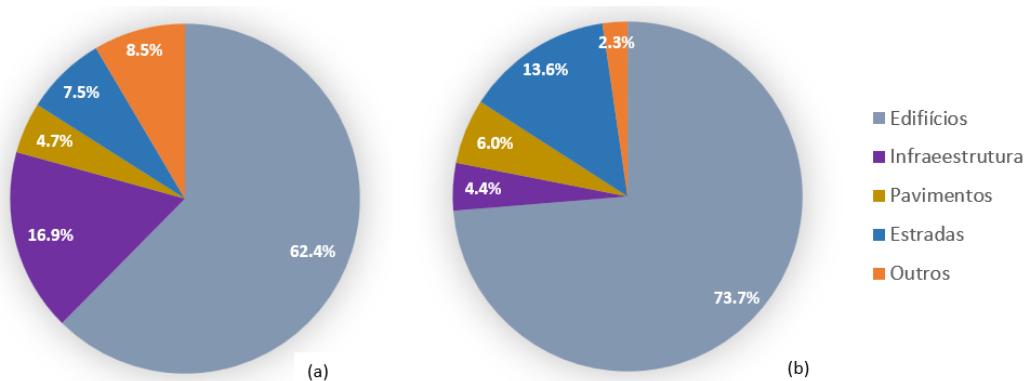


Figura 2 - Consumo de betão por setor na Europa (a) e em Portugal (b) (ERCMO, 2019).

2.3 Cimento

De acordo com os critérios da NP EN 197-1: 2012, existem 27 tipos de cimento usualmente em produção na Europa e estes são agrupados em cinco classes principais:

- CEM I – Cimento Portland: tradicional, com 95 a 100% de clínquer.
- CEM II – Cimento Portland composto: o clínquer oscila entre 65 e 94%, sendo o restante composto por adições: escória de alto forno, cinzas volantes, sílica de fumo, xisto cozido ou calcário;
- CEM III – Cimento de alto forno: nesta classe há redução significativa de clínquer para valores entre 5% e 64%, sendo que o restante da composição é preenchido por escória de alto forno;
- CEM IV – Cimento Pozolânico: nesta classe o clínquer representa entre 45% e 89%, sendo que o restante da composição é preenchido por sílica de fumo, outras pozolanas ou cinza volante;
- CEM V – Cimento composto: nesta classe o clínquer representa entre 20% a 64%, sendo que o restante da composição é preenchida por pozolanas naturais ou calcinadas, e/ou cinza volante siliciosa.

Embora os cimentos misturados já sejam amplamente utilizados na Europa, o mercado global ainda é dominado por cimentos de alto teor de clínquer. De acordo com a Figura 3, pode-se notar que no cenário europeu, os tipos de cimento mais utilizados são o CEM I e II, com uma participação conjunta próxima aos 85% com uma tendência de se reduzir o consumo do CEM I em prol do aumento no consumo dos cimentos compostos (CEM II).

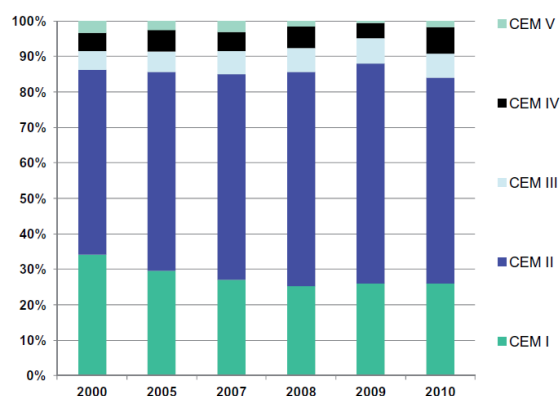


Figura 3 - Consumo por tipo de cimento Europa (Cembureau, 2013).

Ao se observar a classificação dos cimentos, pode-se notar que a indústria já convive com a preocupação de reduzir o teor de clínquer do cimento, incluindo no próprio processo de fabrico outras pozolanas e/ou introduzindo resíduos, como no caso da escória de alto forno, para tornar o cimento mais eficiente e adequado a sua utilização.

2.3.1 Impactos ambientais do cimento

Sendo o insumo principal do betão, o cimento é tido como um dos principais contribuintes para as mudanças climáticas. Os processos de combustão química e térmica envolvidos na produção de cimento são uma grande fonte de emissões de dióxido de carbono (CO_2), a produção de uma tonelada de cimento gera 0,59 toneladas de CO_2 (AIE, 2021) e para se atingir as metas para 2030 (0,43 toneladas de CO_2 por tonelada de cimento) será necessário reduzir as emissões em torno de 27% (AIE, 2021).

O calcário é a principal matéria prima utilizada na produção, sendo necessário cerca de 1,5 toneladas do mesmo para que se fabrique 1 tonelada de cimento (Gupta, 2020). Aliado ao facto de que o cimento é um dos materiais mais consumidos no mundo pode-se ter a dimensão do quanto a produção de cimento afeta na extração deste mineral no ambiente. Apesar de abundante, a extração em grandes volumes de calcário levará a escassez do insumo no futuro.

O desafio é ainda maior devido às projeções de aumento na produção global de cimento, motivada pela rápida urbanização e o desenvolvimento económico, que aumentarão a demanda por novos edifícios e infraestruturas.

Não existe uma solução milagrosa para tornar a indústria de cimento menos poluidora e consumidora de energia. Mais de 50% das emissões do setor cimenteiro estão diretamente ligadas ao próprio processo de calcinação do calcário para produzir o clínquer, efeito da reação química. Tais emissões não podem ser reduzidas simplesmente mudando as fontes de combustível ou aumentando a eficiência das fábricas de cimento. As ações que irão conduzir a mudanças significativas fazem parte de diversos estudos promovidos por associações de produtores e organismos financiadores e que envolvem mudanças nas estruturas fabris, redução do teor de clínquer, eliminação de fontes energéticas obsoletas, introdução de novos materiais e em mecanismos de captura e armazenamento do carbono.

O abandono do uso de combustíveis fósseis na produção de cimento é fundamental. Países como a China e a Índia, têm elevado potencial neste sentido pois ainda têm muito a mudar, implementando combustíveis sustentáveis com baixo teor de carbono. Na Europa, as fábricas de cimento funcionam com 90% de combustíveis não fósseis, porém é importante garantir a disponibilidade de biomassa de fontes genuinamente sustentáveis.

Outra frente importante neste conjunto de ações é a substituição do clínquer por outros materiais, pois trata-se de uma solução eficaz e barata. A meta de alcançar uma proporção média global de clínquer de 0,60 até 2050 (AIE Roadmap, 2009), tem o potencial de mitigar quase 0,2 gigatoneladas de CO₂ em 2050 (Lehne, 2018).

2.3.2 Adições minerais

Uma pozolana é definida como um material silicioso ou silicioso e aluminoso que por si só possui pouco ou nenhum valor cimentício, mas que, finamente dividida e na presença de humidade, reage quimicamente com hidróxido de cálcio em temperaturas normais para formar compostos com propriedades cimentícias (ASTM C125-21a, 2021). As pozolanas que são comumente usadas em betão incluem: cinzas volantes, sílica ativa e uma variedade de pozolanas naturais, como argila e xisto calcinados e cinzas vulcânicas e são frequentemente designadas por *supplementary cementing materials* (SCM). SCM's que são hidráulicos em comportamento incluem escória de alto-forno granulada moída e cinzas volantes com alto teor de cálcio (essas cinzas volantes exibem tanto comportamento pozolânico quanto comportamento hidráulico).

A substituição do clínquer de cimento Portland por SCM ou as chamadas adições, é uma forma de reduzir as emissões de CO₂ da produção de cimento, ou até mesmo reduzir o consumo deste na produção de betões.

As adições são divididas em duas categorias (tipo I e tipo II) em função das suas propriedades pozolânicas. As adições tipo I são designadas como quase inertes (ex: filler calcário) e as tipo II como pozolanas ou adições hidráulicas latentes (ex. cinzas volantes, sílicas de fumo, as pozolanas naturais, as escórias granuladas de alto-forno moídas, o metacaulino e as cinzas de casca de arroz). As adições tipo II podem minimizar a quantidade de hidróxido de cálcio (C-H) resultante da hidratação do cimento, contribuindo assim, para um acréscimo da quantidade de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), com vantagens para a resistência e durabilidade, esta última resultante de uma microestrutura mais densa, que resulta da segmentação dos poros e da redução do teor e da dimensão dos cristais de C-H (Mehta, 1996).

Comparada com a produção mundial de cinzas volantes, a disponibilidade das demais adições minerais é consideravelmente limitada. As adições mais frequentemente citadas na literatura são as sílicas de fumo e as cinzas volantes. A sílica de fumo, cuja disponibilidade é bastante limitada, é, em geral, especificada em aplicações especiais, em ambientes sujeitos a elevado ataque químico. Trata-se de um material de custo substancialmente elevado quando comparado às demais adições, chegando a custar

dez vezes mais que o cimento; por este motivo sua incorporação é limitada. A sílica de fumo é um subproduto que se obtém no processo de fabricação de metais e ligas de silício e ferrosilício.

A utilização das adições geralmente permite ganhos de custo (exceto sílica de fumo), na promoção da economia circular, na sustentabilidade em geral e na melhoria de algumas propriedades. Desta forma, pode-se afirmar que são uma alternativa sustentável.

Em Portugal, um dos materiais mais utilizados até então eram as cinzas volantes – CV. Entretanto, o fechamento das termoelétricas à carvão, apesar de ter sido benéfico na redução das emissões de CO₂, gerou uma lacuna que precisa urgentemente ser resolvida, sob pena de gerar retrocessos, pois existe uma tendência que o espaço deixado seja ocupado por maior teor de clínquer Portland.

A normativa atual elenca determinados materiais pelo facto destes já terem seus estudos atestados. O intuito de ampliar os estudos a novos materiais é identificar seus efeitos e eventualmente, se comprovada sua eficácia, inclui-los em futuros normativos, dando-lhes condições de aplicação prática. Dentro deste contexto, o pó de vidro já conta com a recente publicação da norma ASTM C1866/2020 “Standard Specification for Ground-Glass Pozzolan for Use in Concrete”, abrindo caminho para sua aplicação prática.

2.4 Cinzas volantes

2.4.1 Origem e generalidades

As cinzas volantes são um subproduto da queima do carvão pulverizado em centrais termoeletricas. São a parcela não queimada coletada por filtros, mecânicos ou eletrostáticos, que atuam sobre os gases provenientes da combustão (Thomas, 2007).

O carvão é primeiro pulverizado em moinhos antes de serem soprados com ar para a zona de queima da caldeira. Nesta zona o carvão entra em combustão produzindo calor com temperaturas chegando a aproximadamente 1500°C, na qual os minerais inorgânicos não combustíveis (como quartzo, calcita, gesso, pirita, feldspato e minerais de argila) derretem na fornalha e se fundem como minúsculas gotículas derretidas. Essas gotículas são transportadas pelos gases de escape ou de combustão. Uma vez livres da zona de queima, as gotículas esfriam e formam partículas vítreas esféricas, que recebem a denominação de cinzas volantes.

Dependendo do tipo de carvão utilizado na queima, as cinzas volantes podem classificar-se, de acordo com a ASTM C618, em classe F ou classe C. As de classe F são de baixo teor de cálcio e as de classe C têm alto teor de cálcio e, ao contrário das da classe F, apresentam propriedades ligantes per si.

Historicamente, as cinzas volantes têm sido usadas no betão em níveis que variam, em geral, de 15% a 25% em massa, sendo que a quantidade utilizada varia muito dependendo da disponibilidade de cinzas, da aplicação, das propriedades das cinzas volantes, limites de especificação e localização geográfica e clima. Níveis mais altos (30% a 50%) têm sido usados em estruturas maciças (por exemplo, fundações e barragens) para controlar o aumento da temperatura resultante do calor de hidratação. Nas últimas décadas, pesquisas demonstraram que altos níveis de dosagem (40% a 60%) podem ser utilizados em aplicações estruturais, produzindo betão com boas propriedades mecânicas e durabilidade (Marceau, 2002).

As cinzas volantes são utilizadas como SCM, seja reduzindo o teor de clínquer na produção do cimento, ou mesmo reduzindo o uso do cimento na produção do betão, como uma forma de reduzir o custo de produção, mas também propiciando outras vantagens além das econômicas. O material, quando utilizado em conjunto com o cimento Portland, contribui para a melhoria das propriedades do betão endurecido por meio de atividade hidráulica ou pozolânica, ou ambas, além de produzir efeitos em sua durabilidade.

2.4.2 Betões com altos volumes de cinzas volantes (HVFA)

Desenvolvido na década de 80, com objetivo de ser ecológico, durável e eficiente, o betão de alto volume de cinzas volantes (HVFA – *High Volume Fly Ash*) é elaborado com uma composição de 50 a 60% de cinzas, tendo sido relatado estudos com até 70 e 80% de incorporação. A substituição, em geral, vem acompanhada do uso de superplastificante para reduzir a razão A/L, que varia na faixa de 0,25 a 0,40 (Malhotra e Mehta, 2005; Herath, 2020)

Herath *et al.* (2020) publicaram um resumo sobre o uso de altos volumes de CV em betões. Neste estudo os autores apresentam uma tabela com resultados obtidos por diversos autores em ensaios de resistência à compressão para betões HVFA com 50, 60, 70 e 80% de substituição de cimento por CV. Na Figura 4, apresenta-se uma visão geral das máximas resistências obtidas para cada um destes percentuais, com a indicação do respectivo autor do estudo. A tabela 1 apresenta um resumo das dosagens de cimento e CV utilizadas pelos autores e a respectiva relação A/L destes ensaios.

Tabela 1 – Resumo (adaptado) composições betões HVFA x autor (Herath, 2020).

Autor / Ano	Cimento (kg/m³)	CV (kg/m³)	% substituição	A/L
Atis, 2003	200	200	50	0,30
Alaka, 2016	160	240	60	0,34
Yoshitake, 2013	120	280	70	0,28
Huang, 2013	136	544	80	0,24

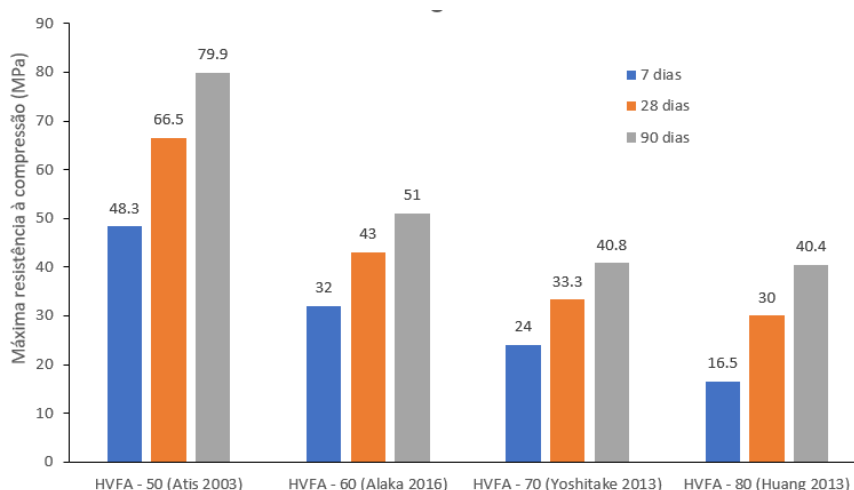


Figura 4 – Máxima resistência à compressão betão HVFA – 50 a 80% de CV (Herath 2020).

Na maioria dos estudos, o aumento da percentagem de substituição do cimento por CV leva a uma diminuição da resistência à compressão, principalmente nas primeiras idades. A reação pozolânica das CV depende principalmente da presença de Al_2O_3 e SiO_2 nas cinzas, o que requer a ativação da Portlandita (Cao *et al.*, 2000). Em idade precoce, o efeito de enchimento das partículas de CV e a sua contribuição para a formação de Etringite é o principal factor na sua contribuição para resistência do betão, enquanto com o passar do tempo as reações de hidratação são fundamentais (Berry *et al.*, 1990).

A alumina (Al_2O_3) presente nas CV reage com o gesso disponível do cimento e forma etringita na hidratação precoce, preenchendo os poros e fissuras da matriz, contribuindo para a densificação do sistema. Por outro lado, a reação de hidratação dos silicatos com o C-H disponível formaria o gel C-S-H que é o principal contribuinte para o subsequente ganho de resistência (Herath *et al.*, 2020).

À medida que ocorre aumento na percentagem de CV no betão (HVFA), o hidróxido de cálcio gerado pela hidratação do cimento torna-se insuficiente para que a reação pozolânica ative todas as CV, o que faz com que algumas partículas de CV não reajam na pasta e resultem em um aumento no tamanho dos poros e na porosidade geral da matriz (Xu *et al.*, 1994).

A elevação no teor de CV resulta em menor retração por secagem em todas as idades, o que em geral é atribuído a um baixo teor de água (ou seja, baixa relação A/L e baixo teor de cimento na mistura de betão (Atis, 2003).

A princípio, devido ao efeito de enchimento das CV, o que gera uma matriz mais densa, e devido ao refinamento dos poros produzido pelas reações pozolânicas esperava-se que o betão HVFA tivesse uma baixa porosidade (Siddique, 2008). Entretanto, os estudos relataram que houve aumento na porosidade do betão com o aumento da percentagem de CV. Isto pode ser causado pelas partículas de CV que não reagiram devido à redução do hidróxido de cálcio.

Quanto a permeabilidade aos íões cloreto, o betão HVFA apresentou-se melhor. Há um aumento na quantidade de C_3A devido à presença de alumina na mistura, bem como do C-S-H formado pela reação pozolânica. Assim, a capacidade de ligação de cloreto é alta no betão HVFA, o que minimiza os cloretos livres disponíveis para iniciar a corrosão (Dinakar *et al.*, 2008).

Sujjavanich *et al.* (2005) relataram uma redução de 88,6% na carga passada entre os betões com 50% de CV quando comparados ao betão sem adições, aos 28 dias com uma relação A/L de 0,4. Para betão com 65% de CV esta redução foi de 92,7%.

O betão HVFA apresenta desempenho adverso frente à carbonatação. Isto poderia estar possivelmente relacionado à descalcificação do gel CSH devido à exposição ao CO₂ (Morandea *et al.*, 2014).

Atis (2003) realizou um ensaio de carbonatação acelerada utilizando 5% de CO₂ em betões com 50 e 70% de CV. O betão com 70% apresentou profundidade de carbonatação de 13,80, 11,70, 7,30 e 5,00 mm aos 3, 7, 28 dias e 3 meses, o que representava valores 51,6%, 58,1%, 62,2% e 51,5% superiores ao betão sem adições.

O uso de grandes volumes de CV no betão pode implicar em algumas condicionantes como por exemplo a demora na presa inicial e a corrosão de armaduras devido a carbonatação (Herald, 2020). Deste modo, torna-se necessário adotar um maior controle tecnológico e implementar algumas ações para mitigar estes efeitos. Dentre elas pode-se citar: reduzir o tamanho das partículas das CV, utilizar acelerador de presa para garantir a descofragem em tempos razoáveis ou mesmo incluindo nas composições outras adições (ex: cal hidratada) para reduzir a carbonatação. Estas e outras ações têm viabilizado o uso de altos percentuais de CV em betões, com relatos de usos eficazes de até 70%, (Reis, 2022).

2.4.3 Usos e efeitos das cinzas volantes

As propriedades pozolânicas que as CV têm tornam este resíduo num ótimo substituto do cimento Portland na produção de betão, reduzindo o calor de hidratação e, dessa forma, reduzindo o risco de fissuras durante a fase inicial.

A incorporação de cinzas volantes no betão tornou-se fundamental para melhorar a durabilidade das estruturas de betão armado sob determinadas ações ambientais, nomeadamente em ambientes com cloretos, que degradam as armaduras, ou com compostos químicos que atacam o betão (Camões, 2002; Malheiro, 2018).

Quantidades de 30 a 50% de CV podem ser utilizadas na construção de grandes estruturas, para controlar a libertação de calor, garantindo boas propriedades mecânicas no betão (Thomas, 2007).

2.4.3.1 Efeitos no estado fresco

O uso de cinzas volantes de boa qualidade com alta finura e baixo teor de carbono reduz a demanda hídrica do betão e, consequentemente, o uso de cinzas volantes deve permitir que o betão seja produzido com menor teor de água quando comparado a um betão de cimento Portland com a mesma trabalhabilidade. Embora a quantidade exata de redução de água varie amplamente com a natureza das cinzas volantes e outros parâmetros da mistura, uma aproximação genérica é que cada 10% de cinzas volantes deve permitir uma redução de água de pelo menos 3% (Thomas, 2007).

O betão com cinzas volantes flui e se consolida melhor do que um betão de cimento Portland convencional quando vibrado. O uso de cinzas volantes também melhora a coesão e reduz a segregação do betão. A forma esférica das partículas lubrifica a mistura facilitando o bombeamento e reduzindo o desgaste do equipamento (Best, 1978).

O impacto das CV na presa do betão depende não só da composição e quantidade utilizadas de CV, mas também de vários outros factores como tipo e quantidade de cimento, razão de água e temperatura do betão. Cinzas volantes de baixo teor de cálcio estendem tanto o tempo inicial como o final para a presa do betão. Durante o tempo quente, a quantidade de retardamento tende a ser pequena e é provável inclusive que isto seja um benefício. Durante o tempo frio, a utilização de cinzas volantes, especialmente em níveis elevados de substituição, pode levar a atrasos muito significativos. Estes atrasos podem resultar em dificuldades de colocação, especialmente no que diz respeito ao processo de acabamento das lajes e pavimentos. Considerações práticas podem exigir a limitação da incorporação de CV, especialmente durante períodos frios.

O uso de CV permite a redução da taxa do calor produzido e, conseqüentemente, do calor interno, o que torna seu uso bastante interessante em obras com grandes volumes concentrados de betonagem, como nas barragens. A maioria dos trabalhos publicados sobre os efeitos das cinzas volantes na taxa de desenvolvimento e aumento da temperatura no betão têm-se centrado em CV de classe F de baixo teor de cálcio. (Dunstan, 1984) indicou que a taxa de desenvolvimento do calor em geral aumenta com o teor de cálcio das cinzas.

2.4.3.2 Efeitos no estado endurecido

As cinzas volantes produzem vários efeitos nas propriedades do betão endurecido, principalmente quanto a sua resistência mecânica e a durabilidade. Os efeitos fundamentais estão relacionados a interação física (filler) e química (pozolânica). O efeito filler é caracterizado pelo preenchimento dos vazios entre os grãos de cimento, por partículas de cinzas volantes, garantindo maior compacidade e densidade da pasta. O efeito pozolânico é devido à presença de compostos siliciosos ou sílico-aluminosos que por si só apresentam pouco ou nenhum valor aglomerante, mas que, na presença de água, interagem quimicamente com o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento, formando compostos com propriedades aglomerantes.

Thomas (2007) relata que à medida que o nível de substituição aumenta, a resistência nas primeiras idades diminui. No entanto, o desenvolvimento de resistência a longo prazo é melhorado quando se usa

CV, desenvolvendo-se de forma mais pronunciada ao longo do tempo, para níveis de substituição de até 50%.

A taxa de desenvolvimento de resistência inicial é fortemente influenciada pela temperatura, e este é especialmente o caso do betão de CV, pois a reação pozolânica é mais sensível à temperatura do que a hidratação do cimento Portland. A incorporação de CV, em geral, diminui a exigência de água, permite reduzir a relação água/ligante (A/L) e, conseqüentemente, potenciar a capacidade resistente (Thomas, 2007).

Se forem necessárias resistências relativamente altas em idades muito precoces, geralmente será necessário limitar a quantidade de CV usada, ou então será requerido adotar meios para acelerar a contribuição de resistência inicial do betão com CV, recorrendo, por exemplo, a cura térmica ou aceleradores, especialmente quando o betão é colocado em baixas temperaturas.

As relações entre a resistência à tração, resistência à flexão e o módulo de elasticidade e a resistência à compressão do betão não são significativamente afetados pela presença de CV quando em baixos ou moderados níveis de substituição. (Malhotra, 2005) indica que a resistência à flexão e tração a longo prazo do betão HVFA (*high volume fly ash concrete*, na literatura inglesa) pode ser muito melhorado devido à contínua reação pozolânica fortalecendo a ligação entre a pasta e o agregado. Sugere ainda que o módulo de elasticidade do betão HVFA pode ser aumentado devido à presença de quantidades significativas de partículas de CV que não reagiram e atuam como agregado miúdo e por causa da porosidade muito baixa da zona interfacial.

As cinzas volantes reduzem a permeabilidade do betão à água e ao gás, desde que o betão seja adequadamente curado (Thomas 2007).

A reação álcalis-sílica é minimizada através da inclusão de CV, que reage consumindo os álcalis disponíveis na pasta de cimento, podendo reduzir a expansão para níveis não destrutivos.

A resistência à ação dos surfactos é aumentada devido às CV. As cinzas volantes da classe F consomem o excesso de hidróxido de cálcio, impedindo sua reação com os sulfatos, diminuem a permeabilidade do betão e a possibilidade de ingresso dos sulfatos, protegendo o betão. Ao reduzir a permeabilidade à água e a difusibilidade iônica do sistema, contribuem, também, para o aumento da resistência à carbonatação.

2.4.4 Indisponibilidade das cinzas volantes

A produção anual mundial de produtos da queima do carvão em centrais termoelétricas é estimada em 700 milhões toneladas, das quais pelo menos 70 % são cinzas volantes, ou seja, cinzas finas de carvão,

adequadas para utilização como uma pozolana em sistemas cimentícios. Aproximadamente 80% das cinzas de carvão produzidas atualmente acabam em aplicações de baixo valor (aterros ou bases de estradas), ou são simplesmente eliminados ou acumuladas em montes de rejeitos (Thomas, 2007).

A disponibilidade deste material é incerta no futuro, devido a tendência de eliminação dos processos de queima de carvão cujo objetivo é a descarbonização, algo que já é uma realidade no cenário de Portugal.

A introdução deste material na matriz cimentícia tem como principal objetivo a redução do custo produtivo, porém esta ação tem contribuído consideravelmente na diminuição das emissões de CO₂, na economia de energia obtida na fabricação do cimento, além dos inúmeros benefícios obtidos quanto a resistência e principalmente durabilidade do betão. Neste ponto, pode-se afirmar que a incorporação de cinzas volantes no betão tornou-se fundamental para melhorar a durabilidade das estruturas de betão armado sob determinadas ações ambientais, nomeadamente em ambientes com cloretos (Camões, 2002, Malheiro, 2018).

Portanto, a perda deste insumo pode significar um enorme retrocesso, não só em relação a questões ambientais como também em nível qualitativo dos betões. Torna-se, portanto, muito importante encontrar substitutos capazes de suprir esta lacuna. Alguns estudos têm sido feitos para encontrar um material que cumpra este objetivo, como por exemplo com as argilas calcinadas. O projeto GlassCon da Universidade do Minho é outro exemplo de um projeto desenvolvido com este objetivo, sendo neste caso avaliado o uso do pó de vidro para este fim.

Em Portugal a especificação E 464 do LNEC estabelece os critérios da utilização das cinzas volantes, como adição do betão. Esta especificação permite combinar as cinzas volantes com um cimento tipo CEM I ou CEM II/A, da classe 42,5 ou superior para constituir o ligante. A possibilidade de usar este material em misturas cimentícias, permitiu reduzir o teor de cimento em algumas aplicações específicas de betões, sujeitos a classes de exposição ambiental provenientes de meios agressivos, e uma eventual indisponibilidade deste material seria especialmente danosa, principalmente afetando a durabilidade de estruturas sujeitas ao ataque por cloretos.

2.5 Resíduo de embalagens de vidro – pó de vidro

2.5.1 Fabricação do vidro

Pode-se definir o vidro como um produto inorgânico, homogêneo e inerte resultante da fusão, a aproximadamente 1600°C, das suas matérias-primas. Os principais componentes utilizados no processo de fabricação de embalagens de vidro são a areia (sílica), o óxido de cálcio (cal), carbonato de sódio, vitrificantes, fundentes, estabilizadores, casco, e outros componentes secundários que têm funções bem definidas no processo de formação do vidro. Por casco entende-se todo o tipo de vidro, reciclado, procedente de embalagens que tenham terminado a sua vida útil. Se forem não-retornáveis, depois da utilização das mesmas, são depositadas nos ecopontos verdes para que se proceda à sua reciclagem. Após o vidro ser triturado e tratado passa a ser casco e a poder ser reincorporado nas linhas de produção. A percentagem de casco usada, varia consoante o fabricante. Normalmente usa-se entre 25 e 30%, mas em geral, existe tendência para aumentar, sendo objetivo de muitos fabricantes atingir os 50%.

A receita, ou dosagem, do vidro é feita com o objetivo de dar o aspeto e cor final desejado ao produto. As cores mais comuns são verde, azul, translúcido e âmbar. A coloração é obtida através da inclusão de alguns minerais ou metais, em pequenas dosagens. No caso do vidro verde, vidro utilizado nesta pesquisa, a cor está relacionada com a composição química genérica indicada na Tabela 3.

2.5.2 Impactos do vidro

Em tempos modernos, o processo de fabrico do vidro vem sofrendo avanços tecnológicos, otimizando sua qualidade, a capacidade produtiva, a redução de consumos energéticos e implementando métodos para permitir a reciclagem da matéria-prima. Estes processos permitiram uma elevação da produção e consumo do vidro, permitindo seu uso para diversas finalidades.

Ao introduzir o vidro como embalagem surgiu como consequência uma enorme produção de resíduos, que sem o devido tratamento tem-se tornado um problema de gestão para aterros na grandes cidades, devido ao facto do material não ser biodegradável.

Se por um lado isto é maléfico, por outro pode-se entender que, se devidamente cuidado, pode-se tornar um grande benefício, visto que o vidro é 100% reciclável. Ou seja, seu ciclo de vida é praticamente infinito. Basta haver critério para sua separação e processamento que o resíduo pode ser plenamente reaproveitado como insumo, inclusive na produção do próprio vidro. Hoje em dia, as pessoas prestam mais atenção à coleta seletiva de resíduos urbanos, porém ainda não distinguem os diferentes tipos de vidro, e isto pode-se tornar um dificultador do processo.

Mais de 23,4 milhões de toneladas, ou 83,3 mil milhões de garrafas e frascos, foram produzidos para os mercados europeu e mundial em 2021 (FEVE, 2022) – Figura 5.

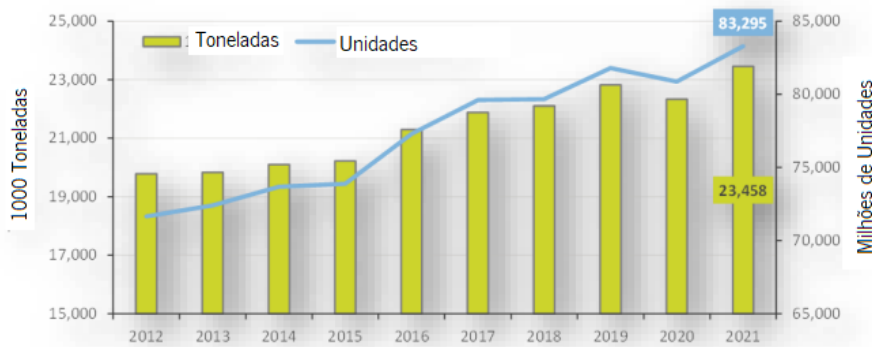


Figura 5 - Evolução da produção anual de vidro europeia (FEVE, 2022).

Espera-se que a produção total de vidro continue a aumentar devido ao aumento da industrialização e a crescente substituição de embalagens plásticas por vidro.

O total de resíduos de vidro (todos tipos) da UE em 2020 foi de 17.830.000 toneladas (Eurostat, 2022). Em Portugal, no ano de 2021 foram contabilizadas 410.243 toneladas de resíduos oriundos de embalagens de vidro, sendo que 205.157 toneladas foram encaminhadas a reciclagem, o que representa algo em torno de 50%. Cumpre ressaltar que a diretiva europeia estabelece como meta para 2030 um percentual de 70%. Portanto ainda estamos distantes da meta (APA, 2022).

Apesar de grande parcela do vidro ser reciclado na produção do próprio vidro, quando os resíduos de vidro não são, ou deixam de ser adequados para reciclagem, o material pode ser moído e utilizado para outros fins, e é aí que ele se torna interessante para a indústria da construção, pois pode viabilizar a lacuna deixada pelas cinzas volantes, além de também contribuir para a atingir a meta da diretiva europeia citada anteriormente.

A produção de uma tonelada de vidro para embalagens consome em torno de 1,2 toneladas de matérias primas. Além disso, a indústria do vidro é considerada grande consumidora de energia, devido à alta temperatura dos fornos onde se faz a fusão dos insumos. Estima-se que a produção de uma tonelada de vidro consuma 7,8 GJ de energia, na Europa, o que é cerca de 13 a 17% do consumo total de energia industrial da região. Por outro lado, o uso intensivo de energia é responsável pela emissão de CO₂ e outros gases de efeito estufa, estimando-se que a cada tonelada de vidro produzida seja emitida 0,57 tonelada de CO₂. Verificou-se ainda que o aumento do uso do casco em 10%, adicionado às matérias primas, reduzia o consumo de energia em 2 a 3% (Schmitz, 2010).

2.5.3 Tipos e caracterização do vidro

Existem diversas formas de vidro em produção, dependendo de sua composição química e dos aditivos utilizados, tais como:

- sílica vítrea;
- silicatos alcalinos;
- vidros sodo-cálcicos (recipientes, lâmpadas e utensílios de forno temperados);
- vidros de borossilicato (aparelhos químicos, vedação farmacêutica e de tungstênio);
- vidros de chumbo (funil de TV em cores, tubos de néon e peças eletrônicas);
- vidros de bário (painel de TV em cores) e;
- vidros de aluminossilicato (tubos de combustão, fibra de vidro e substratos de resistência).

A composição dos diferentes tipos de vidro é praticamente a mesma, no entanto pequenas quantidades de aditivos são frequentemente adicionadas na sua produção para obter cores diferentes ou para melhorar propriedades específicas. Os recipientes, em geral, são vidros sodo-cálcicos. Os resíduos de vidro são majoritariamente do tipo sodo-cálcico (80% em peso). Em termos de cor, 63% são incolores, 25% são âmbar, 10% são de cor verde e 2% são azuis ou de outras cores (*Shi & Zheng, 2007*).

Os vidros sodo-cálcicos, tipicamente usados como embalagem, são compostos por: 66-75% de SiO_2 , 12-17% de Na_2O e 6-12% de CaO (*Shi & Zheng, 2007*).

O vidro é rico em SiO_2 (70%), o que o torna favorável a reações pozolânicas, porém os elevados teores de óxido de sódio (Na_2O) e de óxido de cálcio (CaO), suscitam preocupações devido ao elevado teor de álcalis, conforme será avaliado adiante.

Quanto a densidade, não há muita diferença no vidro, independentemente da cor correspondente e dos diferentes tamanhos de partículas. Já em relação à superfície específica, à medida que o tamanho da partícula reduz, o valor aumenta, Tabela 2.

Tabela 2 – Densidade e superfície específica dos vidros por cor (Oliveira, 2012).

Material	Massa volúmica (kg/m^3)	Superfície específica de Blaine (m^2/kg)		
		0-45(μm)	45-75(μm)	75-150(μm)
Vidro âmbar	2509	354	247	146
Vidro verde	2525	443	292	196
Vidro plano	2532	-	-	182

A composição química apresenta variações significativas de acordo com o seu tipo de aplicação (Tabela 3). Os vidros usados em recipientes (sodo-cálcicos) não divergem tanto entre si, porém à medida que muda o tipo de vidro sua composição passa a incluir alguns metais que podem vir a ser danosos ao betão ou ao ambiente, como no caso do chumbo.

Tabela 3 - Composição química do vidro por tipo (McLellan, 1984).

Tipo de vidro e aplicações	Elementos químicos									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	BaO	PbO	Outros
Vidros sodo-cálcicos										
Recipientes	66-75	0,7-7	-	12-16	0,1-3	0,1-5	6-12	-	-	-
Vidro Plano	73-74	-	-	13,5-15	0,2	3,6-3,8	8,7-8,9	-	-	-
Laminados	71-73	0,5-1,5	-	12-15	-	1,5-3,5	8-10	-	-	-
Lâmpadas elétricas	73	1	-	17	-	4	5	-	-	-
Vidros temperados	75	1,5	-	14	-	-	9,5	-	-	-
Vidro Borossilicatos										
Vidro p/ químicos	81	2	13	4	-	-	-	-	-	-
Farmaceuticos	72	6	11	7	1	-	-	-	-	-
Selagem de Tungstênio	74	1	15	4	-	-	-	-	-	-
Vidro de chumbo										
Funil de TV a cores	54	2	-	4	9	-	-	-	23	-
Tubagem de neon	63	1	-	8	6	-	-	-	22	-
Peças eletrônicas	56	2	-	4	9	-	-	-	29	-
Peças ótica densa	32		-	1	2	-	-	-	65	-
Vidro de Carbonato de Bário										
Painel de TV à cores	65	2		7	9	2	2	2	2	10%SrO
Ótica densa de Bário	36	4	10						41	9%ZnO
Vidro de Silicato de Alumínio										
Tubos de combustão	62	17	5	1	-	7	8	-	-	-
Fibra de Vidro	64,5	24,5	-	0,5	-	10,5	-	-	-	-
Substrato resistores	57	16	4	-	-	7	10	6	-	-

As partículas do cimento e as de resíduo de vidro consistem em estruturas irregulares com arestas afiadas como observamos na Figura 6. Em comparação com as partículas de cimento (6a), as partículas de resíduos de vidro (6b) contém superfícies mais suaves, arestas prismáticas e mais afiadas (Jiang *et al*, 2022).

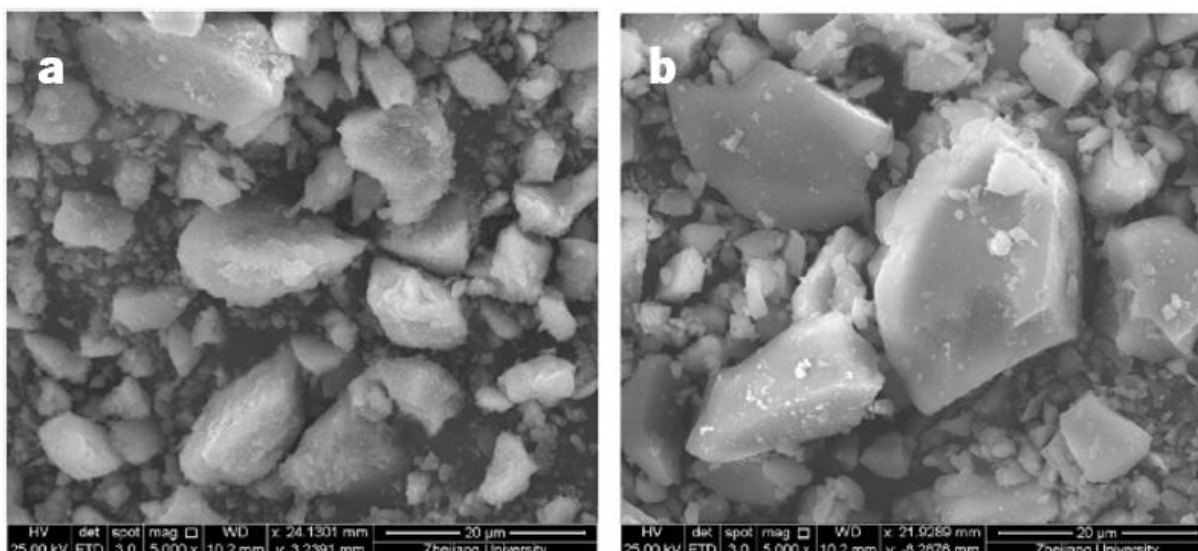


Figura 6 - Morfologia por microscopia MEV, a) do cimento e b) do vidro (Jiang et al, 2022).

A recente norma ASTM C1866 abrange as pozolanas oriundas da reciclagem de vidro para uso em betão e define alguns requisitos químicos (Tabela 4) e físicos (Tabela 5) para uso do material na produção de betão. A norma classifica os vidros em duas classes: tipo GS (resíduos de vidros planos e de recipiente) e GE (resíduos de fibra de vidro).

Tabela 4 – Requisitos químicos para pozolanas de vidro (ASTM C1866)

Requisito	Classificação	
	Tipo GS	Tipo GE
SiO ₂ (% mínimo)	60,0	55,0
Al ₂ O ₃ (% máximo)	5,0	15,0
Fe ₂ O ₃ (% máximo)	1,0	1,0
SO ₃ (% máximo)	1,0	1,0
Na ₂ O _{eq} (% máximo)	15,0	4,0
Teor de humidade (% máximo)	0,5	0,5
Perda ao fogo (% máximo)	0,5	0,5

Tabela 5 – Requisitos físicos para pozolanas de vidro (ASTM C1866)

Requisito	Classificação	
	Tipo GS	Tipo GE
Finura – máximo retido na peneiração húmida aos #45µm	5,0	5,0
Índice de atividade aos 7 dias – (% mínimo)	75,0	75,0
Índice de atividade aos 28 dias – (% mínimo)	85,0	85,0

2.5.4 Uso e condicionantes para uso do vidro em betão

O vidro reciclado derivado de recipientes tem sido utilizado tanto como agregado miúdo em betão, quanto como SCM, devido à sua natureza amorfa e alto teor de sílica. A literatura existente contém muitos estudos em relação ao uso como agregado e como SCM, porém a grande maioria aprofundou os estudos em incorporações entre 5 e 30%. Estudos com foco em grandes incorporações ainda são escassos carecendo de uma maior base de dados para que algumas dúvidas sejam plenamente saneadas. As principais pesquisas têm utilizado o vidro sodo-cálcico por este já ter apresentado alguns resultados positivos e por ser muito disponível, além de ter um impacto elevado em aterros (Aliabdo 2016, Deepa 2022, Patel 2019, Du 2017). O uso de resíduos de vidro na produção de betão pode ajudar a conservar os recursos naturais, economizar energia e dinheiro, e reduzir a emissão de CO₂.

Apesar de estudos terem demonstrado resultados promissores, é preciso ter em conta algumas condicionantes importantes, já conhecidas pela ciência. Quando o vidro residual é moído até partículas de tamanho micro, espera-se que ele sofra reações pozolânicas com o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento, formando silicato de cálcio hidratado secundário (C-S-H). A dimensão do vidro é um ponto chave para o seu uso como substituto ao cimento, pois de acordo com Matos *et al.* (2012) a conclusão aceita é que abaixo de uma determinada dimensão (cerca de 75µm), não ocorre a reação álcalis-silica (RAS) e quando as partículas são mais grosseiras, tornam-se nocivas. Segundo Taha e Noumu (2008), a explicação reside no facto de que o consumo de álcalis para formar gel de silicatos de cálcio hidratados, durante a reação pozolânica, ocorre mais cedo do que a RAS, não restando álcalis disponíveis para desencadear esta ação danosa, conforme pode-se ver na Figura 7.

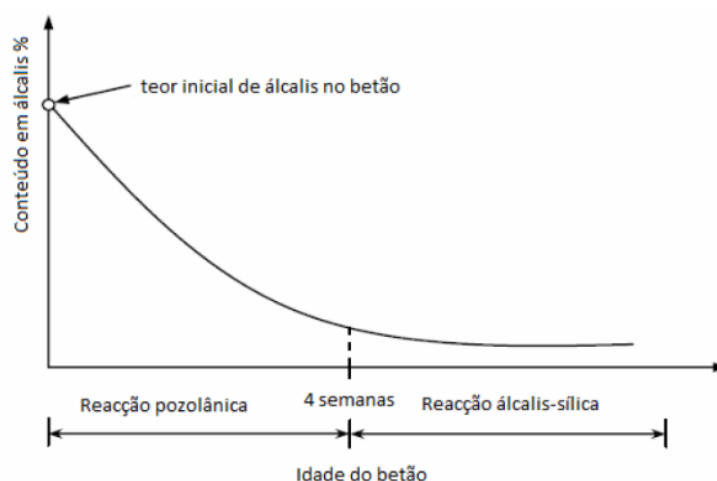


Figura 7 - Curva teor de álcalis do betão ao longo do tempo (Taha e Noumu, 2008).

2.5.4.1 Efeitos no betão fresco

A trabalhabilidade e a consistência são importantes propriedades dos materiais cimentícios. A demanda de água e a trabalhabilidade dependem em grande parte da área superficial específica dos componentes da mistura. A substituição do cimento por um material mais fino pode contribuir para o aumento do consumo de água. No entanto, o aumento da área superficial específica nem sempre leva ao aumento do consumo de água. A adição de cinzas volantes à mistura de material cimentício pode reduzir a necessidade de água para a mesma trabalhabilidade, o que está relacionado ao formato esférico dos grãos das cinzas volantes (Neville, 1995). A forma esférica e a superfície lisa dos grãos das cinzas volantes produzem o efeito "rolamento de esferas".

O pó de vidro finamente moído apresenta um comportamento semelhante. A redução na exigência de água com a substituição do cimento por resíduo de vidro pode ser atribuída à morfologia dos grãos de vidro com superfícies pouco lisas e impermeáveis (Patel, 2019).

Jiang (2020) apresentou a influência do pó de vidro na trabalhabilidade. Os trabalhos científicos realizados com as adições de resíduos de vidro, com dimensões reduzidas dos grãos, nas argamassas de cimento mostraram que o resíduo de vidro contribuiu para um aumento da trabalhabilidade, mas em contrapartida obteve um tempo mais prolongado no endurecimento da mistura. Este resultado indica que menos água foi necessária durante a reação de hidratação após a adição do pó de vidro. Este facto pode ser atribuído à superfície lisa do grão.

Aliabdo *et al.* (2016) demonstram que a cada 5%, aproximadamente, da substituição do cimento por pó de vidro diminui a necessidade de água em 0,4%. Este comportamento pode ser devido à superfície lisa dos grãos de pó de vidro ou devido às partículas de pó de vidro serem mais grossas (75 μ m) do que as partículas de cimento (cerca de 21 μ m).

Deepa Paul *et al.* (2022) avaliaram a trabalhabilidade do betão fresco contendo pó de vidro. Um aumento no abatimento foi observado com o aumento do teor de pó de vidro, conforme pode-se ver na Figura 8. Esse aumento da trabalhabilidade pode ser devido à superfície antiaderente do pó de vidro. Os pós de vidro utilizados demonstraram possuir baixa afinidade com a água, deixando esta mais disponível na mistura de betão. Além disso, a hidratação lenta dos pós de vidro também aumentou os valores de abatimento. Houve, portanto, melhoria na trabalhabilidade do betão ao inserir pó de vidro na mistura.

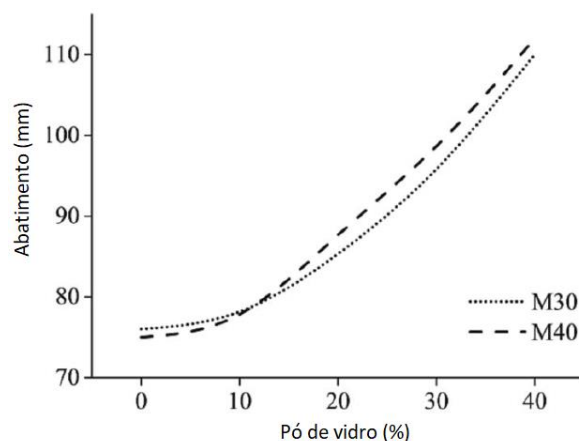


Figura 8 – Efeito da inclusão do pó de vidro no abatimento (Deepa Paul et al. 2022).

2.5.4.2 Resistência mecânica e atividade pozzolânica

Shao *et al.* (2000) mediram a resistência mecânica de vidro sodo-cálcico como adição (30% em volume), para três pós de vidro distintos. Ensaios de resistência à compressão foram realizados para estudar o desenvolvimento da resistência do betão contendo o vidro em idades precoce e tardia:

- Vidro 150 μm : passadas no peneiro n° 100 (150 μm) e retidas no n° 200 (75 μm);
- Vidro 75 μm : passadas no peneiro n° 200 (75 μm) e retidas no n° 400 (38 μm);
- Vidro 38 μm : passadas no peneiro n° 400 (38 μm).

Os resultados (Figura 9) indicaram que a mistura contendo vidro 38 μm foi a que melhor desempenho teve, chegando a ultrapassar a referência aos 90 dias. Ficou evidenciado, também, que o vidro demonstra evoluir sua resistência em idades tardias, indicando um comportamento pozzolânico mais lento.

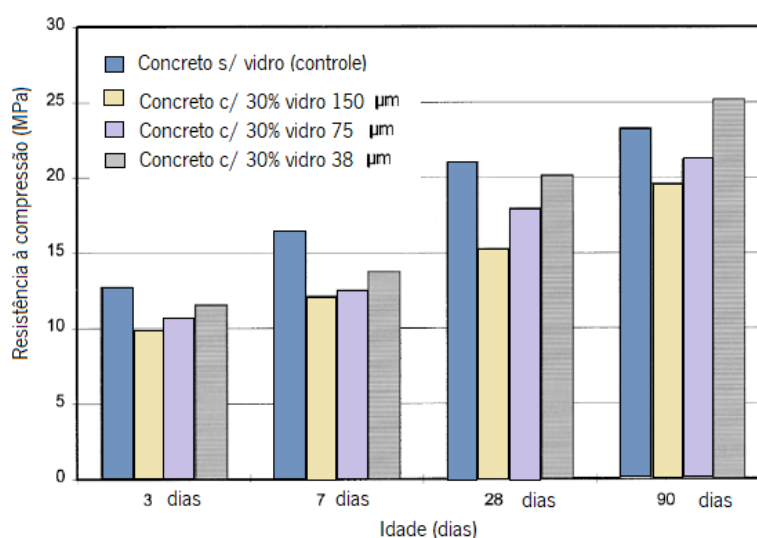


Figura 9 - Resistência x idade e granulometria do betão com 30% de vidro (Shao et al. 2000).

Aliabdo *et al.* (2016) optaram por realizar uma série de estudos utilizando pó de vidro proveniente da moagem de embalagens. Foram produzidos vários tipos de betões usando o pó de vidro quer como substituto de cimento quer como adição. A Tabela 6, abaixo, indica as composições usadas para a produção de betão, onde o vidro foi usado em substituição ao cimento.

Tabela 6 – Composição das misturas utilizadas por Aliabdo et al. (2016).

Mistura	Proporções de misturas de betão						
	Cimento (kg/m³)	Pó de vidro (%)	Pó de vidro (kg/m³)	Água (kg/m³)	Razão A/L	Areia (kg/m³)	Brita (kg/m³)
1	350,0	0	0	175,0	0,50	723,0	1084,0
2	332,5	5	17,5	175,0	0,50	721,0	1082,0
3	315,0	10	35,0	175,0	0,50	720,0	1080,0
4	298,0	15	52,0	175,0	0,50	718,0	1078,0
5	280,0	20	70,0	175,0	0,50	717,0	1076,0
6	262,5	25	87,5	175,0	0,50	716,0	1074,0

Os ensaios realizados aos 7, 28 e 56 dias demonstram que a resistência à compressão aumenta até uma certa dosagem de substituição, tornando-se menor para maiores percentuais de substituição. A partir da análise da Figura 10, fica claro que o uso de 5,0% do pó de vidro, como a substituição do cimento, melhora ligeiramente a resistência à compressão. Este comportamento é o mesmo em diferentes idades de teste. Além disso, o uso de percentual do pó de vidro superior a 10% provocou um efeito negativo na resistência à compressão do betão. Isso pode ser devido ao menor teor de cimento Portland em níveis mais altos de substituição.

Importante notar que mesmo havendo redução nas resistências à medida que se elevou os percentuais de substituição, ainda assim, o maior teor de substituição (25%) atinge 25 MPa já aos 7 dias, o que já é bastante relevante e permite diversas aplicações como mostrado na Figura 1.

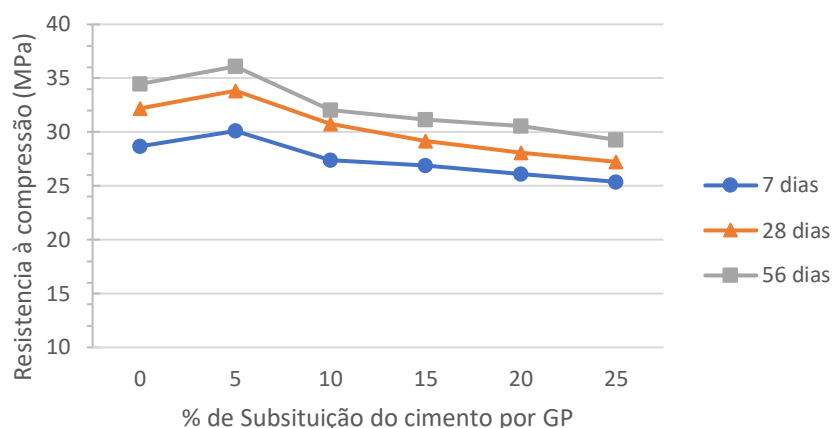


Figura 10 - Efeito da adição do vidro no betão (Aliabdo et al., 2016).

Deepa Paul *et al.* (2022) avaliaram a resistência à compressão para amostras de betão curadas entre 7 e 90 dias. Um aumento mais pronunciado na resistência à compressão foi observado para o betão com 30% de substituição de cimento pelo pó de vidro, em condições normais de cura, imerso em água. Conseguiram obter resistência à compressão (média de 3 ensaios) de 50,22, 48,59, 49,93, 52,74 e 48,15 MPa aos 28 dias de idade para betão com 0, 10, 20, 30 e 40 % de pó de vidro como substituto do cimento, respectivamente. Esses resultados podem ser atribuídos à formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional da reação pozolânica do PV. O gel C-S-H fornece uma forte zona de transição de interface em amostras de betão PV e aumenta a resistência mecânica.

Du *et al.* (2017) afirmam que as vantagens do betão, com alto volume de pó de vidro, podem ser observadas no histórico de desenvolvimento da resistência à compressão, até um ano de idade. Enquanto o betão de controle apresentou resistência superior, aos 7 dias, em relação ao betão com 60% de incorporação de pó de vidro, aos 365 dias ocorreu o contrário. Aos 7 dias o betão com 60% de pó de vidro, que obteve apenas 65% da resistência da mistura de betão simples, porém superou a mistura de referência em 12% aos 365 dias. Devido à reação pozolânica lenta do pó de vidro, a substituição do cimento reduziu a resistência em idades mais jovens. Com o aumento do tempo de cura, a sílica amorfa no pó de vidro se dissolveu lentamente no ambiente alcalino e reagiu com Ca^{2+} para formar géis C-S-H. Com esse processo, a porosidade do betão diminuiu e a resistência aumentou. Uma microestrutura mais compacta da matriz de pasta, especialmente na Zona de Transição Interfacial (ITZ), contribuiu para o aumento da resistência mecânica.

A Tabela 7 apresenta um panorama geral das resistências mecânicas obtidas por alguns autores, com a indicação de características relevantes das misturas utilizadas por eles em seus ensaios. Alguns valores

de resistência foram extraídos de forma gráfica, portanto, podem apresentar ligeiras distorções, mas que não comprometem a compreensão acerca do tema.

Tabela 7 – Resumo com especificações gerais e resistências obtidas por alguns autores.

Tamanho média da Partícula de vidro	% de Substituição	Dosagem de Ligante (kg/m³)	A/L	Resistência à Compressão da Referência	Resistência à compressão com PV	Autor
12 µm	10%, 20%, 30%, 40% e 50%	807 Cimento 225 SF	0,19	179 MPa aos 90 dias	198 MPa p/ 10% PV 201 MPa / 20% PV 195 MPa p/ 30% PV 190 MPa p/40% PV 184 MPa p/ 50 PV	Soliman <i>et al.</i> (2016)
<cimento	10%, 20% e 30%	470 Cimento	0,38	65 MPa aos 90 dias	66 MPa p/ 10% PV 69 MPa p/ 20% PV 58 MPa p/ 30% PV	Zhi-hai <i>et al.</i> (2019)
<75 µm	10%, 20% e 30%	300 Cimento	0,72	27 MPa aos 90 dias	28 MPa p/ 10% PV 29 MPa p/ 20% PV 23 MPa p/ 30% PV	Elaqra <i>et al.</i> (2019)
0–100 (40% PV < 10 µm)	15%, 30%, 45% e 60%	380 Cimento	0,49	49 MPa aos 365 dias	63 MPa p/ 15% PV 61 MPa p/ 30% PV 58 MPa p/ 45% PV 54 MPa p/ 60% PV	H. Du & Tan (2017)
<10 µm	20% e 30%	380 Cimento	0,49	64 MPa aos 90 dias	53 MPa p/ 20% PV 51 MPa p/ 30% PV	A.Shayan, A.Xu, (2004)
<75 µm	5%, 10%, 15%, 20% e 25%	350 cimento	0,50	34,5 MPa aos 56 dias	36,0 MPa p/ 5% PV 32,0 MPa p/ 10% PV 31,1 MPa p/ 15% PV 30,6 MPa p/ 20% PV 29,3 MPa p/ 25% PV	Aliabdo <i>et al.</i> (2016)
<150 µm	15%, 30% e 50%	600 Cimento	0,35	45 MPa aos 90 dias	39,0 MPa p/ 15% PV 28,0 MPa p/ 30% PV 17,0 MPa p/ 50% PV	Z. Kalakada <i>et al.</i> (2022)
<8,4 µm	5%, 10%, 15% e 20%	320 Cimento	0,50	42 MPa aos 90 dias	46,0 MPa p/ 5% PV 49,0 MPa p/ 10% PV 50,0 MPa p/ 15% PV 53,0 MPa p/ 20% PV	M.Kamali <i>et al.</i> (2015)
11,6 µm	10%, 20% e 30%	336 Cimento	0,53	43,22 MPa aos 56 dias	41,5 MPa p/ 10% PV 35,4 MPa p/ 20% PV 27,7 MPa p/ 30% PV	N. Tamanna and R. Tuladhar (2020)
7,8 µm ou 31,57 µm	10%, 20%, 30% e 40%	368,8 Cimento	0,40	50,22 MPa aos 28 dias	48.6 MPa p/ 10% PV 49.9 MPa p/ 20% PV 52.7 MPa p/ 30% PV 48.1 MPa p/ 40% PV	Deepa Paul <i>et al.</i> (2022)

Aliabdo *et al.* (2016) estudaram também os efeitos pozolânicos do pó de vidro. Primeiramente, ao confrontar os requisitos da especificação ASTM C618, constante da Tabela 8, pode-se notar que o pó de vidro apresentou índice de atividade mecânico, nas idades de 7 e 28 dias, de 83,38% e 87,12% respectivamente e, além disto, os requisitos físicos e químicos também foram cumpridos. Para

demonstrar os efeitos pozolânicos do pó de vidro, os autores apresentaram os resultados do conteúdo de hidróxido de cálcio da mistura endurecida (aos 28 dias), Figura 11. Nela fica claro que a substituição do cimento em pó de vidro diminui a quantidade de hidróxido de cálcio da mistura endurecida. Esta tendência pode ser devido à redução no teor de cimento e pode ser devido ao efeito pozolânico do pó de vidro (reação entre o óxido de silício e o hidróxido de cálcio). Pela análise dos resultados dos testes, houve confirmação que os dois mecanismos ocorreram, pois a redução na porcentagem de hidróxido de cálcio foi de 12,0%, sendo que houve uma substituição de apenas 10% de cimento. Esse comportamento também é observado na substituição de cimento em pó de vidro de 15,0%, onde a porcentagem de redução em hidróxido de cálcio é de cerca de 21,0%.

Tabela 8 - Características do vidro vs. requisitos ASTM C618 (Aliabdo et al., 2016).

Componente	Percentual no Pó de Vidro Usado	Limites (%) por		
		N	F	C
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (mínimo %)	74,31	70	70	50
SO_3 (máximo %)	0,16	4	5	5
Perda ao fogo (máximo %)	0,82	10	6	6
pH	11,30	-	-	-
Teor de umidade (máximo %)	2,00	3	3	3
Quantidade retida quando peneirada a úmido na peneira $45\mu\text{m}$ (máximo %)	23,20	34	34	34
Índice de Atividade aos 7 dias (mínimo %)	83,38	75	75	75
Índice de Atividade aos 28 dias (mínimo %)	87,12	75	75	75

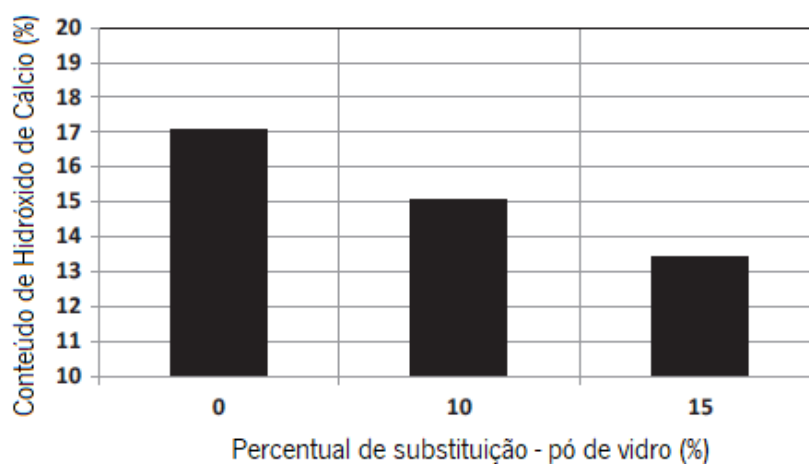


Figura 11 - Conteúdo de Ca(OH)_2 de acordo com % de pó de vidro (Aliabdo et al., 2016).

Moreira (2022) estudou o efeito do processo de moagem na resistência mecânica e no índice de atividade para vidros de cor âmbar, incolor e verde. Foram estudados os percentuais de passados e retidos em peneiração a 75 µm para os 10, 20, 30 e 40 ciclos de moagem no equipamento “los angeles”. Em seguida o material obtido aos 40 ciclos foi submetido a moagem no moinho de bolas cerâmicas para 2, 4, 6, 8 e 10 ciclos. A cada etapa de moagem foram produzidos provetes em argamassa que foram submetidos à compressão, sempre com 25% de substituição. Através desta rotina foi identificado o ciclo ótimo de moagem cujos resultados do ensaio a compressão permitiram obter o índice de atividade das diferentes composições, Tabela 9. A conclusão obtida foi de que o vidro verde (VV2C-25%) e o vidro âmbar (VA2C-25%), com 40 ciclos no Los Angeles + 2 ciclos de bolas cerâmicas, apresentaram o melhor desempenho, inclusive superior ao obtido com os provetes de cinzas volantes (CV-25%) para os 28 e 90 dias.

Tabela 9 – Índice atividade por cor do vidro e ciclo de moagem (Moreira, 2022).

Vidro / Ciclos	Índice de atividade	
	28 dias	90 dias
Cinzas Volantes-25%	62,1%	71,4%
V. Âmbar 0C-25%	50,7%	71,6%
V. Âmbar 2C-25%	74,3%	98,2%
V. Branco 0C-25%	46,6%	64,3%
V. Branco 2C-25%	62,4%	72,4%
V. Verde 0C-25%	51,3%	53,9%
V. Verde 2C-25%	71,8%	85,1%

2.5.4.3 Durabilidade

2.5.4.3.1 Penetração de cloretos

Se a penetração de cloretos através da camada de recobrimento for suficiente para atingir as armaduras, ultrapassando uma certa concentração (teor crítico), a película que as protege (camada de passivação) pode ser pontualmente destruída e permitir o início da corrosão se as condições de humidade e oxigénio forem favoráveis. A oxidação provoca não só a diminuição da secção como também expansões (Coutinho, 1998).

A corrosão do aço do betão armado é uma das causas mais importantes de degradação de estruturas de betão. Os cloretos podem estar presentes nos componentes do betão, daí a limitação do seu teor na normalização de diferentes países. Podem também ter origem externa, por exemplo, em ambientes marítimos ou saís de degelo (Moreira, 2016).

O transporte dos cloretos ocorre apenas em meio líquido e a entrada ocorre através dos poros capilares da pasta de cimento e das fendas existentes.

Kamali *et al.* (2015) determinaram o coeficiente não estacionário de migração de cloretos, obtido a partir do teste rápido de migração, para os betões com substituição de 10 % e 20% por pó de vidro (PV1 e PV2), aos 28, 56 e 91 dias de cura. Na Figura 12, é possível ver que os resultados para o pó de vidro exibiram coeficientes de migração mais baixos do que o betão de controle e o betão com 20% de FA (cinza volante classe F), em todas as idades, exceto para betão com 10% PV2 aos 28 dias de cura.

Especula-se que a maior compacidade de betões feitos com resíduo de vidro em pó, torna a mistura mais resistente aos cloretos devido ao melhor empacotamento das partículas, reduzindo a porosidade e permeabilidade do betão.

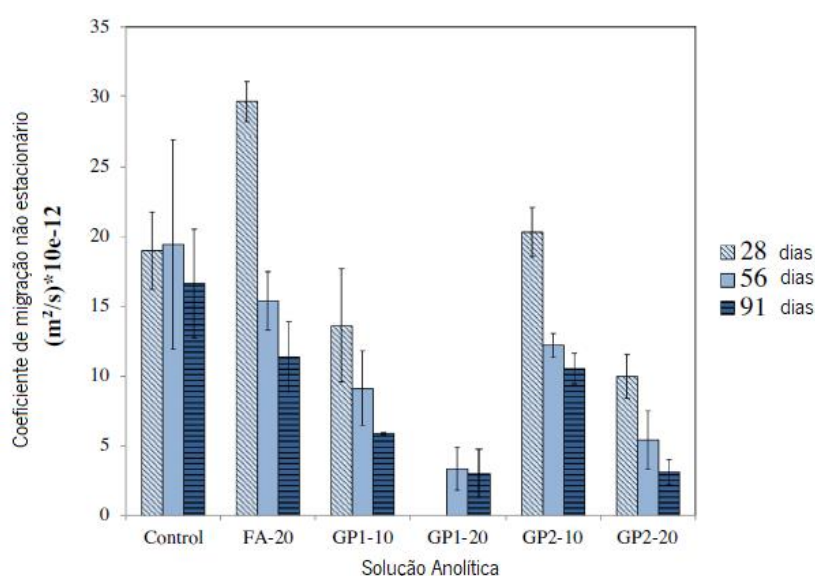


Figura 12 - Resultado teste rápido de cloretos, por idade e material (Kamali, 2015).

Jamshid *et al.* (2021) demonstraram que a matriz densa do betão de alto desempenho com ultra-alta resistência (UHPCG) foi desenvolvida para prevenir a entrada de materiais prejudiciais, como íões cloreto, atuando como uma camada de selagem para aumentar a durabilidade do betão. O pó de vidro (PV) reduz significativamente a permeabilidade ao cloreto, independentemente da relação água/cimento. Os autores apresentaram estudos publicados, onde a inclusão de 20% a 30% de pó de vidro como substituto de cimento permitiu reduzir em 40% a 90% a penetração de íões cloreto. Isso pode ser atribuído ao refinamento dos poros pela reação pozolânica, que diminui a porosidade e a conectividade dos poros para o transporte de cloretos. Em comparação com outros materiais suplementares de cimento (SCMs), o pó de vidro é mais eficaz do que a cinza volante em melhorar a resistência ao cloreto (Jamshid, 2021; Jain, 2010; Kamali, 2015).

2.5.4.3.2 Carbonatação

O dióxido de carbono encontra-se presente no ar, na água e nos oceanos. No caso do ar, a concentração de dióxido de carbono varia com a localização, sendo em geral maior em zonas urbanas e menor em zonas rurais. A carbonatação do betão ocorre quando o dióxido de carbono (CO_2) do ar reage com os hidróxidos da fase aquosa do betão. O CO_2 dissolve-se na água dando origem a ácido carbónico (H_2CO_3). A reação de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) com o ácido carbónico é a principal razão para a diminuição do pH do betão para valores inferiores a 9 (Moreira, 2016). A penetração ocorre sobretudo por difusão, quando o teor de humidade, a temperatura e porosidade são favoráveis. A reação promove um efeito cíclico, aumentando a penetração ao longo do tempo.

A carbonatação varia na razão direta da permeabilidade do betão e no caso dos poros se encontrarem saturados a carbonatação não se verifica (Coutinho, 1988).

É razoável, portanto, especular que o efeito adverso na resistência à carbonatação possa ser mitigado ou suprimido pela melhoria da microestrutura e redução da porosidade, uma vez que estas ações podem reduzir a difusividade no betão.

Se a carbonatação progredir e atingir o betão envolvente das armaduras, a película que envolve as armaduras é despassivada, permitindo a corrosão das armaduras.

Matos (2010) realizou em sua tese ensaios de carbonatação acelerada, conforme descritos na especificação LNEC E391, para argamassas com 10% e 20% de vidro substituindo o cimento. Neste estudo pode-se notar que a carbonatação foi maior para argamassas com adições. Os autores acreditam que estes resultados são justificados pela reação pozolânica que provoca a diminuição do hidróxido de cálcio.

Guo *et al.* (2020) apresentaram resultados indicando que o efeito do vidro na profundidade de carbonatação, para 0%, 10% e 20% de substituição de cimento por pó de vidro, com uma relação água ligante de 0,5, medida aos 2 e 4 meses, aumentou significativamente. Aos 4 meses, à medida que a percentagem de substituição aumentou de 0% para 20%, a profundidade de carbonatação aumentou de 3 mm para 8 mm. Estes resultados são consistentes com W. Ashraf (2016) e Reis (2022), que indicam em seus estudos haver uma tendência de que a utilização de SCM's provoque aumento na profundidade de carbonatação.

O uso de vidro tende a degradar a resistência à carbonatação devido à redução nos níveis de hidróxido de cálcio provocado pelas reações com os SCM's nas misturas endurecidas. O hidróxido de cálcio é o

principal responsável pelo pH do betão. A carbonatação (o CO_2 reage com o C-H e origina CaCO_3) faz com que o pH diminua para valores inferiores a 9, assim o betão deixa de proteger as armaduras e estas corroem.

2.5.4.3.3 Absorção de água

A durabilidade de betões e argamassas é muito influenciada pela maior ou menor facilidade de fluidos penetrarem (capilaridade, imersão ou difusão) nos poros e fendas, pois é através dos fluidos que as principais substâncias nocivas, presentes na atmosfera, penetram no elemento, causando sucessivas reações que ao longo do tempo irão degradar a matriz.

2.4.4.3.3.1 Por capilaridade

A capilaridade consiste na penetração de um fluido pela rede porosa do betão. O fenómeno dá-se devido ao aparecimento de forças capilares que têm origem na diferença de pressão entre a superfície livre da água no exterior e a superfície da água no interior dos poros. A força capilar depende da dimensão dos poros, e será maior nos poros de pequena dimensão. Já a velocidade de ingresso é oposta do que foi descrito anteriormente, ou seja, será maior nos poros de maior dimensão. A humidade do betão influencia a absorção capilar, pois se os poros estiverem saturados, o fenómeno não irá ocorrer, dado que não se desenvolvem forças de sucção capilar. É de realçar que este fenómeno ocorre quando o betão fica sujeito a ciclos de molhagem e secagem (ex. pela chuva ou por salpicos de água).

A absorção de água por capilaridade, a par da difusão e da permeabilidade, é um dos principais mecanismos de transporte de fluidos no betão. A penetração de fluidos no betão resulta quase sempre de uma combinação entre estes mecanismos (Moreira, 2016).

A água, componente essencial em todas as reações que podem de alguma maneira pôr em causa a durabilidade do betão, funciona como meio de transporte de agentes agressivos.

Matos *et al.* (2010) avaliaram a absorção por capilaridade em provetes cilíndricos, previamente curados e depois colocados numa estufa a 40°C até massa constante. Foi notado que as amostras contendo vidro, com 10 ou 20% de substituição, possuíram comportamento semelhante ao controle e que a sílica de fumo (10% de substituição) se comportou um pouco melhor.

Deepa Paul *et al.* (2022) avaliaram a absorção por capilaridade em provetes de betão, contendo 10 %, 20 %, 30 % e 40% de substituição do cimento por pó de vidro. O percentual de absorção diminuiu à medida que houve aumento do percentual de substituição. Os resultados diminuíram 4 %, 13 %, 15 % e

18 % respectivamente. A redução na absorção é justificada pela microestrutura mais densa dos betões feitos com pó de vidro, causada pelas reações pozolânicas do material.

Du and Tan (2014) estudaram a profundidade de penetração de água no betão com diferentes teores de pó de vidro conforme é mostrada na Figura 13. A profundidade de penetração de água diminuiu continuamente com um maior teor de pó de vidro. Em comparação com o betão simples, a profundidade de penetração de água foi reduzida em 54%, 65%, 68% e 80% para os níveis de substituição de cimento de 15%, 30%, 45% e 60%, respectivamente.

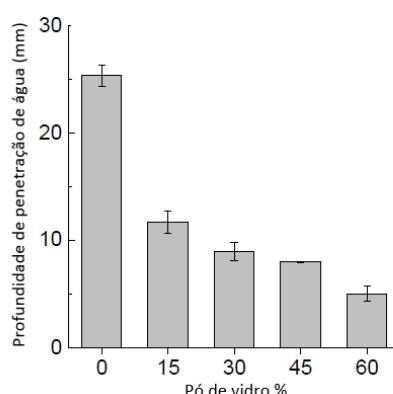


Figura 13 – Profundidade penetração d’água em betão com PV aos 28 dias (Du e Tan, 2014).

O betão com adição de 15% de pó de vidro apresentou uma profundidade de penetração de água muito menor em comparação com o betão simples. A estrutura de poros refinada, em particular a zona de transição interfacial (ITZ), deverá ser a principal razão para essa permeabilidade reduzida. (Du e Tan, 2014)

A especificação do LNEC E393-1984, indica a medição da absorção de água através de uma das faces do provete ao longo de três dias, após 3, 6, 24 e 72 horas, em provetes previamente secos durante um determinado período de tempo, necessário à obtenção de uma massa constante. Já a Concrete Society (1987) indica para duração do ensaio cerca de 4 horas, sendo a absorção de água medida aos 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 180 e 270 minutos. Utilizando-se desta recomendação (Browne, 1991) propõe classificar qualitativamente o betão conforme a Tabela 10.

Tabela 10 – Classificação qualitativa para absorção capilar (Browne, 1991).

Coefficiente de absorção capilar, S	Classe de qualidade
$S \geq 0.2 \text{ mg}/(\text{mm}^2 \times \text{min}^{0.5})$	Reduzida
$0.1 \text{ mg}/(\text{mm}^2 \times \text{min}^{0.5}) < S < 0.2 \text{ mg}/(\text{mm}^2 \times \text{min}^{0.5})$	Média
$S \leq 0.1 \text{ mg}/(\text{mm}^2 \times \text{min}^{0.5})$	Elevada

2.4.4.3.3.2 Por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão é utilizado para avaliar a porosidade aberta do betão, auxiliando na avaliação da durabilidade deste. Quanto maior a porosidade aberta, pior será o betão.

Rodier e Savastano (2018) indicam que o efeito do pó de vidro no volume de vazios permeáveis e na absorção de água após imersão, de argamassas aos 28 dias, com a substituição parcial de cimento por 10% em peso de pó de vidro resulta em uma redução de 15% no volume de vazios permeáveis e na absorção de água em comparação com o controle (argamassa sem adição mineral). A reação entre a sílica amorfa presente no pó de vidro e a cal produz C-S-H adicional, que preenche os poros capilares. A densificação dos poros capilares pelo C-S-H leva a uma diminuição do volume total de vazios permeáveis.

Associação Francesa de Engenharia Civil (AFGC) estabeleceu índices que permitem classificar qualitativamente os betões segundo diversos indicadores de durabilidade. Para a absorção de água a classificação proposta segue o indicado na Tabela 11.

Tabela 11 – Classificação qualitativa para absorção por imersão (AFGC, 2004).

% absorção de água	Classe de qualidade do betão
> 16	Muito fraco
14 à 16	Fraco
12 à 14	Médio
9 à 12	Alta
6 à 9	Muito Alta

2.5.4.3.4 Resistividade Elétrica

Kamali *et al.* (2015) estudaram a resistividade elétrica do betão aos 91 dias de cura usando a espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS). Neste estudo, provetes com 50 mm de espessura foram cortados de cilindros de betão e colocados entre duas placas condutoras (peças de espuma embebidas em uma solução de NaCl). A medição da resistividade elétrica foi realizada utilizando um potenciostato/galvanostato Gamry Reference 600 com um sinal AC de 250 mV e uma faixa de frequência de 106 a 10 Hz. A resistividade elétrica média de três espécimes idênticos foi calculada e relatada na Figura 14. Os betões com incorporação de pó de vidro obtiveram uma melhoria significativa da resistividade elétrica em comparação com o betão de referência e do betão de cinzas volantes. A melhor compactidade do material foi responsável pelo aumento significativo da resistência elétrica, o que se alinha com o conceito de que os materiais cimentícios formados como resultado de uma reação

pozolânica preenchem melhor os poros, contribuindo para o aumento das propriedades mecânicas e da durabilidade das misturas.

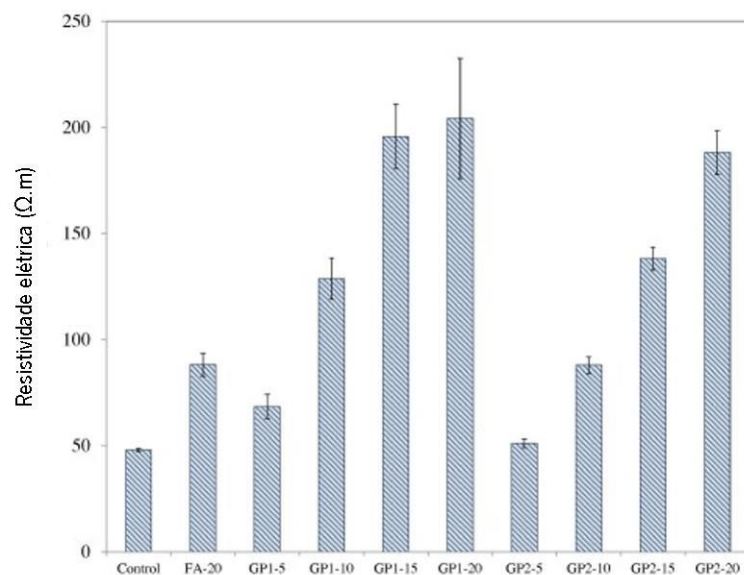


Figura 14 – Resistividade elétrica em betão (Kamali, 2015).

3 Materiais e procedimentos

Nesta campanha experimental foram produzidos provetes em betão de acordo com as composições da Tabela 15, de modo a cumprir o programa de ensaios previsto na Tabela 16.

3.1 Materiais

3.1.1 Areia

Em todos os ensaios laboratoriais foi utilizado uma areia siliciosa, natural, com diâmetro máximo de 4 mm e densidade de 2620 kg/m^3 , Figura 15, sendo a curva granulométrica apresentada na Figura 19. A areia foi fornecida pela empresa Extractopuro Lda, com origem em Santa Iria da Ribeira de Santarém, Portugal, nome comercial 0/4.

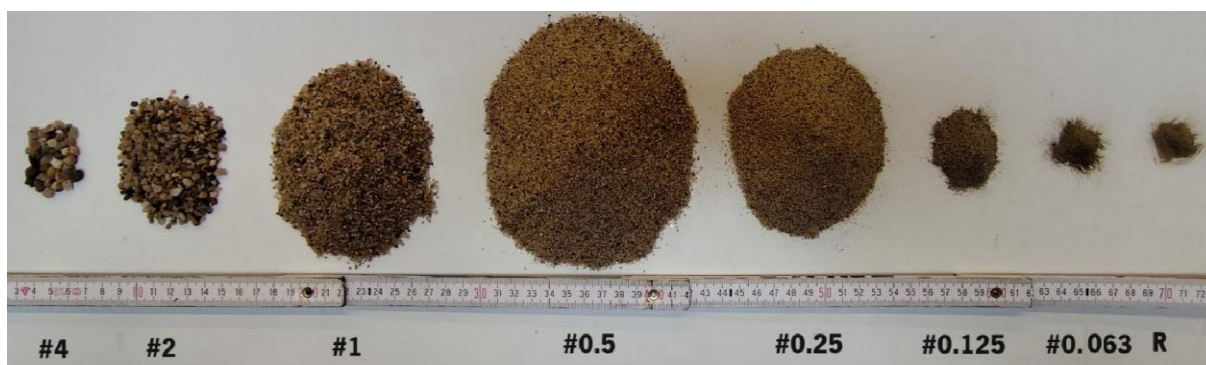


Figura 15 – Areia utilizada nos ensaios.

3.1.2 Brita

Como agregado graúdo foi utilizado a brita granítica 4/10, com diâmetro máximo de 10 mm e densidade de 2197 kg/m^3 , origem em Santa Maria de Airão, fornecida pela empresa Bezerras Lda, Figura 16, sendo a curva granulométrica apresentada na Figura 19.



Figura 16 – Brita utilizada nos ensaios.

3.1.3 Cimento

Como um dos objetivos é encontrar um substituto para as cinzas volantes, procurou-se utilizar um cimento portland com uma constituição de 95% de clínquer, nomeadamente o CEM I 42.5 R, sem adições em sua origem. O uso de um cimento que não fosse composto era preponderante para que os resultados obtidos não fossem distorcidos por uma eventual influência do material adicionado em sua composição.

3.1.4 Superplastificante

Utilizou-se o superplastificante Basf's MasterGlenium Sky 617, com base numa cadeia de etér policarboxílico modificado, com densidade relativa de 1041 g/cm³ e teor de sólidos de 20%. Sob a ação deste adjuvante redutor de água de alta gama, os grânulos de ligante, nomeadamente de cimento são dispersos, tanto pelo efeito electrostático como, pelo efeito estérico das cadeias laterais hidrofílicas presentes na cadeia polimérica de base do superplastificante.

3.1.5 Cinzas volantes

Utilizou-se cinza volante resultante da queima do carvão proveniente de África do Sul e Colômbia, fornecida pela Central Termoelétrica Portuguesa do Pego. São constituídas por partículas esféricas muito finas, compostas essencialmente por alumino silicatos. Devido ao material ser suscetível a variações importantes, procedeu-se sua caracterização química e física, cujos dados são apresentados adiante.

3.1.6 Vidro em pó

O vidro foi recolhido em restaurantes na região de Guimarães, submetido a processo de limpeza e descontaminação, para em seguida ser moído e caracterizado.

O pó de vidro que foi utilizado nestes estudos é do tipo sodo-cálcico, utilizado principalmente como embalagem de bebidas.

Considerando as conclusões do trabalho de mestrado desenvolvido na Universidade do Minho "*Incorporação de resíduo de vidro moído em argamassas como substituto parcial do cimento*", Moreira (2022), optou-se por utilizar apenas o vidro da cor verde.

3.1.6.1 Procedimentos para moagem do vidro

O processo de moagem foi conduzido conforme estabelecido na tese: *Pontes* (2023), vide Figura 17.



Figura 17 – Metodologia de obtenção do pó de vidro.

- A. Limpeza e descontaminação: As garrafas foram submersas em água por 48 horas para facilitar a remoção de sujeira grosseira (tampas, rolhas e resíduos de bebidas), a retirada de etiquetas e excesso de cola. Em seguida, as garrafas foram escovadas por dentro e por fora sob água corrente.
- B. Secagem: As garrafas foram colocadas em um forno ventilado por uma hora, a uma temperatura controlada de 105 ± 1 °C.
- C. Produção de cacos de vidro: As garrafas foram quebradas manualmente, gerando cacos de vidro.
- D. Moagem primária: Os cacos foram introduzidos em um triturador de mandíbulas, passando por dois ciclos, levando cerca de 5 minutos.
- E. O subproduto (a), após os ciclos da etapa D, eram cacos de vidro graúdos.
- F. Moagem intermediária: Os grãos obtidos na etapa E foram inseridos em um moinho de martelo, passando novamente por dois ciclos no equipamento, levando cerca de 5 minutos.
- G. O subproduto (b), após os ciclos da etapa F, eram cacos de vidro miúdos.

H. Moagem final: Para reduzir o tamanho dos grãos, o material foi inserido, em porções de 5 kg, em um moinho de bolas metálico ou "Los Angeles", onde permaneceu por 40 ciclos de 15 minutos cada, totalizando 10 horas de trituração (33 rpm), com uma massa abrasiva de 8.410 kg.

I. Pó de vidro: O produto final obtido foi o PV usado em composições de betão.

3.2 Caracterização dos materiais

3.2.1 Granulometria

Para garantir que o pó de vidro tivesse uma dimensão de partícula próxima à do cimento, permitindo assim uma análise comparativa sem distorções produzidas pelo tamanho dos grãos, realizou-se o ensaio de granulometria laser, através do equipamento MasterSizer 3000, Figura 18. Este ensaio, através de uma difração laser, mede o tamanho das partículas e sua distribuição característica, através dos diâmetros D10, D50 e D90, que são valores correspondentes aos tamanhos de partículas abaixo das percentagens avaliadas (10%, 50% e 90%), respectivamente. Para a realização do ensaio é introduzida uma pequena porção de material (aproximadamente 2 gramas), de forma gradual para evitar a aglomeração, 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, Tabela 12, e criado o padrão de dispersão.



Figura 18 – Equipamento Mastersizer 3000.

A determinação da granulometria dos agregados (areia e brita) foi determinada através de peneiração, conforme norma EN 933-1:2012, de maneira a estabelecer a curva granulométrica, Figura 19.

Tabela 12 – Distribuição do tamanho das partículas de cimento, CV e PV.

Material	D10	D50	D90
CEM I 42,5R	4,68	21,90	54,60
CV	3,53	24,00	109,00
PV	4,57	26,00	106,00

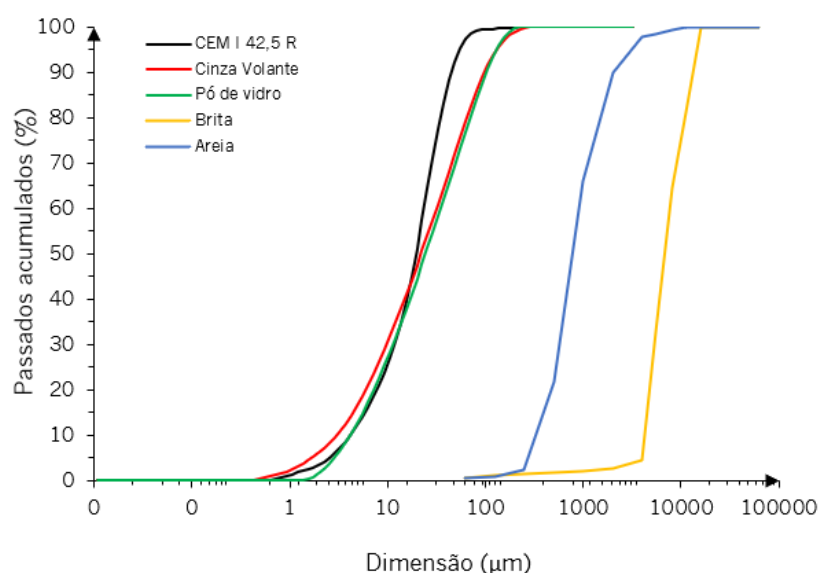


Figura 19 – Curva de granulometria dos materiais.

3.2.2 Massa Volúmica

A determinação da massa volúmica é fundamental para que seja determinada a composição das misturas de betão. A determinação da massa volúmica dos materiais foi realizada seguindo a norma NP EN 1097-6:2016.

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.

$$\rho = \frac{m}{V_2 - V_1} \quad (1)$$

Sendo:

ρ = massa volúmica

m = a massa do provete seco (g)

V_1 = o valor lido no voluminímetro contendo apenas petróleo (cm^3)

V_2 = o valor lido no voluminímetro contendo petróleo e o provete (cm^3)

Inicialmente, coloca-se o material numa estufa a temperatura de 110 °C até massa constante. Em seguida é feito o enchimento do balão volumétrico, com gasolina, 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 (V1) da altura do líquido. O líquido que se emprega deve estar a uma temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Coloca-se então, através de um funil e com cuidado, o material em estudo que foi seco na estufa. A quantidade colocada é pesada (m). Inclina-se ligeiramente o voluminímetro e rodou-se num sentido e no outro para libertar as bolhas de ar aderentes às partículas. Após alguns minutos de repouso (15 min), regista-se a segunda leitura (V2). Este procedimento é feito 3 vezes. A média das medidas é a utilizada como resultado. Este método foi utilizado para os materiais em pó: cimento, CV e PV.

Para análise da massa volúmica dos agregados foi dividida em dois tipos de metodologias, dependendo da granulometria do material: o método do picnómetro (areia) e o método do cesto de rede metálica (brita).

3.2.3 Superfície Específica Blaine (NP EN 196-6);

A superfície específica correlaciona a superfície (área) de uma partícula e o seu volume (tamanho), Tabela 13. Quanto maior for a partícula em estudo, menor será a sua superfície específica. A primeira etapa do experimento é determinar a quantidade de material, o que é feito através da massa volúmica calculada anteriormente. Antes de inserir o material 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 filtro de papel e, recorrendo à balança de precisão, introduz-se meteticulosamente a quantidade de material anteriormente calculada. Logo após, com auxílio do êmbolo pressiona-se de forma suave, mas firme. Feito 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.

Tabela 13 – Superfície específica e densidade.

Material	Blaine - Se (m^2/kg)	Densidade - ρ (kg/m^3)
CEM I 42.5 R	599,0	3142
CV	740,2	2364
PV	493,0	2604
Agregado Miúdo (Areia)		2620
Agregado Graúdo (Brita)		2197

3.2.4 Morfologia e composição química (MEV/EDS)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é um tipo de microscopia em que um feixe de elétrons focalizado varre a superfície da amostra, interagindo com a matéria, gerando diferentes tipos de sinais que podem oferecer informações sobre a morfologia e composição química do material.

O princípio de funcionamento do ensaio está relacionado com a interação entre os elétrons e a matéria. O microscópio eletrônico de varredura contém uma fonte geradora de um feixe de elétrons que é disparado continuamente na amostra durante o ensaio, realizando uma varredura em sua superfície. Assim, através de um detector presente no equipamento, é possível analisar as energias dos elétrons durante a interação deles com a superfície, que são interpretadas pelo equipamento e geram imagens com alta definição, Figura 20.

Além da imagem gerada pelo Microscópio Eletrônico de Varredura, uma outra técnica é bastante utilizada de forma acoplada ao microscópio, a Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS), que permite detectar elementos químicos na superfície da amostra, Tabela 14.

Para essa análise, é acoplado ao MEV um analisador de Raios X, para que as frequências da radiação liberadas no espectro do Raio X sejam analisadas. O princípio desse ensaio é baseado na análise dos fótons liberados pelos átomos da amostra quando o feixe de elétrons do equipamento se choca com a sua superfície. Isso é possível pois cada elemento químico libera fótons com frequências específicas. Os resultados são apresentados na forma de um espectro de energia versus intensidade relativa dos picos. O pó de vidro utilizado nos ensaios possui uma finura elevada, da mesma ordem de grandeza do cimento. Os resultados obtidos na análise físico e química do material indicam que o mesmo cumpre os requisitos da norma ASTM C1866, conforme Tabela 4 e Tabela 5.

Para melhor compreensão dos efeitos no betão torna-se necessário compreender a morfologia do pó de vidro e compará-lo ao cimento. Neste sentido, foi feita a análise microscópica (MEV) e a análise espectroscópica de raios x (EDS) dos ligantes utilizados, através do equipamento “SEM – Hitachi SU1510”.

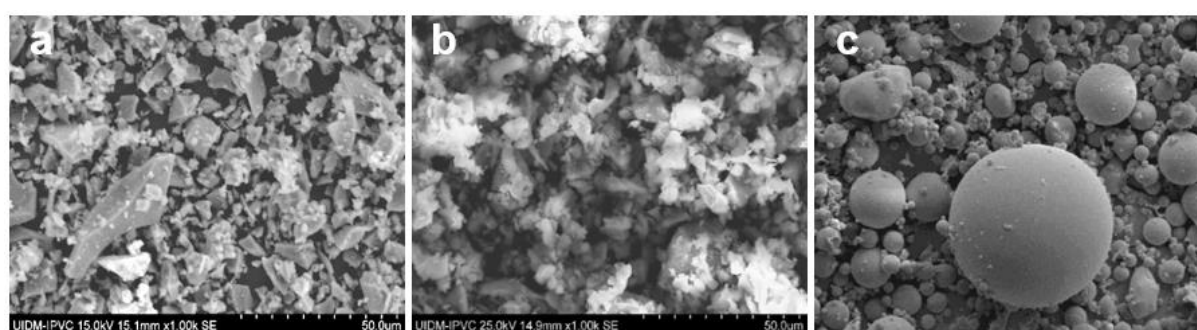


Figura 20 – MEV (x 1.00k) do: (a) PV, (b) Cimento e (c) Cinzas volantes.

Tabela 14 – Composição química do cimento, CV e PV.

Material	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	MgO	SO ₃	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	Na ₂ O _{eq}	PF	RI
CEM I 42,5 R	62,77	3,06	20,25	4,43	-	2,01	3,11	-	0,76	0,25	0,75	2,74	1,23
CV	1,25	12,70	53,70	22,70	-	1,55	0,79	1,60	3,46	1,52	-	6,20	-
PV	11,8	1,3	69,2	2,3	0,1	1,0	-		0,9	13,4	-	-	-

3.3 Procedimento para produção dos provetes

3.3.1 Estudo da composição

Para elaboração dos ensaios mecânicos e de durabilidade foram produzidos provetes em betão, cujas diferentes composições testadas se apresentam na Tabela 15.

A mistura de referência “300C” foi preparada sem adições, com um teor de ligante de 300 kg/m³, foi definida com o objetivo de representar um betão comum, com resistência em torno de 35 MPa (classe C30/37). A mistura contendo cinzas volantes “500C50CV” foi fabricada com um teor de ligante de 500 kg/m³, sendo 50% cimento e 50% cinzas volantes (em volume). As misturas “300C50VV, 400C50VV, 500C50VV e 600C50VV” foram produzidas sempre com substituição, em volume, de 50% do cimento por pó de vidro, tendo respetivamente 300, 400, 500 ou 600 kg/m³ de ligante. Finalmente, a mistura “500C70VV” foi produzida com uma dosagem de ligante de 500 kg/m³ e com uma substituição do cimento por pó de vidro, em volume, de 70%. Para calcular a massa do pó de vidro, o cálculo foi feito considerando a diferença de densidade entre o pó de vidro e o cimento.

Tabela 15 – Composição das misturas.

Descrição	Ligante (kg/m ³)	Cimento (kg/m ³)	% *	CV (kg/m ³)	PV (kg/m ³)	Agregados (kg/m ³)		SP (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	A/L
						Fino	Graúdo			
300C	300	300,00	0 %	0,00	0,00	511,06	1087,66	0,00	206,38	0,65
500C50CV	500	250,00	50 %	187,87	0,00	380,43	1151,28	8,72	160,85	0,35
500C70VV	500	150,00	70 %	0,00	290,00	377,87	1142,13	8,72	157,23	0,35
300C50VV	300	150,00	50 %	0,00	124,26	580,21	1158,51	5,53	145,32	0,50
400C50VV	400	200,00	50 %	0,00	165,74	466,60	1134,68	7,23	151,70	0,40
500C50VV	500	250,00	50 %	0,00	207,23	371,70	1125,11	9,15	162,77	0,35
600C50VV	600	300,00	50 %	0,00	248,72	281,06	1135,96	11,06	164,89	0,30

* substituição em volume

A Figura 21 representa o percentual de cada um dos materiais em relação ao total da composição.

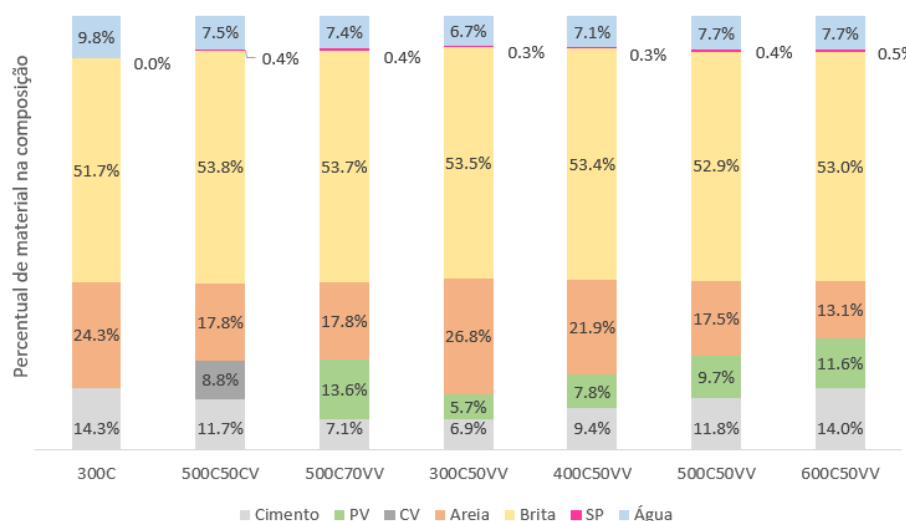


Figura 21 – Percentual de material por composição.

3.3.2 Mistura, moldagem e cura

Os procedimentos da pesagem, amassadura, moldagem e cura foram rigorosamente os mesmos para todas as misturas. O material foi pesado sempre na mesma balança, Figura 22a. Em uma betoneira de 50 litros foi primeiramente misturado o agregado graúdo com o agregado miúdo, Figura 22b, agitando-se durante 5 minutos com adição de 20% da água para evitar a perda de material fino. Em seguida foi introduzido o cimento e misturado por mais 3 minutos, Figura 22c. Logo após, inseriu-se o pó de vidro e misturou-se por mais 3 minutos, Figura 22d. A partir deste ponto fez-se a introdução da água restante, reservando os últimos 10% para inserção / diluição do superplastificante que foi introduzido ao final, em fio contínuo e lento. Fez-se a homogeneização final por mais 5 minutos. Logo em seguida, foram moldados os provetes, em moldes metálicos padronizados, Figura 23a, compactados em mesa vibratória, Figura 23b, e imediatamente protegidos com filme plástico, assim permanecendo por 24 horas. O procedimento a seguir foi a desmoldagem, identificação dos provetes e início da cura sob imersão em água, Figura 23c, durante as idades estabelecidas, conforme a programação constante na Tabela 16.



Figura 22 – (a) Pesagem, (b), (c) e (d) procedimento de mistura.



Figura 23 – Moldagem (a), compactação (b) e cura (c).

Tabela 16 – Ensaios, Idades e Provete (por mistura).

Propriedade	Norma	Geometria do provete (mm)	Unidades por idade	Idade dos ensaios
Resistência à compressão	EN 12390-3	Cubo -100x100x100	3	7, 14, 28, 90 e 180
Absorção de água por imersão	LNEC E394	Cubo -100x100x100	3	28 e 90
Absorção de água por capilaridade	LNEC E393	Cubo - 100x100x100	3	28 e 90
Migração de cloretos	LNEC E463	Cilindro - ϕ 100x200	2	28 e 90
Carbonatação	LNEC E391	Viga - 850x100x100 (a ser fatiada)	5 cm por idade	28, 56, 70 e 90
Resistividade Elétrica	-	Cilindro - ϕ 100x200	-	28 e 90

3.4 Procedimentos de ensaios

3.4.1 Abaixamento (*Slump Test*)

O abaixamento (*Slump Test*) é um meio rápido de tentar definir as características do betão fresco, momentos antes de sua aplicação, fazendo parte do controle tecnológico. Este ensaio simples mede a consistência do betão para conferir a trabalhabilidade e verificar se aquele betão poderá ser utilizado em determinada peça na obra. Estes ensaios foram executados imediatamente antes da moldagem dos provetes, para cada uma das misturas, Figura 24.



Figura 24 – Ensaio de abaixamento (Slump).

Após obter a amostra necessária ao teste, determina-se um local plano para posicionar o molde tronco-cônico, em seguida é iniciado o enchimento do mesmo em três camadas sucessivas, intercaladas com a devida compactação da mistura com golpes da barra metálica, conforme norma aplicável (NP EN 12350-2). Após o completo preenchimento do molde, faz-se a retirada do molde lentamente. Logo após, é posicionado o tronco invertido sobre a base e a distância entre a barra metálica e o topo de mistura é registrada, definindo assim o abaixamento e a classe respectivamente.

3.4.2 Resistência Mecânica

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, para as idades de 7, 14, 28, 90 e 180 dias, para cada uma das composições estabelecidas em betão, conforme Tabela 15. Para este ensaio foi utilizada a prensa universal ELE, com capacidade para 300 kN, Figura 25.



Figura 25 – Prensa para ensaio de resistência à compressão.

3.4.3 Indicadores de durabilidade

No âmbito desta dissertação o intuito de realizar os ensaios para verificar a durabilidade do betão reside no facto de ser objetivo do trabalho desenvolver um novo material, capaz de suprir a lacuna das cinzas volantes, portanto, torna-se fundamental descrever os efeitos não só mecânicos como também no comportamento que as adições terão, e em que ponto elas podem vir a contribuir ou mesmo determinar suas condições de aplicação. Conforme dito anteriormente, as cinzas volantes têm papel relevante em betões expostos a meios agressivos, tornando-se importante que um eventual substituto também possa ser útil neste contexto.

3.4.3.1 Absorção de água por capilaridade (LNEC E 393)

Para avaliar a influência da adição do PV como substituto parcial do cimento na durabilidade do betão realizou-se o ensaio de absorção de água por capilaridade, baseado na especificação LNEC E 393.

Os provetes produzidos foram curados até a data prevista nos ensaios (28 e 90 dias). Em seguida, foram colocados numa estufa a $105^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ até massa constante, Figura 26a. Posteriormente, foram mantidos na sala onde se realizará o ensaio a uma temperatura entre $20^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Após o resfriamento dos provetes aplicou-se uma película de silicone nas faces laterais, com aproximadamente 2 cm de altura, para garantir que a absorção de água ocorra unicamente pela face inferior, quando em contato com a lâmina de água, Figura 26b. Após a completa secagem do silicone os provetes foram colocados em recipiente com uma lâmina de água de 5 ± 1 mm, repondo o nível sempre que necessário, Figura 26c. A massa

dos provetes foi medida em intervalos de 10 minutos inicialmente e depois de hora em hora. Para efeito de cálculo do coeficiente de absorção utilizou-se os dados obtidos nas primeiras quatro horas, recorrendo-se ao coeficiente obtido no gráfico, através de regressão linear. Para determinação da curva completa de absorção, manteve-se medições diárias até a constatação da massa constante.

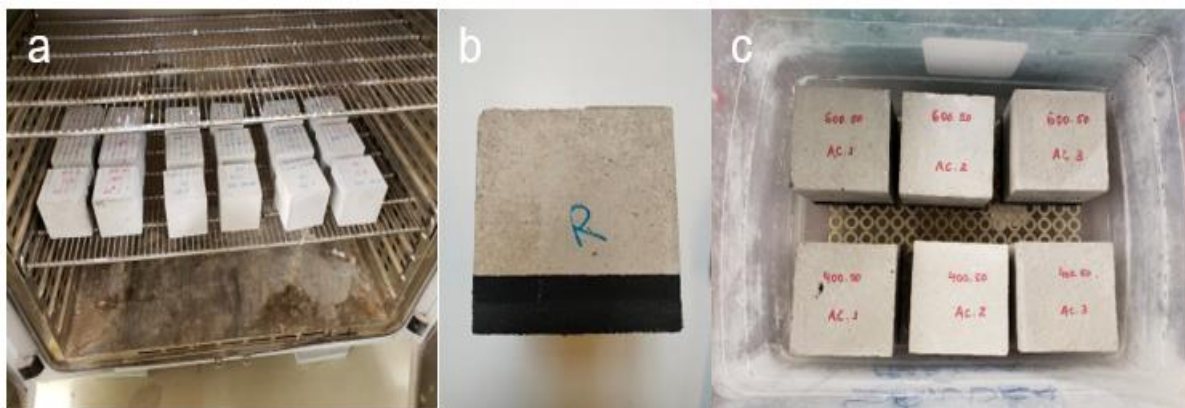


Figura 26 – Ensaio de absorção por capilaridade (a) secagem, (b)silicone e (c) ensaio em execução.

3.4.3.2 Absorção de água por imersão (LNEC E 394)

Para as várias composições de betão em estudo foi determinado os valores da absorção de água por imersão. O procedimento experimental baseou-se na especificação E 394 do LNEC:

Os provetes produzidos foram curados até a data prevista nos ensaios (28 e 90 dias). Em seguida foram colocados numa estufa a $105^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ até massa constante. Posteriormente, foram resfriados em temperatura ambiente. Determinou-se então a massa seca (m_1) para em seguida serem imersos em água, de forma gradual, ao passo de 1/3 a cada hora de ensaio. Ao final, garante-se que todos os provetes estejam totalmente imersos com uma lâmina de água em torno de 2,5 cm acima da face superior, Figura 27. De forma a verificar a saturação dos provetes, efetuaram-se pesagens até que a massa dos provetes fosse constante entre medições, obtendo-se a massa saturada (m_2). A massa constante é definida quando a diferença entre as massas obtidas em duas pesagens consecutivas, intervaladas de pelo menos 24 horas, for inferior a 0,1% da média das duas leituras. Em cada pesagem, cada um dos provetes é retirado manualmente do recipiente com água, ligeiramente seco com pano húmido, pesado e logo em seguida recolocado no recipiente com água.

Para determinação da massa hidrostática dos provetes (m_3) os mesmos são retirados de dentro do reservatório e são pesados numa balança, imersos em água.

A absorção de água por imersão é calculada, em percentagem, através da seguinte equação (2):

$$\text{Absorção (\%)} = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \quad (2)$$



Figura 27 – Ensaio de absorção por imersão.

3.4.3.3 Carbonatação acelerada (LNEC E 391)

A determinação da resistência à carbonatação seguiu, em geral, o procedimento descrito na especificação LNEC E 391 (1993). O ensaio foi realizado em apenas uma viga, da qual se extraiu fatias de cerca de 50 mm de espessura, para cada uma das idades, à medida que o ensaio se desenvolvia.

Logo após a moldagem da viga, foi protegida com plástico filme em toda sua envoltória. Depois de efetuada a desmoldagem no dia seguinte, esta viga foi curada até à idade de 28 dias imersa em água e logo em seguida foi retirada da água para permanecer em temperatura ambiente ($20 \pm 2^\circ \text{C}$) por mais 14 dias, controlando-se a humidade relativa em $57 \pm 3\%$. Depois deste período, a viga foi revestida nos topos e em duas faces opostas com parafina, de forma a induzir o processo de carbonatação a apenas duas faces restantes. Feito isto, a viga foi introduzida na câmara de carbonatação, Figura 28a, de forma que todas as faces tenham ventilação. A câmara garante a alimentação de ar com $5 \pm 0,1\%$ de CO_2 e o controle de humidade em $60 \pm 5\%$, onde permaneceram até serem submetidas ao ensaio, nas suas devidas idades. Procedeu-se, então, ao corte de fatia de 5 cm de espessura a partir do topo da viga. A seção retangular foi, em seguida, pulverizada com uma solução alcoólica de fenolftaleína a 0,1%. Nas zonas não carbonatadas, com pH elevado, a seção apresenta uma cor rosa ou vermelho-púrpura e nas zonas carbonatadas, com pH mais baixo, a seção pulverizada manteve-se incolor. Posteriormente, recorrendo a um paquímetro, procedeu-se à medição de 5 leituras por face, da profundidade de carbonatação, Figura 28b. A média destas leituras determinou a profundidade de carbonatação de cada uma das composições em estudo.

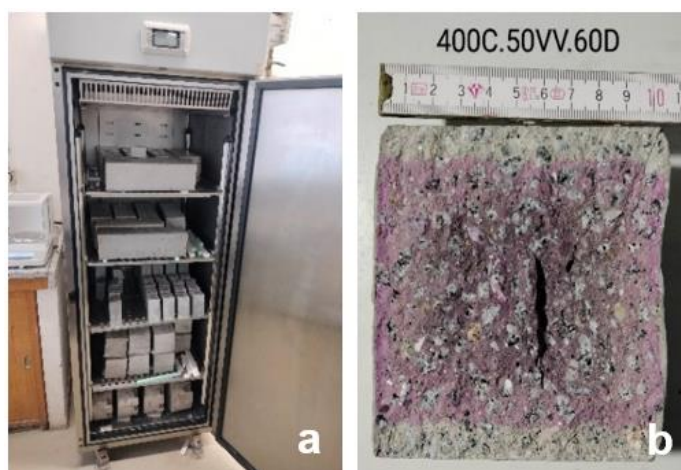


Figura 28 – Câmara de carbonatação (a) e medição da profundidade de carbonatação (b).

3.4.3.4 Migração de Cloretos (LNEC E463)

A determinação da resistência à penetração de cloretos seguiu a especificação do LNEC E463 (2004), obtendo-se o coeficiente de difusão de cloretos em regime não estacionário.

Neste teste a passagem de corrente elétrica através de uma fatia circular de betão é medida sob um potencial elétrico. O potencial elétrico e a duração do teste são determinados com base na medição inicial da corrente do corpo de prova quando submetido a um potencial elétrico inicial de 30 V. A fatia de betão, com 50 mm de espessura, é cortada de um cilindro ou núcleo, identificada e acondicionada na câmara para saturação sob vácuo com a solução saturada de CH, Figura 29a, sob o tempo estabelecido na especificação. Em seguida é colocada como uma membrana entre duas células de líquido. A face lateral do provete é protegida de forma a permitir que apenas as faces inferior e superior estejam em contato com as soluções catódica e anódica. Uma célula contém 0,3 M de NaOH e a outra 3% de NaCl, Figura 29b. Após cumprir o tempo estabelecido com a aplicação do potencial elétrico os espécimes são divididos axialmente e uma solução 0,1 M de nitrato de prata (AgNO_3) é pulverizada sobre as superfícies divididas, Figura 29c. O nitrato de prata reage com o cloreto para formar um precipitado de cloreto de prata branco (AgCl) na superfície das amostras divididas, que pode ser usado para avaliar a profundidade de penetração do cloreto. Quando o precipitado branco do cloreto de prata se tornou visível, mediu-se a profundidade de penetração de 10 em 10 mm, desde o centro até aos bordos, até se obter sete medições. Os coeficientes de migração de estado não estacionário são então calculados, conforme a equação 3.

$$D = \frac{0,0239 (273+T)L}{(U-2)t} \times \frac{(Xd-0,0238) \sqrt{(273+T)LXd}}{U-2} \quad (3)$$

sendo:

D = o coeficiente de difusão no estado não estacionário, $\times 10^{-12}$ (m^2/s);

U = o valor absoluto da voltagem aplicada (V);

T = o valor médio das temperaturas inicial e final na solução anódica ($^{\circ}C$);

L = a espessura do provete (mm);

x_d = o valor médio da profundidade de penetração (mm);

t = a duração do ensaio, em horas.



Figura 29 – Câmara de vácuo (a), ensaio em execução (b) e medição dos resultados (c).

3.4.3.5 Resistividade elétrica.

Este ensaio não destrutivo permite efetuar a medição da resistividade da superfície do elemento de betão. Para sua execução utilizou-se o método das quatro pontas – Sonda Wenner. Durante o teste, uma baixa frequência em corrente alternada (CA) é aplicada entre os dois eléctrodos exteriores, enquanto a tensão é medida nos dois eléctrodos interiores. Na investigação desenvolvida, as medidas de resistividade eléctrica foram realizadas com um equipamento RESIPOD, da marca Proceq, Figura 30b.

Para garantir maior precisão nos ensaios os provetes foram marcados através de 4 pontos fixos de leitura, em três secções transversais, garantindo que os pontos de contato do equipamento com o provete seja o mesmo em todas as leituras feitas, em qualquer idade, Figura 30a. A leitura foi feita sempre logo após a retirada do provete da água, ainda húmido. A sonda é previamente calibrada e mergulhada num recipiente com água, em seguida pressionada sobre as marcações previamente feitas. A leitura foi registrada 3 vezes em cada uma das faces marcadas e a média de todas determinou a resistividade do provete.

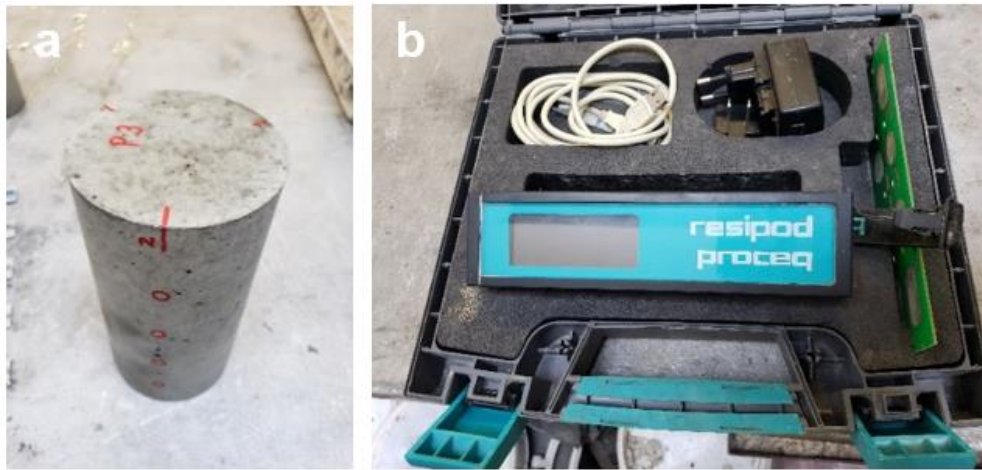


Figura 30 – Marcação dos provetes (a) e equipamento Resipod (b).

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção, no Departamento de Engenharia Civil, no campus de Azurém da Universidade do Minho.

4 Resultados e análises

4.1 Abaixamento

O abaixamento das misturas propostas na Tabela 15 e sua respectiva relação água/ligante (A/L) é apresentada na Figura 31.

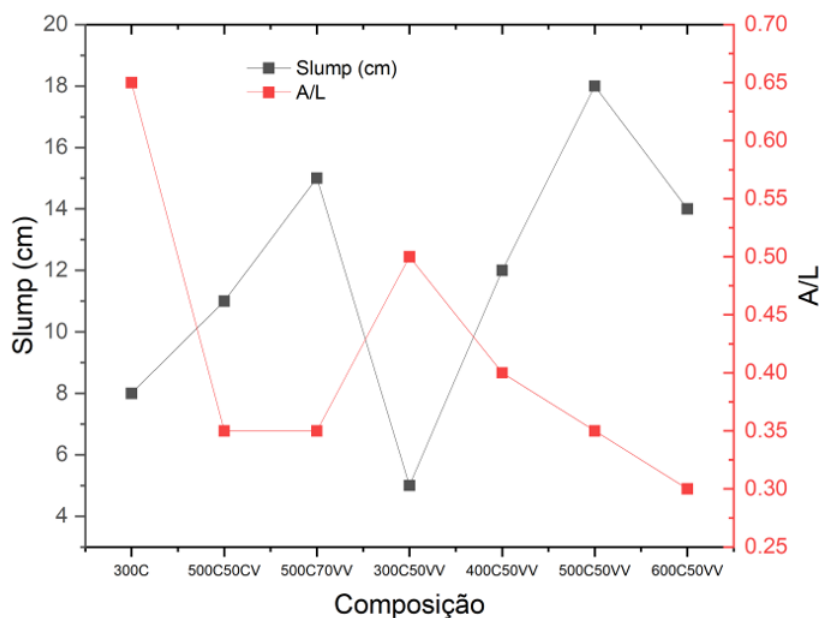


Figura 31 – Slump vs. A/L.

Como mencionado antes, aqui também se verificou que a introdução do pó de vidro reduz a necessidade de água na mistura e induz a uma redução na relação água/ligante devido a redução do teor de cimento. O uso do aditivo superplastificante, por haver a recomendação de fazê-lo apenas na última etapa da mistura, demonstrou em alguns casos, ser um dificultador para garantir que as misturas apresentassem um nível semelhante de trabalhabilidade.

À medida que se eleva o nível de substituição do cimento por PV ocorre uma elevação no abatimento.

4.2 Resistência à compressão

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão aos 7, 14, 28, 90 e 180 dias são apresentados na Figura 32. O desenvolvimento ao longo do tempo, dos 7 aos 180 dias, é apresentado na Figura 33 para todas as misturas estudadas. Os resultados mostrados correspondem à média de três amostras estudadas. O coeficiente de variação esteve dentro de limites aceitáveis, variando entre 0,28% e 7,86%. A Figura 34 apresenta o perfil apresentado de ruptura dos provetes.

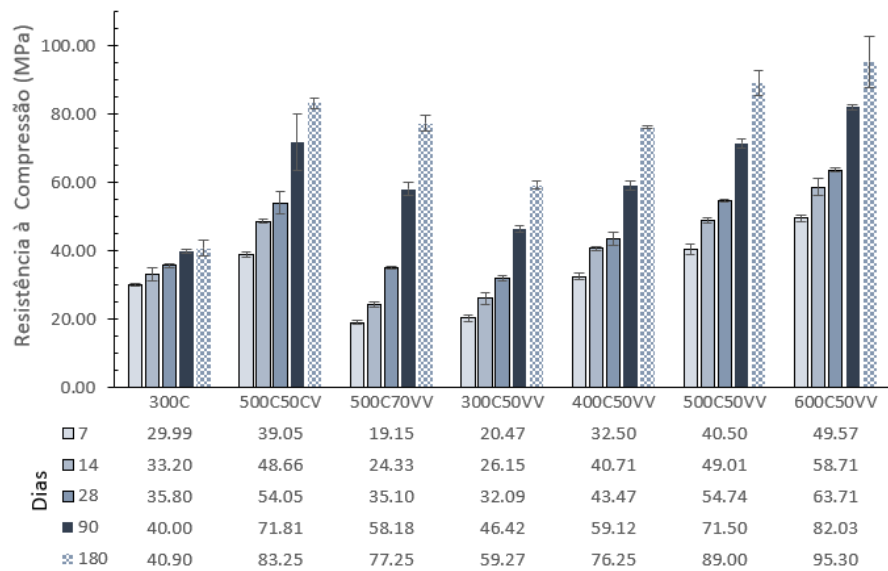


Figura 32 – Resistência média à compressão aos 7, 14, 28, 90 e 180 dias.

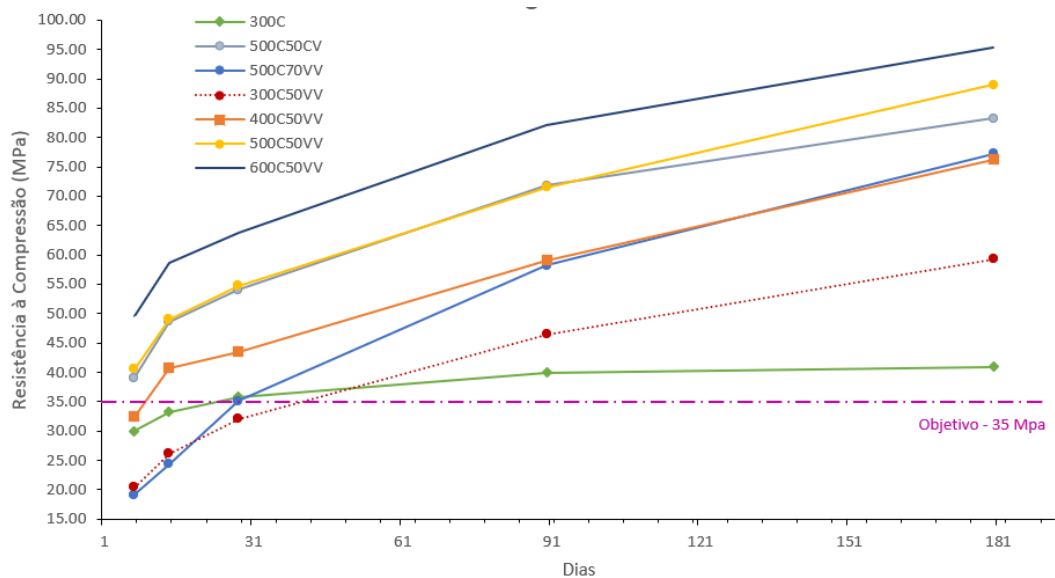


Figura 33 – Evolução da resistência média à compressão ao longo do tempo.

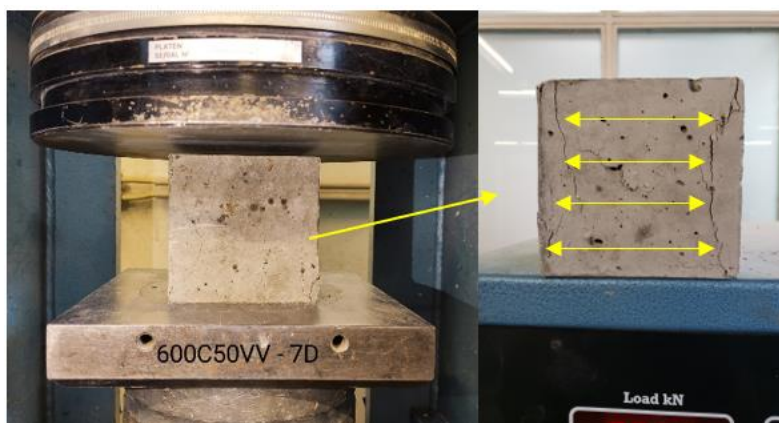


Figura 34 – Ruptura característica ocorrida nos provetes.

Percebe-se, claramente, um aumento nos valores de resistência à compressão com a progressão do período de cura. A linha meta dos 35 MPa mostra que aos 28 apenas a mistura com 300 kg/m³ de ligante e 50% de vidro (300C50VV) ficou abaixo (32,09 MPa), todas as demais estão acima, cumprindo o objetivo inicial estabelecido. Aos 90 dias todas as misturas superam não só a meta, como também os resultados são superiores ao resultado da referência (300C). Acredita-se que a principal causa está associada ao desenvolvimento lento de reações pozolânicas características de betões contendo materiais cimentícios suplementares (SCM) (Du e Tan, 2017). Aos 90 dias, a mistura com 300 kg/m³ de ligante e 50% de vidro (300C50VV) atingiu 46,42 MPa, enquanto a referência apresentou 40 MPa, ou seja, 16% mais resistente com a metade do teor de cimento, pois nesta composição havia apenas 150 kg/m³ de cimento. Chama a atenção também o desenvolvimento semelhante entre a mistura contendo cinzas volantes (500C50CV) e a mistura com vidro verde (500C50VV) que possuía uma dosagem de cimento equivalente, 250 kg/m³. Aos 90 dias ambas atingiram resistências na ordem de 70 MPa, mesmo com uma redução de 50 kg/m³ na dosagem de cimento. Este é um bom indicativo que o PV tem características, pelo menos em termos mecânicos, que podem viabilizar a substituição das cinzas volantes.

A Figura 35, representa o desenvolvimento percentual da resistência por idade, ou seja, no caso da referência (300C), 73% da resistência inicial foi atingida aos 7 dias, 8% aos 14 dias, 6% aos 28 dias, 10% aos 90 dias e 2% aos 180 dias.

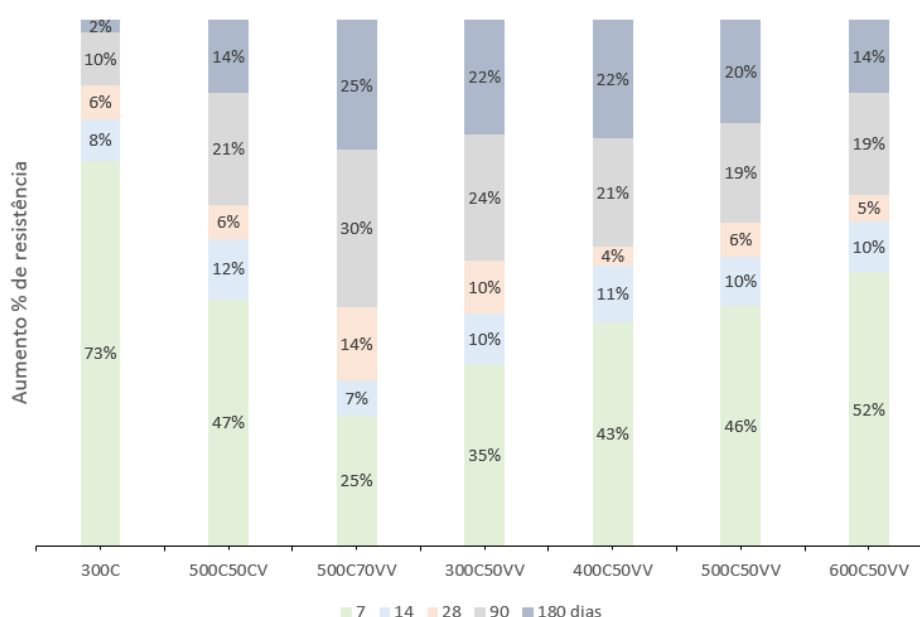


Figura 35 – Evolução percentual da resistência à compressão por idade.

A análise da Figura 35, demonstra que as composições contendo vidro têm um desenvolvimento da resistência mais lento, algo também semelhante ocorre com as cinzas volantes. À medida que avança a idade o betão com PV mantém ganhos significativos de resistência. No betão de referência 73% da resistência se desenvolve nos primeiros 7 dias e entre 28 e 90 dias o ganho é de apenas 10%. No caso das cinzas volantes, aos 7 dias ganha-se 47%, entre 28 e 90 dias o ganho de resistência foi de 21%. Ou seja, o desenvolvimento é mais lento, porém mais expressivo. Este mesmo comportamento ocorre nas composições contendo PV. A composição com 70% de vidro apresenta a reação mais lenta de todas, são 25% nos primeiros 7 dias e 55% após os 28 dias iniciais.

Na Figura 36 faz-se uma análise comparativa das resistências (aos 90 dias) de acordo com a dosagem de cimento utilizada na composição. A Figura 36a traz uma visão geral, entre todas as composições. Na Figura 36b são comparadas as composições contendo 50% de vidro em relação à referência, sem adições. Já na Figura 36c é dado realce às composições com redução do teor de cimento para 150 kg/m³ comparando duas alternativas, uma com 50% e outra com 70% de vidro. Finalmente, na Figura 36d o realce é para a comparação entre a composição com cinzas volantes e a composição contendo 50% de vidro, ambas com dosagem de cimento de 250 kg/m³.

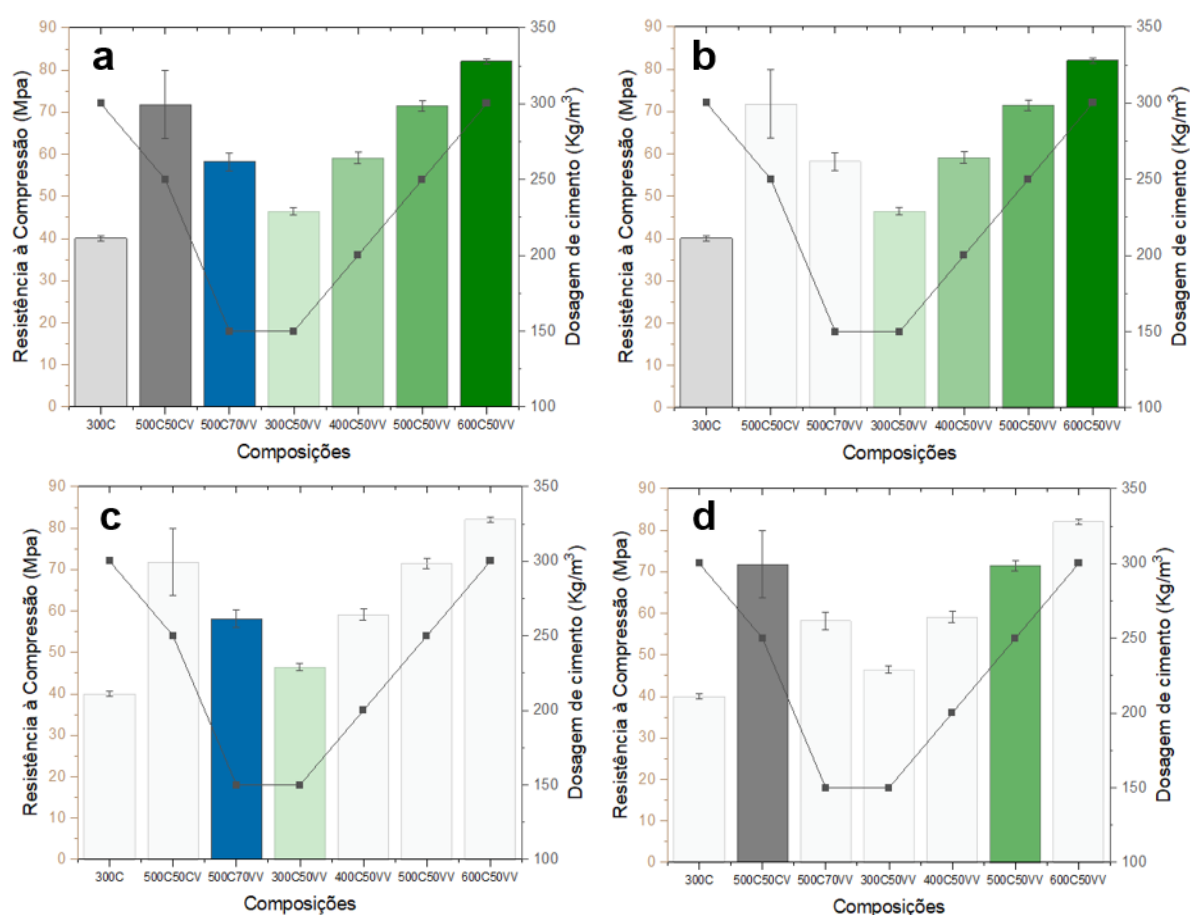


Figura 36 – Resistência à compressão aos 90 dias (análises comparativas)

Na Figura 36b é mostrada uma tendência evidente de que à medida que se aumenta a dosagem de cimento entre 150 e 300 kg/m³ há aumento nas resistências. Entre 300C50VV e 400C50VV há um acréscimo de 50 kg de cimento e um aumento de 12,7 MPa (27,3%). Já entre 400C50VV e 500C50VV há um acréscimo de 50 kg de cimento e uma elevação de 12,4 MPa (20,9%), e entre 500C50VV e 600C50VV mantém-se o aumento de 50 kg de cimento, mas a resistência eleva-se 10,5 MPa (14,7%).

Na Figura 36c tem-se o intuito de mostrar que em dosagens reduzidas de cimento (apenas 150 kg/m³) a dosagem que continha maior teor de vidro 70% (500C70VV) desenvolveu-se mais que a dosagem com 50% de vidro. Com 70%, aos 90 dias obteve-se 58,18 MPa e com 50% chegou-se a 46,42 MPa, ou seja 25,3% a mais. É importante, também, perceber que ao observar a Figura 33 existe uma forte tendência de que esta diferença se amplie pois o desenvolvimento da resistência na composição com 70% (500C70VV) é mais acentuado em idades mais avançadas.

Na Figura 36d mostra-se que entre as cinzas volantes (500C50CV) e a composição contendo 50% de vidro (500C50VV), ambas com a mesma dosagem de cimento – 250 kg/m³ – e mesma relação A/L, as diferenças são pouco significativas em termos de resistência mecânica. A composição com vidro apresentou 71,5 MPa e a das cinzas volantes 71,8 MPa. Portanto, parece haver condições para que o pó de vidro substitua as cinzas volantes em betões.

Como mencionado anteriormente, a intenção deste estudo não foi determinar o nível ideal de incorporação de pó de vidro, mas sim demonstrar a viabilidade de produzir betões com altas incorporações (50% ou 70%) e uma redução significativa no consumo de cimento, resultando em betões com resistência média de cerca de 35 MPa sem comprometer a durabilidade. Nessa perspectiva, os resultados obtidos são animadores pois dentre as composições experimentais, aquelas com a menor dosagem de cimento (apenas 150 kg/m³), caso das composições 500C70VV e 300C50VV, foi possível atingir 58,18 MPa e 46,42 MPa respectivamente, aos 90 dias. Espera-se que esse número aumente significativamente, pois, quando o pó de vidro é usado, as reações pozolânicas ocorrem mais lentamente, sugerindo que resultados ainda melhores serão obtidos em idades posteriores. Essas resistências tornam esses betões adequados para uso na maioria dos projetos de construção atuais, restando comprovar questões relativas à sua durabilidade e eventuais condicionantes que possam vir a influir na sua vida útil.

Estudos recentes mostram uma tendência semelhante aos resultados aqui apresentados. Usando uma relação água-aglomerante de 0,485, Du *et al.* estudaram o efeito da resistência à compressão em betões feitos com pó de vidro como substituto do cimento em 15%, 30%, 45% e 60% em massa do total de materiais cimentícios. O diâmetro médio das partículas de vidro é de 10 µm. As dosagens de aglomerante

utilizadas foram semelhantes às utilizadas neste trabalho. Apesar de terem concluído em seus estudos que a incorporação de 30% é mais resistente do que a mistura de referência, mesmo com 60% de incorporação, os autores obtiveram betões com quase 40 MPa após 28 dias, com apenas 152 kg/m³ de cimento. A explicação dos autores é que devido à lenta reação pozolânica do pó de vidro, em idades mais avançadas a sílica amorfa do pó de vidro se dissolve lentamente sob o ambiente alcalino do betão, reagindo com Ca²⁺ para formar gel C-S-H. Com este processo, a porosidade do betão diminuiria e a resistência tenderia a aumentar.

Deep Paul *et al.* obtiveram 48,15 MPa de resistência à compressão aos 28 dias, para betões com 40% de substituição, A/L = 0,40 e um dosagem de 368,8 kg/m³ de ligante ou 221,28 kg/m³ de cimento. Segundo os autores, esses resultados podem ser atribuídos à formação adicional de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) da reação pozolânica do PV. O gel C-S-H fortalece a interface na zona de transição, aumentando a resistência.

Além da similaridade com os resultados acima apresentados, pode-se também justificar os resultados obtidos à granulometria do pó de vidro e dos agregados, à redução da relação A/L, à cura sob condições ideais e ao processo de produção do betão.

4.3 Absorção de água por capilaridade

A cinética de absorção capilar é apresentada através de curvas que indicam a variação na quantidade de água absorvida por unidade de área da amostra em contato com a água, em função da raiz quadrada do tempo. Essas curvas, para provetes curados em água durante 28 dias, são mostradas na Figura 37 e representam o valor médio de absorção de água por capilaridade obtido para três amostras. Para provetes curados durante 90 dias a representação é feita na Figura 38.

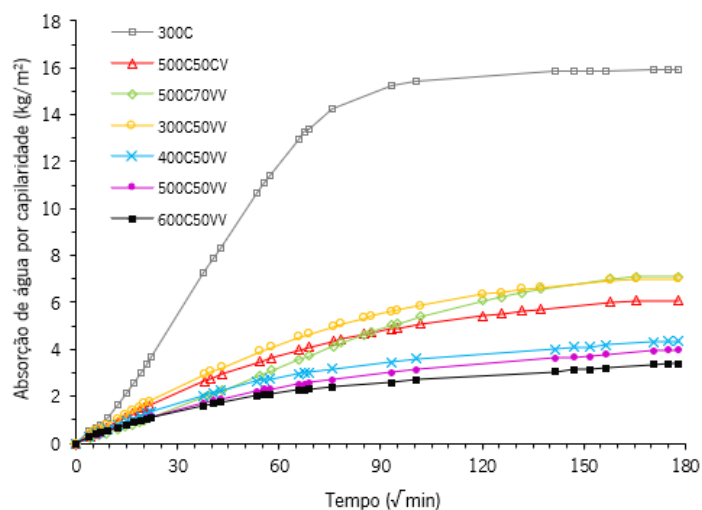


Figura 37 – Curva de absorção capilar (após cura de 28 dias).

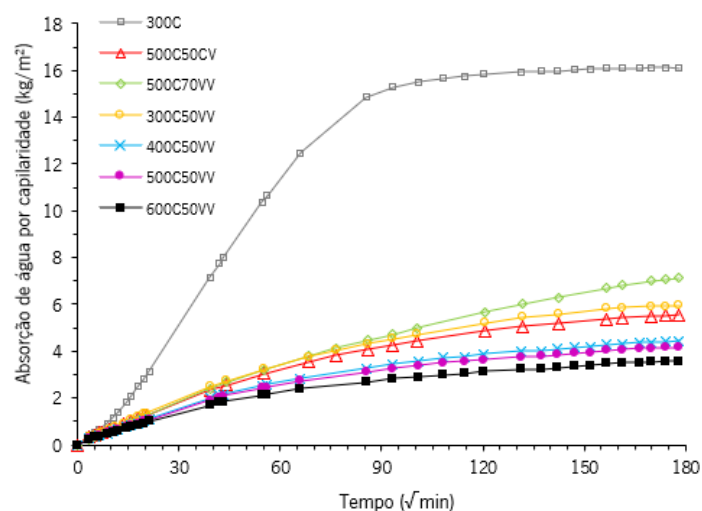


Figura 38 – Curva de absorção capilar (após cura de 90 dias).

Como esperado para este tipo de teste, o comportamento observado reflete uma absorção capilar mais significativa na fase inicial, com uma curva mais íngreme nas primeiras horas. Durante essa fase, a água penetra pelos poros acessíveis de maiores dimensões (Coutinho, 1988).

O betão de referência (300C) destaca-se, apresentando uma curva com uma inclinação significativamente maior em comparação com as curvas relacionadas aos betões com adição de cinzas volantes (500C50CV), com 70% de vidro (500C70VV) e os com 50% de vidro (300C50VV, 400C50VV, 500C50VV e 600C50VV). Esse fato pode estar relacionado à existência de uma maior quantidade de poros capilares de maiores dimensões no betão de referência.

Após a fase inicial, as curvas apresentadas nas Figuras 37 e 38, adquirem um ritmo mais lento, com tendência para alcançarem um platô de estabilização, o que representa o preenchimento da rede capilar. Neste momento, os poros capilares mais finos são preenchidos, o que ocorre de forma mais lenta. Aos 90 dias, o betão de referência atinge este patamar de estabilidade, alcançando o preenchimento da rede capilar, em níveis próximos a 16 kg/m². Comparando-se com os betões contendo PV, a composição que apresenta o pior desempenho é a que contém 70% de PV (500C70VV), atingindo apenas 6,65 kg/m² de absorção de água na fase estável, ou seja, algo em torno de 41% do que se obteve na referência. Esse comportamento pode indicar a existência de uma rede porosa menos interconectada e/ou de menor tamanho nos betões com PV's.

Ao comparar as curvas aos 28 e 90 dias, praticamente não houve diferenças. Apenas as composições 500C70VV e 300C50VV apresentam ligeira alteração, mas sem relevância.

Conforme preconizado pela literatura (Coutinho 1988), para efeito de cálculo do coeficiente de absorção capilar, utiliza-se apenas as primeiras 4 horas do ensaio, o que é representado nas Figuras 39 (28 dias) e 40 (90 dias). A análise destas figuras corrobora com a conclusão anterior. A taxa de absorção de água dos betões com 50% e 70% de PV é significativamente menor do que a taxa do betão de referência. Percebe-se, também, nestas figuras que, aos 28 dias, quase todas as composições contendo vidro apresentam desempenho melhor que aquela contendo cinzas volantes, com exceção da composição 300C50VV. Contudo, esta situação muda aos 90 dias. Nesta idade, a composição 300C50VV apresenta uma curva praticamente igual à das cinzas volantes e todas as demais se mantêm abaixo, ou seja, absorvem menos água.

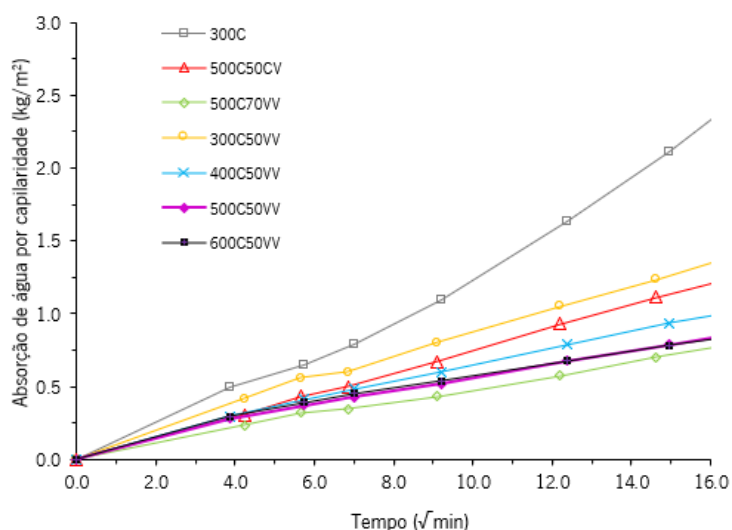


Figura 39 – Absorção capilar após cura de 28 dias, 4 horas iniciais.

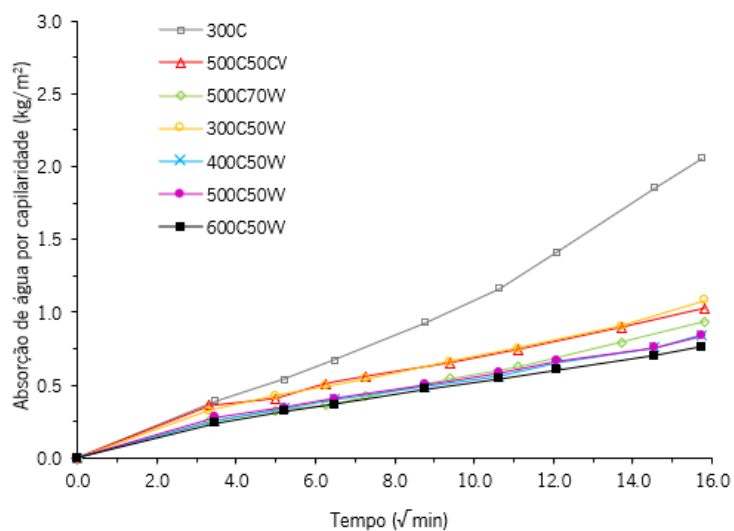


Figura 40 – Absorção capilar após cura de 90 dias, 4 horas iniciais.

A Figura 41, apresenta o coeficiente de absorção capilar aos 28 e 90, além da classificação quanto ao nível de absorção conforme apresentado no item 2.4.4.3.3.1

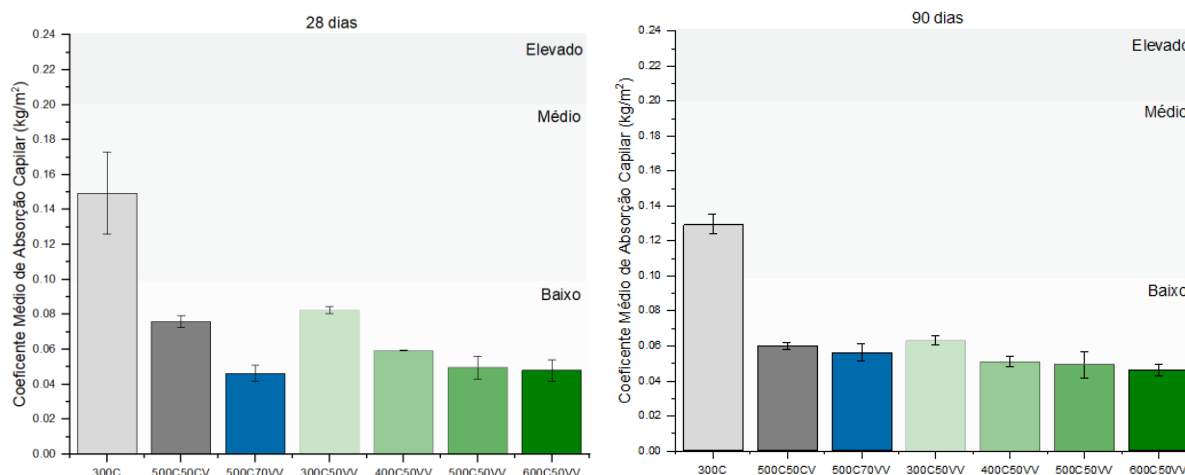


Figura 41 – Coeficiente de absorção capilar aos 28 e 90 dias.

Ao medir o coeficiente de absorção capilar usando os intervalos de tempo propostos por Browne (1991) e apresentados em 2.4.4.3.3.1, é possível classificar a absorção do betão, como apresentado na Figura 41. Os resultados obtidos demonstram que o valor "S" para todas as misturas contendo pó de vidro está dentro da faixa relativa à baixa absorção (abaixo de $0,1 \text{ mg/mm}^2 \times \text{min}^{0,5}$), melhor que o betão de referência, que se enquadra na classe média de absorção. Esta situação é a mesma tanto aos 28, quanto aos 90 dias.

Aos 90 dias, foram registados percentuais de redução na absorção capilar dos provetes com pó de vidro entre 51,2% (300C50VV) e 64,5% (600C50VV), quando comparados com o betão de referência (300C). Estes resultados são condizentes com os apresentados por Deepa Paul et al. (2022) que obteve uma redução de 18% no percentual de absorção capilar, para betão com 40% de substituição do cimento por pó de vidro, e por Du and Tan (2014) que demonstraram em seus ensaios que a profundidade de penetração de água diminuiu continuamente com um maior teor de pó de vidro. Em comparação com o betão simples, a profundidade de penetração de água foi reduzida em 54%, 65%, 68% e 80% para os níveis de substituição de cimento de 15%, 30%, 45% e 60%, respectivamente.

4.4 Absorção de água por imersão

A Figura 42 apresenta o valor médio do coeficiente de absorção de água por imersão obtido para três amostras, aos 28 e 90 dias, além da classificação da qualidade do betão, quanto a porosidade aberta, de acordo com a Associação Francesa de Engenharia Civil, apresentada no item 2.4.4.3.3.2.

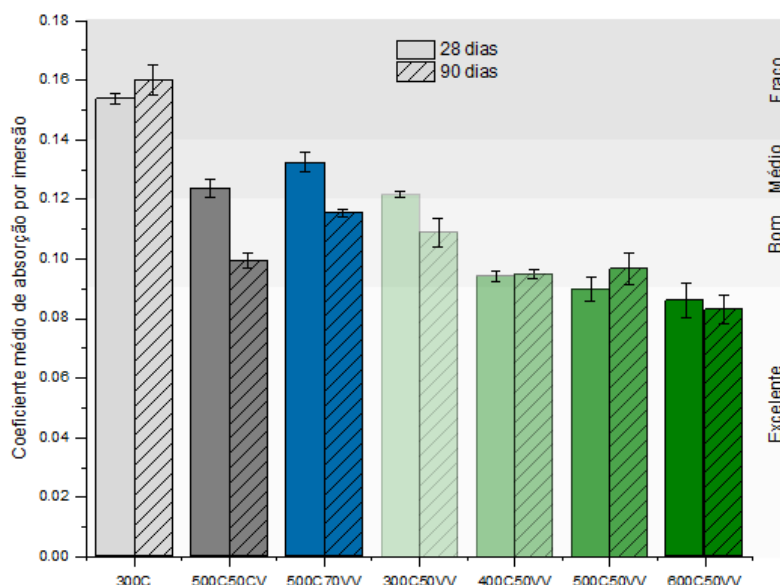


Figura 42 – Coeficiente de absorção por imersão aos 28 e 90 dias.

Observando a Figura 42, os betões com substituição de cimento por PV apresentam melhor desempenho em termos de porosidade aberta em comparação ao betão de referência, sem adições. Dentre as composições contendo PV a que apresenta o pior resultado é a que contém 70% (500C70VV), tanto aos 28 quanto aos 90 dias. Pode-se também notar que à medida que se eleva a dosagem de ligante existe uma tendência de melhoria no coeficiente, ou seja, dentre os betões com 50% de PV pode-se notar que o pior deles é o 300C50VV (300 kg de ligante), em seguida o 400C50VV, 500C50VV e finalmente 600C50VV.

Ainda na Figura 42, outra observação relevante é em relação as cinzas volantes. Aos 28 dias, com exceção da composição 500C70VV (70% de PV) todas as demais composições contendo vidro apresentam melhor desempenho. Aos 90 dias existe uma tendência semelhante, tendo apenas as composições 500C70VV e 300C50VV apresentado coeficientes piores que os da composição de cinzas volantes.

A Figura 42 classifica os resultados obtidos de acordo com a classificação da Associação Francesa de Engenharia Civil. De acordo com essa classificação, o betão com 0% de PV (300C) se enquadra na categoria "fraca". No entanto, o uso de 70% de PV (500C70VV) eleva a categoria do betão para "médio". À medida que o teor de aglomerante aumenta, a categoria do betão também aumenta, ficando os betões com 50% de PV entre a classe boa (300C50VV, 400C50VV e 500C50VV) ou ótima (600C50VV).

As Figura 43 e 44, permitem a comparação entre composições com dosagens equivalentes de ligante.

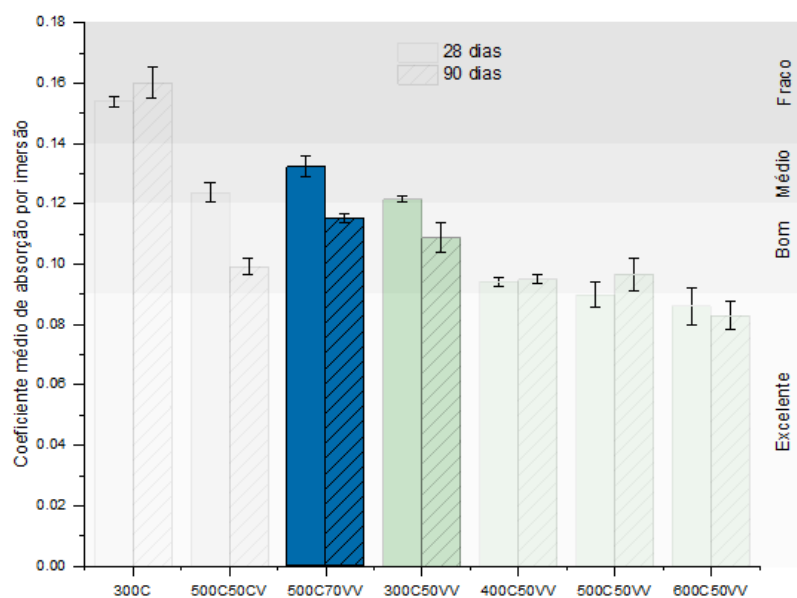


Figura 43 – Comparação entre composições de PV com 150 kg/m³ de cimento, aos 28 e 90 dias.

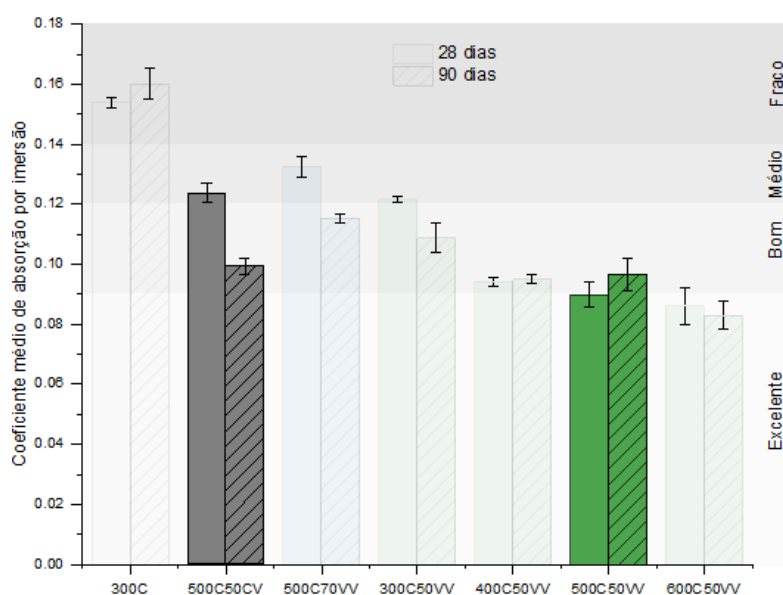


Figura 44 – Comparação CV versus PV com dosagem equivalente, 28 e 90 dias.

Na Figura 43 pode-se notar que entre as composições com PV que têm 150 kg/m³ de cimento, aquela que apresenta melhor resultado é a que possui 50% de vidro. Aos 28 dias, 500C70VV apresenta 13,25% contra 12,16% da 300C50VV, uma diferença de 8,9%. Já aos 90 dias esta diferença é de 6% (11,54 para 10,88). Ou seja, o efeito do maior teor de vidro não resultou em melhoria nos índices de absorção por imersão.

Na Figura 44 pode-se comparar a composição das cinzas volantes (500C50CV) com sua equivalente contendo 50% de vidro (500C50VV). Aos 28 dias as cinzas apresentaram 12,39% contra 9% da PV, uma

diferença de 37,6%, ou seja o vidro demonstrou ser bem melhor. Contudo, aos 90 dias esta diferença encurtou bastante. As cinzas tiveram 9,93% e o vidro 9,67%, apenas 2,6%.

Os resultados obtidos são consistentes com os encontrados por Deepa Paul *et al.* (2022). Em seus estudos, a percentagem de absorção de água diminui com o aumento do teor de pó de vidro. A diminuição percentual na absorção de água foi de 15% para o betão com incorporação de 40% PV. A explicação segundo os autores é: "a diminuição da porosidade com o aumento do teor de pó de vidro se deve à microestrutura porosa densa dos betões com PV, proporcionada pela reação pozolânica do pó de vidro".

Uma vez que o teste de absorção de água por imersão é um indicador da porosidade aberta do betão, pode-se dizer que os betões com 50% de PV, possuem menor porosidade do que os betões de referência. Isto pode explicar os resultados obtidos na resistência mecânica, como pode ser visto nas Figura 45a (28 dias) e 45b (90 dias), em que se relaciona a resistência à compressão com a porosidade aberta das misturas.

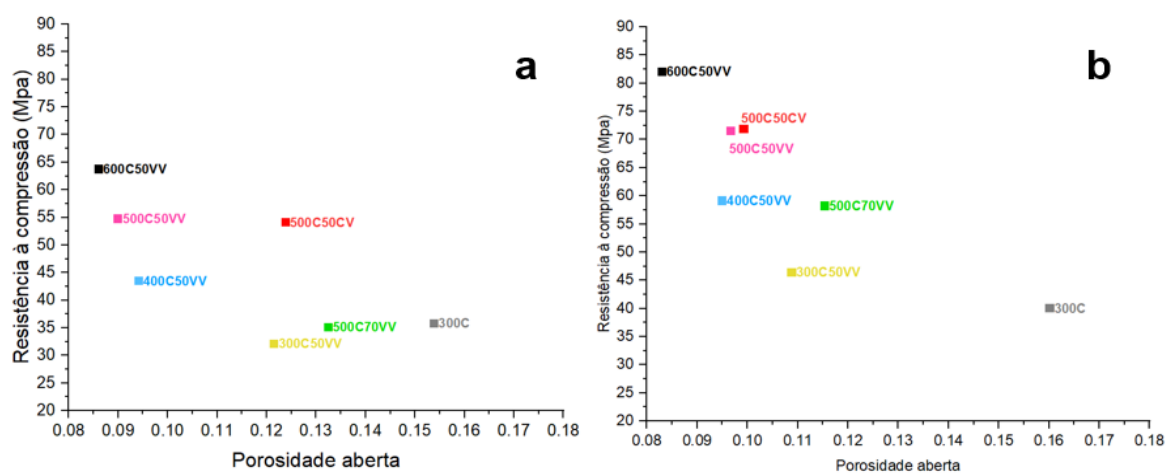


Figura 45 – Correlação entre porosidade e resistência à compressão aos 28(a) e 90(b) dias.

Em uma análise da relação entre resistência à compressão e porosidade aberta, pode-se notar uma estreita relação entre elas. As Figuras 45a (28 dias) e 45b (90 dias) mostram uma tendência clara em direção a resultados de resistência à compressão mais altos para betões menos porosos. Em ambas as figuras pode-se perceber que no caso dos betões com 50% de PV (400C50VV, 500C50VV e 600CVV) apesar de existir uma pequena diferença de porosidade aberta, existe uma razoável diferença na resistência. Isto pode ser explicado pelo facto do maior teor de ligante, mas também demonstra que a relação entre porosidade aberta e resistência à compressão não é linear. Além disso, fica evidente que a porosidade por si só pode não ser um fator determinante para alcançar alta resistência.

Ao se comparar o betão com cinzas volantes (500C50CV) e seu equivalente em PV (500C50VV), aos 28 dias se nota uma resistência similar, 54,05 MPa e 54,74 MPa respetivamente, porém com porosidades diferentes, 12,39% para as cinzas e 9,0% para o PV. Aos 90 dias esta situação se altera para praticamente uma igualdade, não só na resistência quanto também na porosidade, 71,81 MPa e 71,50 MPa para 9,93% e 9,67% respetivamente. A provável explicação para este acontecimento reside no facto das cinzas apresentarem uma reação pozolânica mais lenta, ocasionando uma melhora significativa em sua porosidade.

A análise combinada dos resultados obtidos a partir da absorção de água por imersão (Figura 42) e dos testes de absorção capilar (Figura 41) permite traçar um perfil macroestrutural do comportamento da rede porosa nos betões estudados. Em geral, o betão de referência apresenta maior porosidade aberta (poros interconectados) em comparação com os betões com 50% PV. No entanto, a diferença mais significativa parece estar na distribuição dos poros. Observando os perfis de absorção nas Figura 37 e 38, pode-se notar um comportamento distinto entre o betão de referência e os betões com SCM's. A quantidade de poros de maiores dimensões acessíveis é significativamente maior no betão de referência em comparação com os betões com SCM's. Isso resulta em uma diferença notável na taxa de absorção capilar (Figura 41).

4.5 Carbonatação acelerada

A Figura 46 e a Tabela 17 (fotos) representam a evolução da profundidade de carbonatação aos 0, 30, 60 e 90 dias. O marco inicial "0" foi registado na data em que os provetes foram colocados na câmara de carbonatação, conforme item 3.4.3.3. As medidas seguintes foram registadas aos 30, 60 e 90 dias após esta data.

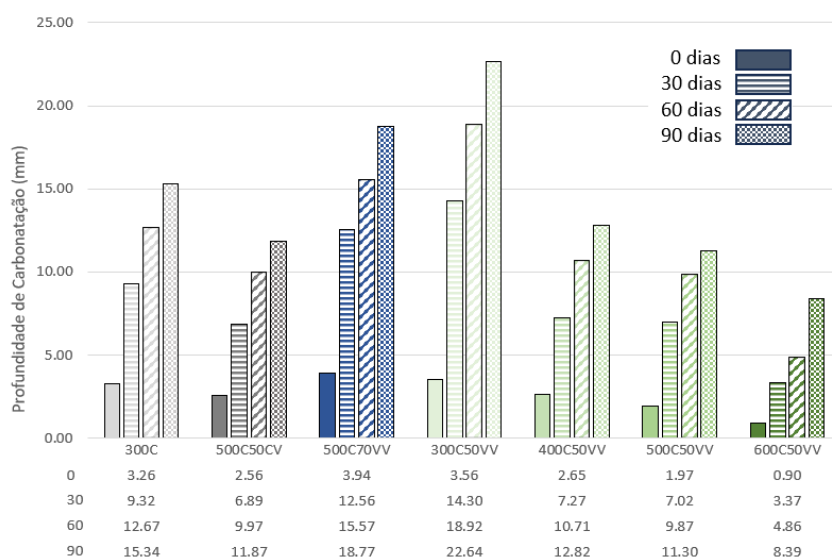
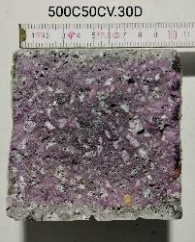
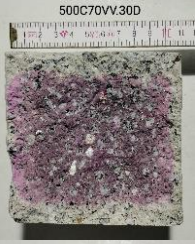
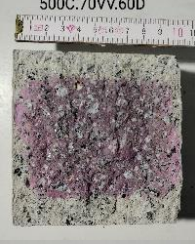
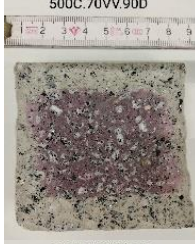
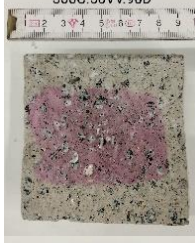
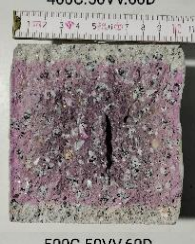
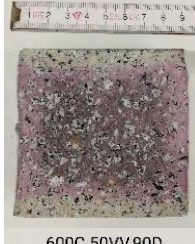
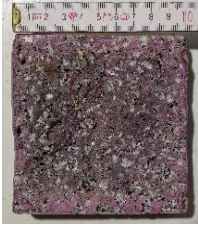
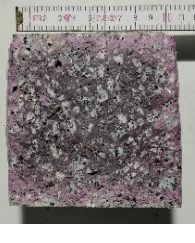
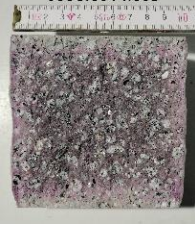


Figura 46 – Evolução da profundidade de carbonatação das composições.

Tabela 17 – Fotos da evolução da carbonatação das composições.

Composição	0 Dias	30 Dias	60 Dias	90 Dias
300C	REF.300C.12JUN 	REF300C.30D 	300C.60D 	300C.90D 
	CV.12JUN 	500C50CV.30D 	500C.50CV.60D 	500C.50CV.90D 
500C50CV	500.70.12JUN 	500C70VV.30D 	500C.70VV.60D 	500C.70VV.90D 
	300.50.12JUN 	300C50VV.30D 	300C.50VV.60D 	300C.50VV.90D 
500C70VV	400.50.12JUN 	400C50VV.30D 	400C.50VV.60D 	400C.50VV.90D 
	500.50.12JUN 	500C50VV.30D 	500C.50VV.60D 	500C.50VV.90D 
300C50VV	600.50.12JUN 	600C50VV.30D 	600C.50VV.60D 	600C.50VV.90D 
400C50VV				
500C50VV				
600C50VV				

Conforme pode-se observar na Tabela 17 e na Figura 46, as composições 500C70V e 300C50V apresentaram comportamento pior que o da referência, em termos de carbonatação, em qualquer idade. Em média, a referência (300C) atingiu 3,26 mm / 9,32 mm / 12,67 mm / 15,34 mm aos 0, 30, 60 e 90 dias respectivamente. A composição 500C70V atinge 3,94 mm / 12,56 mm / 15,57 mm / 18,77 mm nestas idades e a composição 300C50V registou 3,56 mm / 14,30 mm / 18,92 mm / 22,64 mm.

As composições 400C50V e 500C50V apresentam um comportamento similar ao obtido pela composição das cinzas volantes 500C50CV. Em todas as idades, estas três composições registraram profundidade de carbonatação ligeiramente melhor que o da referência, aproximadamente em torno de 20% menor.

Já a composição 600C50V apresenta um desempenho bastante melhor, tanto em relação à referência quanto em relação às cinzas volantes, em todas as idades. Registou-se 0,90 mm / 3,37 mm / 4,86 mm / 8,39 mm em média aos 0, 30, 60 e 90 dias respectivamente.

As composições com PV (400C50V e 500C50V) apresentam um comportamento quanto a carbonatação bastante semelhante ao obtido pelas CV (500C50CV), o que é algo interessante pois têm dosagem de cimento igual ou um pouco abaixo (50 kg/m^3 a menos no caso da 400C50V) e em princípio haveria uma tendência de que com a introdução do PV, piorasse o comportamento na carbonatação. Este fato pode estar relacionado com a menor permeabilidade destas composições. Em uma análise conjunta das Figuras 42 e 46, pode-se notar que as composições com PV (400C50V e 500C50V) apresentam porosidade entre 2,6% e 4,4% menor que a composição das CV (500C50CV).

Segundo os estudos de Matos (2010) e Guo *et al.* (2020), W. Ashraf (2016) e Reis (2022) a utilização de SCM's provoca a diminuição do hidróxido de cálcio gerando um aumento na profundidade de carbonatação, o que se verifica apenas nos resultados das composições (500C70V) e (300C50V). A demais composições aqui estudadas apresentaram melhora na carbonatação. Uma possível explicação para este facto está na idade dos ensaios. As composições contendo CV e PV apresentam reações pozolâncias lentas, porém têm ganhos consistentes de resistência após os primeiros 28 dias. Aquelas composições que foram submetidas ao ensaio de carbonatação, em idades que ainda não estavam plenamente desenvolvidas, conforme pode-se ver na Figura 33, acabaram por sofrer mais carbonatação. As composições que tiveram resultados melhores foram justamente as que mais se desenvolveram de forma precoce. A solução ideal para isolar este efeito, devido ao facto do PV ter um desenvolvimento a longo prazo, seria executar novamente estes ensaios após cura de pelo menos 180 dias.

É importante também destacar que a composição com maior carbonatação (300C50V), dentre todas aos 90 dias, registou 22,64 mm de profundidade. Considerando os recobrimentos usualmente praticados, seria possível afirmar que, ainda assim, não inviabiliza a implementação da solução. Existem alternativas para proteger as estruturas da ação da carbonatação e talvez, em alguns casos especiais, seria recomendado fazê-lo. A utilização de uma percentagem de cal na mistura, a fim de aumentar a disponibilidade de hidróxido de cálcio disponível para reação, como já acontece para as cinzas volantes (Reis, 2022), também deve ser estudada neste caso.

4.6 Difusão de cloretos

A Figura 47 mostra os resultados do coeficiente de difusão de cloretos para os betões estudados. Os resultados correspondem à média dos três provetes testados.

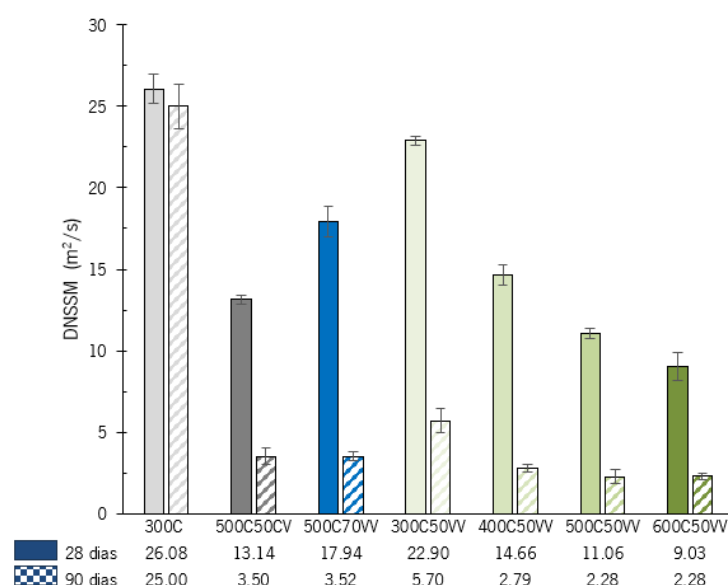


Figura 47 – Coeficiente de difusão de cloretos por migração aos 28 e 90 dias.

De acordo com a Figura 47, é evidente a influência do uso de PV no coeficiente de difusão de cloretos. Existe uma clara tendência de redução no coeficiente de difusão de cloretos para betões com PV. Essa redução é maior com uma maior quantidade de aglomerante usado. Existe também uma clara redução entre os 28 e 90 dias em todos os betões com PV.

Aos 28 dias, a mistura com a menor diferença para o betão de referência foi a 300C50VV, que ainda assim permitiu uma redução de 13,9% (26,08 para 22,90). Aos 90 dias o cenário é o mesmo, porém a diferença aumenta para 438,6% (25,0 para 5,7). É importante notar que este betão tem apenas 150 kg/m³ de cimento (metade do que o betão de referência tem), o que torna os resultados ainda mais relevantes. A composição 600C50VV foi a que apresentou os melhores resultados em ambas as idades, com redução de 26,08 para 9,03 (288,9%) aos 28 dias e 25,0 para 2,28 (1096,5%) aos 90 dias.

As Figuras 48a e 48b apresentam uma comparação entre betões com a mesma quantidade total de cimento.

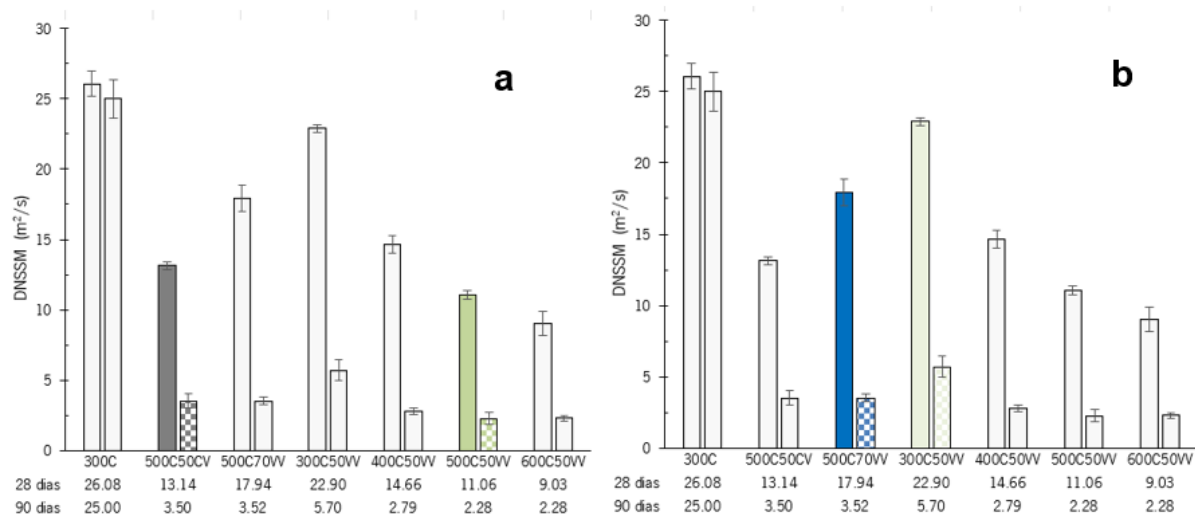


Figura 48 – Coeficiente de difusão de cloretos por migração aos 28 e 90 dias.

Na Figura 48a a composição com cinzas volantes (500C50CV) é confrontada com sua equivalente contendo PV (500C50VV). Percebe-se que o vidro apresenta um resultado ligeiramente melhor em ambas as idades.

Já na Figura 48b a comparação entre as duas composições contendo 150 kg/m³ de cimento, 500C70VV (70% de PV) e 300C50VV (50% de PV) os resultados demonstram que a composição com maior teor de vidro obteve um resultado melhor em termos da difusão de cloretos.

Esses resultados corroboram com pesquisas anteriores (D.Paul, 2022 e H.Du, 2015). Para uma proporção de substituição de cimento de 40% por pó de vidro, o betão modificado de Deepa Paul *et al.* (2022) obteve uma redução de 37,5% na permeabilidade de cloreto em 28 dias. Du *et al.* (2015) obtiveram uma redução de 90% na migração de íons de cloreto em betão com 60% de pó de vidro como substituição de cimento em comparação com espécimes de referência sem pó de vidro.

A resistência à penetração de íons cloreto para betão de pó de vidro foi proporcionada pelo efeito de preenchimento devido ao reduzido tamanho das partículas de vidro, com diferentes dosagens de ligante e, portanto, otimização do empacotamento granular, além da atividade pozolânica, que fornece C-S-H extra e diminui ainda mais o tamanho e a conectividade dos poros.

Na tentativa de relacionar a resistência à penetração de cloreto com as características do betão, a Figura 49 apresenta o coeficiente de difusão de cloreto por migração dos betões estudados em função da resistência à compressão e da porosidade aberta.

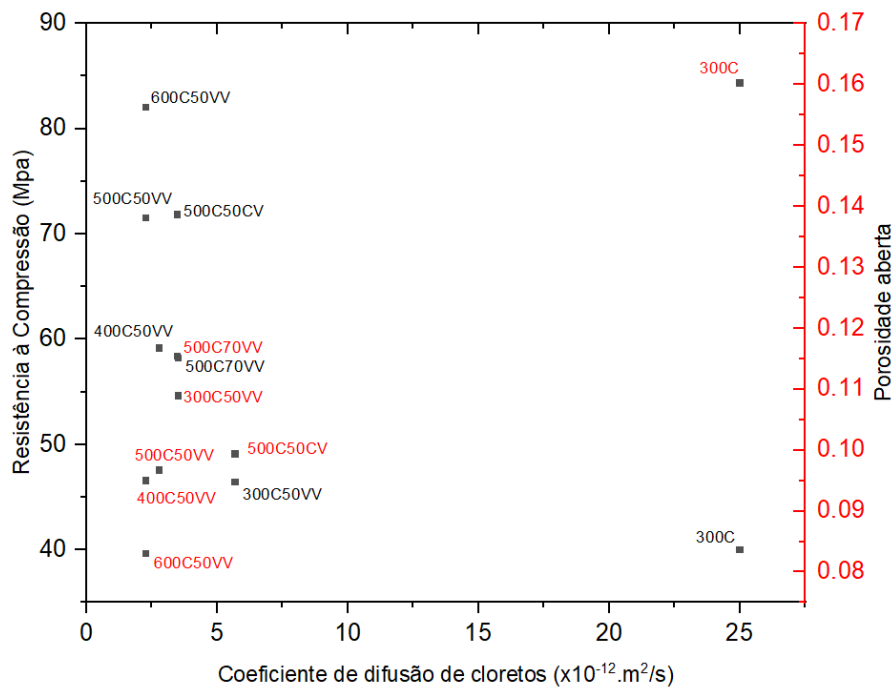


Figura 49 – Relação entre porosidade x resistência x difusão de cloretos aos 90 dias.

A Figura 49 mostra que os betões com coeficientes de difusão de cloreto mais elevados (menor resistência à penetração de cloreto) são aqueles com maior porosidade aberta e baixa resistência à compressão. Comparando o coeficiente de difusão de cloreto do betão de referência, 300C, com o pior resultado para os betões com incorporação de PV, 300C50VV, observa-se que a porosidade tem uma influência maior. Nesse aspeto, a incorporação de PV é vantajosa porque o efeito de preenchimento proporcionado pelo seu uso reduz a porosidade, independentemente do índice de atividade.

Ao comparar apenas os dados dos betões com incorporação de 50% de PV (300C50VV, 400C50VV, 500C50VV e 600C50VV), observa-se a seguinte relação: alto teor de aglomerante (cimento mais PV), alta resistência à compressão, baixa porosidade e baixo coeficiente de difusão de cloreto. À medida que o teor de aglomerante é reduzido, observa-se a relação oposta: baixo teor de aglomerante, baixa resistência à compressão, alta porosidade e alto coeficiente de difusão de cloreto.

4.7 Resistividade elétrica

A Figura 50 apresenta o desenvolvimento da resistividade elétrica aos 7, 28 e 90 dias. Os resultados são uma média das leituras (3 linhas em 2 provetes).

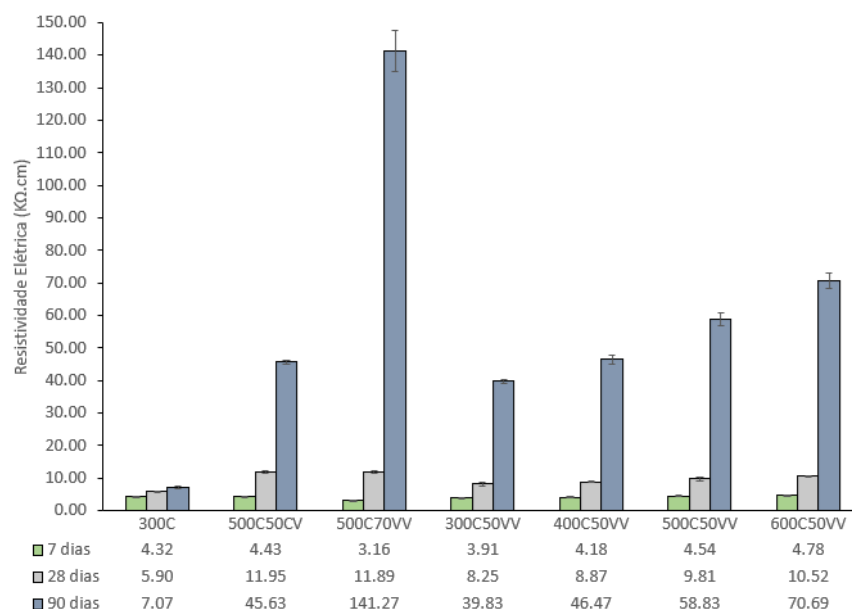


Figura 50 – Evolução da resistividade elétrica aos 7, 28 e 90 dias.

A análise da Figura 50 demonstra que a utilização de cinzas volantes ou PV em betões eleva de maneira considerável a resistividade. Em comparação com o betão de referência, a composição que apresenta o menor desempenho é a 300C50VV, entretanto, ainda assim a diferença é notável, principalmente aos 90 dias. Neste caso temos: -9,5% aos 7 dias, + 39,8% aos 28 dias e + 563,4% aos 90 dias. O desenvolvimento lento das reações pozolânicas do pó de vidro resulta num crescimento exponencial dos valores, principalmente entre as idades de 28 e 90 dias.

Pode-se perceber também que o aumento no teor de PV das composições (entre 300C50VV, 400C50VV, 500C50VV e 600C50VV) produz uma elevação da resistividade, em qualquer idade.

Ao se comparar a composição das cinzas volantes (500C50CV) com sua equivalente em vidro (500C50VV) nota-se que em um primeiro momento (7 dias) os valores são equivalentes, 4,43 e 4,54, respetivamente. Aos 28 dias há uma ligeira superioridade das cinzas, 11,95 e 9,81. Entretanto, aos 90 dias, a situação se inverte e o pó de vidro apresenta valores consideravelmente maiores, 45,63 e 58,83. Há, portanto, um provável desenvolvimento ainda mais lento do pó de vidro daquele que se verifica nas cinzas volantes.

Os resultados obtidos são similares aos de Kamali *et al.* (2015). Em seus estudos com betões com incorporação de pó de vidro, os autores obtiveram uma melhoria significativa da resistividade elétrica em comparação com o betão de referência e do betão de cinzas volantes. A melhor compacidade do material foi responsável pelo aumento significativo da resistência elétrica, o que se alinha com o conceito de que

os materiais cimentícios formados como resultado de uma reação pozolânica preenchem melhor os poros, contribuindo para o aumento das propriedades mecânicas e da durabilidade das misturas.

4.8 Desempenho geral das composições estudadas

A Tabela 18, a seguir, apresenta um resumo geral do desempenho das composições contendo PV em relação à composição de referência (300C) e às cinzas volantes (500C50CV). Para permitir uma visão macro dos resultados, calculou-se percentualmente a diferença entre os resultados obtidos pelas composições com pó de vidro perante as composições de referência. Importante frisar que na carbonatação, capilaridade, imersão e cloretos o sinal negativo antes dos percentuais representa uma melhoria, porém na resistividade e resistência à compressão ocorre a situação inversa, o menos representa algo pior.

Tabela 18 – Desempenho geral das composições.

Desempenho em relação à referência (300C) – Aos 90 dias						
Composição	Carbonatação	Abs. Capilar	Abs. Imersão	Cloretos	Resistividade	Resistência à compressão
500C70VV	22.4%	-56.4%	-28.0%	-85.9%	1899.1%	45.5%
300C50VV	47,6%	-51.2%	-32.0%	-77.2%	463.7%	16.1%
400C50VV	-16,4%	-60.5%	-40.7%	-88.8%	557.6%	47.8%
500C50VV	-26,3%	-61.8%	-39.6%	-90.9%	732.5%	78.8%
600C50VV	-45,3%	-64.5%	-48.2%	-90.9%	900.3%	105.1%

Desempenho em relação à CV (500C50CV) – Aos 90 dias						
Composição	Carbonatação	Abs. Capilar	Abs. Imersão	Cloretos	Resistividade	Resistência à compressão
500C70VV	58,2%	-6.0%	16.2%	0.8%	209.6%	-19.0%
300C50VV	90,8%	5.2%	9.6%	63.1%	-12.7%	-35.4%
400C50VV	8,0%	-14.8%	-4.4%	-20.1%	1.8%	-17.7%
500C50VV	-4,8%	-17.7%	-2.6%	-34.9%	28.9%	-0.4%
600C50VV	-29,3%	-23.5%	-16.4%	-34.8%	54.9%	14.2%

	Melhora entre 0 e 10%
	Melhora entre 11 e 20%
	Melhora acima de 20%

	Piora entre 0 e 10%
	Piora entre 11 e 20%
	Piora acima de 20%

Em resumo pode-se perceber que em comparação com a referência, as composições com PV se mostraram bastante melhor em praticamente todos os ensaios avaliados (1º quadro). Apenas na carbonatação houve uma deterioração relevante, nas composições com baixo teor de cimento (150 kg/m³). Este facto é importante pois pode vir a exigir critérios de aplicabilidade para viabilizar o uso

destes betões, como por exemplo a elevação da camada de recobrimento ou aplicação de tratamento superficial para evitar a carbonatação.

Em relação a comparação com as cinzas volantes (2º quadro), nota-se que as composições de menor teor de cimento 300C50V e 500C70V são piores em quase todos os ensaios. Mas isto deve ser relativizado pois há uma importante diferença na dosagem de cimento entre elas. A com CV têm 250 kg/m³ e as citadas composições com PV têm apenas 150 kg/m³. Uma comparação mais coerente ocorre com as composições 400C50V (50 kg a menos de cimento), 500C50V (dosagem igual) e 600C50V (50 kg a mais de cimento). Neste caso, o cenário é totalmente diferente. A mistura 400C50V tem menos cimento e ainda assim esteve próxima das CV, perdendo apenas na resistência à compressão e na carbonatação. Já a 500C50V, que possui dosagem de cimento igual, se mostra melhor em praticamente todos os ensaios, exceto na compressão onde a diferença foi insignificante. E, por último, a 600C50V, tem melhores resultados em todos os quesitos. Pode-se, portanto, dizer que há possibilidade de substituir as CV por PV em betões sem comprometer sua resistência e durabilidade, com critérios e ajustando a composição aos objetivos desejados.

4.9 Avaliação da sustentabilidade

A avaliação dos impactos ambientais de uma composição de betão depende de uma série de fatores, que variam consideravelmente de acordo com os fabricantes dos insumos, a dosagem utilizada e ou mesmo o local de sua produção. Uma análise do ciclo de vida (LCA), considerando as condições utilizadas localmente seria o ideal, e é inclusive recomendada. Entretanto, para uma avaliação preliminar, buscou-se avaliar as composições de betão utilizadas nesta campanha, considerando valores referenciais apresentados por outros autores (Onyelowe 2022; Guignone 2022, Isaia 2004, Jones 2011, Reis 2012, Teixeira 2016) conforme Tabela 19.

Tabela 19 – Valores de referência utilizados na simulação de desempenho sustentável.

Material	Transporte (km)	Custo (€/t)	Consumo energia (kwh/kg)	Emissão de CO₂ (kg.t)
Cimento	85	170,40	1,6056	1090,00
CV	300	20,00	0,0833	10,00
PV	20	2,50	0,0118	2,06
Areia	300	19,00	0,0250	3,00
Brita	15	18,00	0,0389	4,00
SP	575	5300,00	4,1750	94,00
Água	0	2,10	0,3139	5,00

1. Preços consultados em www.Odifercol.pt, em novembro de 2023.
2. Distância entre fabricante e produção de betão. Volume transportado depende do meio utilizado.
3. Custo do PV foi considerado apenas o referente aos gastos com sua moagem e transporte, visto que se trata de um resíduo fornecido gratuitamente.
4. Moagem do PV consome 0,01180 kwh/kg (Guignone 2022)
5. Custo energia 0,192 €/kwh (EDP Comercial)
6. Fator de emissão da eletricidade em Portugal 0,175 kg CO₂/kwh (APA 2022)
7. Referências de consumo e emissão dos materiais exceto o PV (Isaia, 2004; Jones, 2011; Teixeira, 2016)
8. Transporte custo médio regional: € 0,02/t.km⁻¹; Consumo de Energia: 1,4 MJ/t. km⁻¹; Emissão de CO₂: 0,045 kg/t.km⁻¹ (Isaia, 2004)

Para analisar a sustentabilidade dentre as soluções experimentais avaliadas, utilizou-se da metodologia MARS-SC – “*Methodology for the Relative Sustainability Assessment of Building Technologies*” (Mateus et al., 2013). A metodologia processa-se em cinco etapas: definição dos indicadores de sustentabilidade; quantificação dos indicadores; normalização dos indicadores; agregação dos indicadores; cálculo da avaliação global.

Os indicadores de sustentabilidade utilizados foram: económicos, ambientais e funcionais. Cada um deles consideram alguns parâmetros para avaliação, aos quais são atribuídos pesos na representatividade geral, conforme Tabela 20. Através da atribuição de pesos a cada um dos indicadores/parâmetros é possível estabelecer uma nota de sustentabilidade para cada uma das misturas estudadas. É importante salientar que os pesos atribuídos podem variar conforme a necessidade, ajustando os critérios à realidade ou mesmo exigências específicas de cada aplicação prática. Ou seja, são flexíveis e devem ser ajustados de acordo com a demanda. A atribuição destes pesos poderá vir a representar alterações significativas na nota de sustentabilidade final. Como dito antes, para o bom proveito da solução é preciso ajustar a dosagem do betão à sua demanda, ajustando suas características de acordo com a sua aplicação, desta forma será possível tirar mais proveito dos materiais e evitar desperdício.

Para exemplificar a utilização da metodologia, definiu-se seis cenários hipotéticos, com pesos diferentes estabelecidos para adequar a análise à situação prática.:

Cenário 1: betão exposto a ação de água do mar, sendo, portanto, dado maior peso ao item “cloretos (CL)” dentre os parâmetros funcionais e com relevância aos indicadores ambientais (50%) da nota sustentável.

Cenário 2: betão exposto a esforços mecânicos importantes, justificando, portanto, a atribuição de peso maior ao parâmetro funcional “resistência à compressão (RC)” e com relevância aos indicadores ambientais (50%) da nota sustentável.

Cenário 3: betão aplicado em uma área industrial sujeito a elevada concentração de CO₂ no ar, sendo neste caso dado maior peso ao parâmetro “carbonatação” dentre os funcionais e com relevância aos indicadores ambientais (50%) da nota sustentável.

Cenário 4: betão exposto a ação de água do mar, sendo, portanto, dado maior peso ao item cloretos dentre os parâmetros funcionais e com relevância aos indicadores funcionais (50%) da nota sustentável.

Cenário 5: betão exposto a esforços mecânicos importantes, justificando, portanto, a atribuição de peso maior ao parâmetro funcional “resistência à compressão (RC)” e com relevância aos indicadores funcionais (50%) da nota sustentável.

Cenário 6: betão aplicado em uma área industrial sujeito a elevada concentração de CO₂ no ar, sendo neste caso dado maior peso ao parâmetro “carbonatação” dentre os funcionais e com relevância aos indicadores funcionais (50%) da nota sustentável.

Tabela 20 – Parâmetros Sustentáveis e seus respectivos pesos.

Indicador	Parâmetro	Peso Indicador	Pesos Parâmetros		
			Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Ambiental	Potencial aquecimento global (PAG)	0,50	0,40	0,40	0,40
	Energia primária incorporada (PEC)		0,60	0,60	0,60
Funcional	Resistência à compressão (RC)	0,30	0,20	0,30	0,20
	Absorção Capilar (AC)		0,15	0,15	0,15
	Absorção Imersão (AI)		0,20	0,15	0,15
	Carbonatação (CB)		0,05	0,10	0,30
	Cloretos (CL)		0,30	0,20	0,10
	Resistividade (RS)		0,10	0,10	0,10
Econômico	Custo de produção (CP)	0,20	1,00	1,00	1,00
Indicador	Parâmetro	Peso Indicador	Pesos Parâmetros		
			Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
Ambiental	Potencial aquecimento global (PAG)	0,30	0,40	0,40	0,40
	Energia primária incorporada (PEC)		0,60	0,60	0,60
Funcional	Resistência à compressão (RC)	0,50	0,20	0,30	0,20
	Absorção Capilar (AC)		0,15	0,15	0,15
	Absorção Imersão (AI)		0,20	0,15	0,15
	Carbonatação (CB)		0,05	0,10	0,30
	Cloretos (CL)		0,30	0,20	0,10
	Resistividade (RS)		0,10	0,10	0,10
Econômico	Custo de produção (CP)	0,20	1,00	1,00	1,00

Sobre as composições das misturas experimentais constantes na Tabela 15 (inventário dos materiais), foram aplicados os valores presentes na Tabela 19. Determinando assim, os indicadores econômicos e ambientais. Os indicadores funcionais foram definidos através dos resultados apresentados nos ensaios

laboratoriais, sendo considerados para esta finalidade os dados referentes aos 90 dias de cura. O custo de produção (CC) levou em consideração apenas os gastos com materiais e transporte, não sendo considerados os custos com a mão de obra. Os resultados são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 – Parâmetros sustentáveis e seus respectivos valores calculados, por composição.

Composição	Indicador Ambiental		Indicador Funcional						Indicador econômico
	PAG (kgCO _{2eq})	PEC (kwh)	RC (Mpa)	AC (kg/m ²)	AI	CB (mm)	CL (×10 ⁻¹² m ² /s)	RS (KΩ.cm)	CC (€/m ³)
300C	342,70	677,29	40,00	0,13	0,16	15,34	25,00	7,07	84,74
500C50CV	291,38	633,51	71,81	0,06	0,09	11,87	3,49	45,63	125,14
500C70VV	178,34	439,03	58,18	0,05	0,11	18,77	3,52	141,27	103,65
300C50VV	180,82	447,41	46,42	0,06	0,10	22,64	5,70	39,83	91,56
400C50VV	233,88	520,89	59,12	0,05	0,09	12,82	2,79	46,47	106,05
500C50VV	287,37	600,09	71,50	0,04	0,09	11,30	2,27	58,83	122,45
600C50VV	340,98	677,95	82,03	0,04	0,08	8,39	2,27	70,69	139,26

Avaliando-se os dados obtidos, em termos de emissões de kgCO_{2eq} (PAG), percebe-se que à medida que houve redução no teor de cimento, houve redução considerável nos índices. As composições com 150 kg/m³ de cimento (300C50VV e 500C70VV) obtiveram 178,34 kgCO_{2eq} e 180,82 kgCO_{2eq} respectivamente, e o betão de referência (300C) apresentou 342,70 kgCO_{2eq}, ou seja, reduções na ordem de 47%. (164,36 kgCO_{2eq} por m³). No caso do betão 500C50VV a redução foi de 16% e no betão 600C50VV, pior caso, foi de 1% (1,72 kgCO_{2eq} por m³). Lembrando que os volumes estimados de produção de betão mundial se aproximam de 14 bilhões de metros cúbicos, a economia total final pode ser muito relevante, mesmo na pior composição. Os valores do custo de produção (CC) destes betões estão dentro da média praticada no mercado e não comprometem a implementação das soluções. Há que se considerar também os benefícios gerados na economia energética (PEC), que podem chegar a 238,26 kwh por m³ (300C50VV).

Para evitar os efeitos de escala na agregação dos parâmetros dos diferentes indicadores e para minimizar a possibilidade de avaliações contraditórias, onde alguns parâmetros podem ser do tipo

"quanto maior é melhor" e outros "menor é melhor", foi necessário normalizar os indicadores através da expressão de Diaz-Balteiro, equação 4.

$$Pn = \frac{Pi - Pp}{Pm - Pp} \forall i \quad (4)$$

Pn representa o resultado normalizado, Pi o resultado do parâmetro individual, Pp o pior dos resultados e Pm o melhor dos resultados. A normalização, Tabela 22, converte os valores numa escala delimitada entre 0 (pior valor) e 1 (melhor valor) e torna o valor de cada indicador sem dimensão.

Tabela 22 – Parâmetros sustentáveis normalizados.

Composição	Indicador Ambiental		Indicador Funcional						Indicador económico
	PAG	PEC	RC	AC	AI	CB	CL	RS	CC
300C	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.513	0.000	0.000	1.000
500C50CV	0.312	0.186	0.757	0.831	0.789	0.756	0.946	0.287	0.259
500C70VV	1.000	1.000	0.433	0.874	0.580	0.271	0.945	1.000	0.653
300C50VV	0.985	0.965	0.153	0.794	0.665	0.000	0.849	0.244	0.875
400C50VV	0.985	0.657	0.455	0.937	0.845	0.689	0.977	0.294	0.609
500C50VV	0.662	0.326	0.749	0.958	0.823	0.795	1.000	0.386	0.308
600C50VV	0.010	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.474	0.000

Desta forma, permitiu-se desenvolver diagramas do tipo radar, o que facilita a interpretação dos resultados, Figura 51 (composições comparadas ao betão de referência) e Figura 52 (composições comparadas às CV).

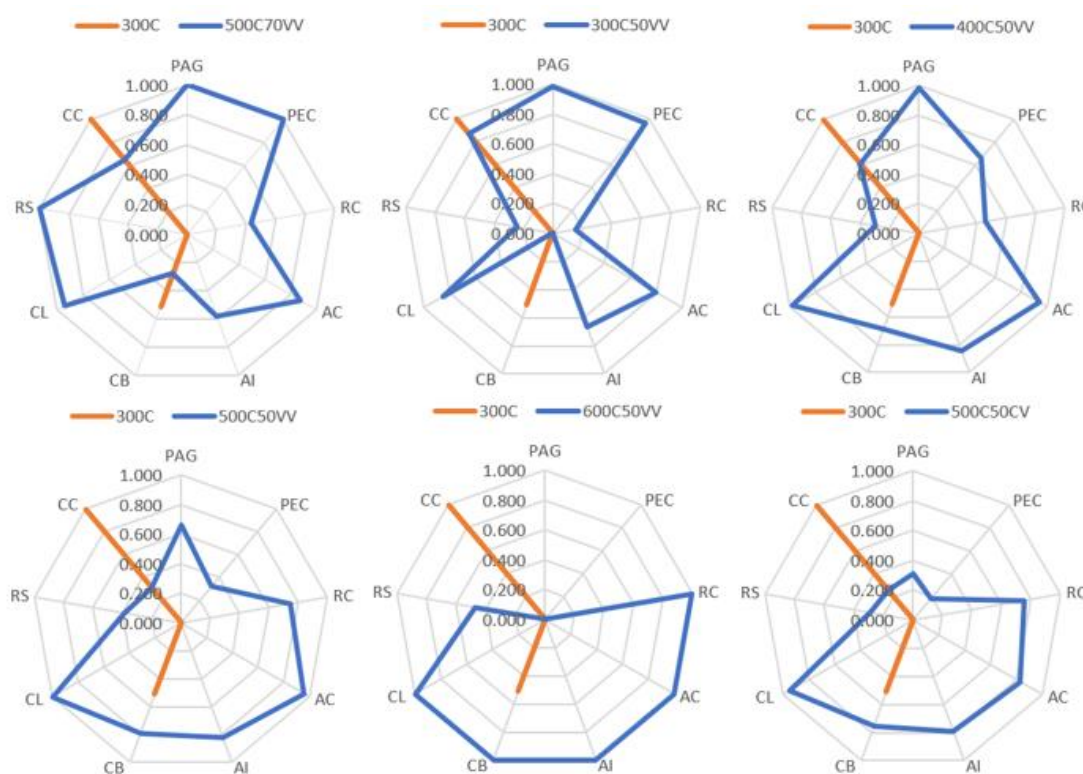


Figura 51 – Indicador sustentável das composições comparadas ao betão de referência.

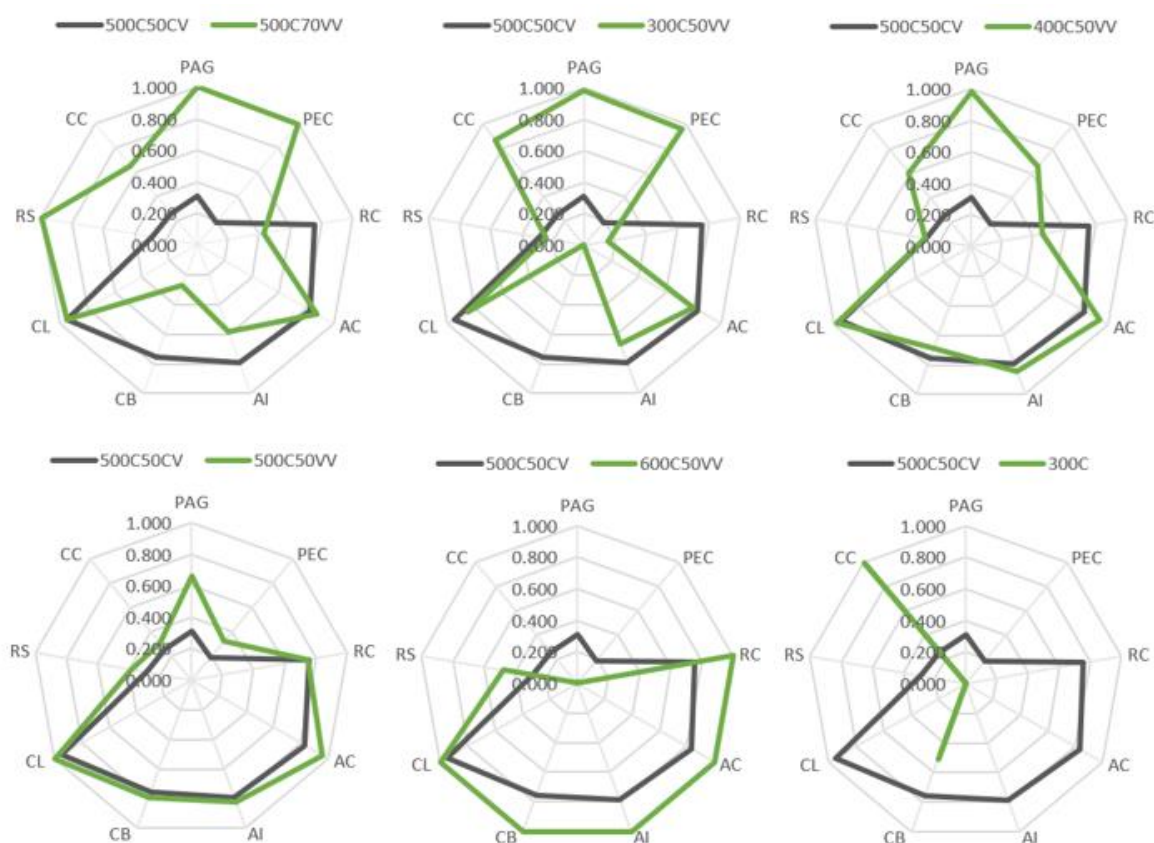


Figura 52 – Indicador sustentável das composições comparadas ao betão de CV.

Avaliando-se as Figuras 51 e 52, pode-se perceber que tanto em relação ao betão convencional quanto em relação ao betão CV, as soluções de betão com pó de vidro, apresentam boas qualidades para substituição, variando as aptidões caso a caso de acordo com a demanda. Nota-se que as composições com maior redução no teor de cimento (300C50VV, 500C70VV e 400C50VV) demonstram um viés mais voltado para questões ambientais, sem comprometer os fatores funcionais e económicos. Já as composições com maiores dosagens de cimento (500C50VV e 600C50VV) se mostram aptas a aplicações onde as demandas funcionais são mais exigentes, tendo menos benefícios ambientais que as demais, porém ainda assim sendo benéficas.

Para permitir uma visão geral, os parâmetros sustentáveis foram então submetidos à agregação dos pesos atribuídos aos indicadores, Tabela 21, conforme equação 5.

$$NS = w_f \cdot I_{funcional} + w_a \cdot I_{ambiental} + w_e \cdot I_{económico} \quad (5)$$

Onde:

NS = nota sustentável

w_f = peso indicador funcional

w_a = peso indicador ambiental

w_e = peso indicador econômico

I = valor do respectivo indicador

Definiu-se assim as notas sustentáveis de cada uma destas composições. A tabela 23 apresenta os resultados obtidos para os diversos cenários.

Tabela 23 – Notas sustentáveis das composições de acordo com cenário proposto.

Composição	Nota Sustentável					
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
300C	0.209	0.216	0.247	0.213	0.226	0.277
500C50CV	0.405	0.399	0.393	0.515	0.505	0.495
500C70VV	0.850	0.830	0.805	0.796	0.763	0.721
300C50VV	0.830	0.799	0.769	0.748	0.696	0.646
400C50VV	0.743	0.725	0.724	0.737	0.707	0.704
500C50VV	0.543	0.535	0.530	0.618	0.605	0.597
600C50VV	0.286	0.286	0.286	0.475	0.475	0.475

A Figura 53 representa uma visão geral sobre a influência dos indicadores ambiental, económico e funcional no valor final da nota sustentável de cada uma das composições, para os diversos cenários estudados.

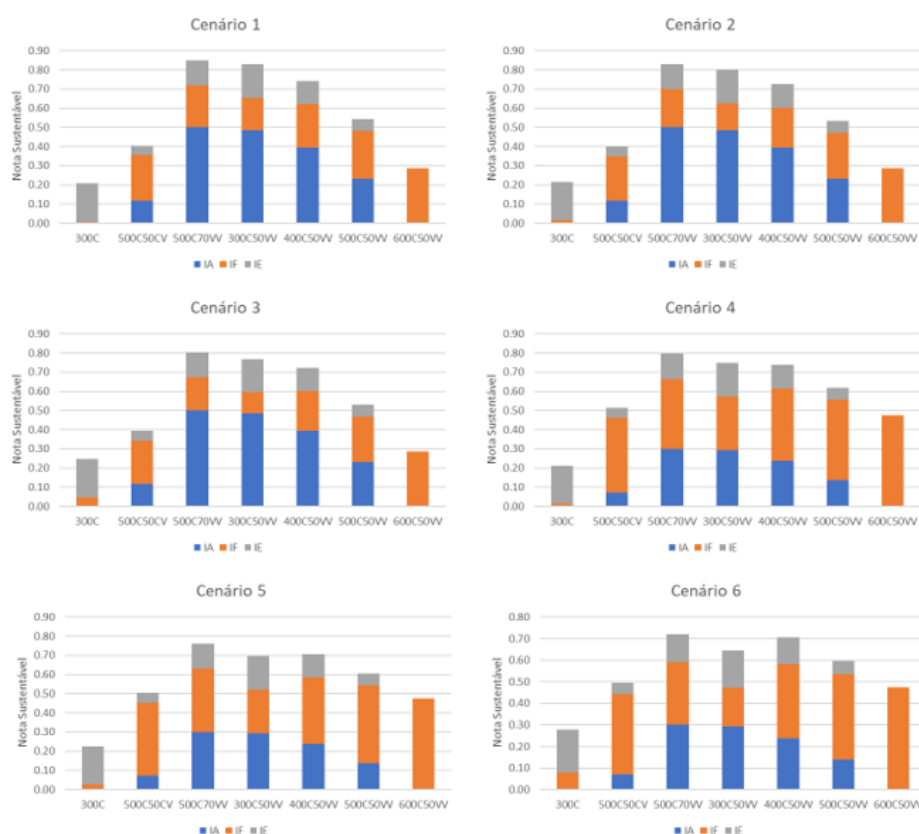


Figura 53 – Distribuição dos indicadores ambiental, económico e funcional por cenário.

Ao analisar a Tabela 23 e a Figura 53, pode-se afirmar que a medida que se reduz o teor de cimento obtém-se maiores benefícios ambientais e que caso os betões estejam sujeitos a maiores níveis de exigências funcionais indica-se composições com maior teor de ligante. Nota-se também que as maiores notas sustentáveis são apresentadas pelos betões 300C50W e 500C70W, justamente aqueles que apresentam o menor teor de cimento (150 kg/m^3) em suas composições. Finalmente, pode-se perceber também que a atribuição dos pesos dos indicadores pode alterar significativamente os resultados.

5 Considerações finais

5.1 Principais conclusões

Foi realizado um estudo experimental sobre a utilização de resíduos de vidro moído (PV) para produzir betão sustentável com baixo teor de cimento, considerando uma alta incorporação de PV (50% e 70%) e com o objetivo de atingir uma resistência à compressão de cerca de 35 MPa (viável para a maioria das aplicações usuais) sem prejudicar seu desempenho em termos de durabilidade.

Com um diâmetro médio do PV (D50) igual a 26 μm , conseguiu-se obter resultados bastante promissores tanto em termos de resistência à compressão quanto aos principais indicadores de durabilidade.

A taxa de absorção capilar de água dos betões com 50% e 70% de PV é significativamente menor do que a taxa do betão de referência. Percebe-se também que, aos 28 dias, quase todas as composições contendo PV apresentam desempenho melhor que aquela contendo CV, com exceção da composição 300C50VV. Contudo, esta situação muda aos 90 dias. Nesta idade, a composição 300C50VV apresenta uma curva praticamente igual à das cinzas volantes e todas as demais se mantêm abaixo, ou seja, absorvem menos água.

Em termos de porosidade aberta (imersão) os betões com substituição de cimento por PV apresentam melhor desempenho em comparação ao betão de referência, sem adições. Pode-se também notar que, à medida que se eleva a dosagem de ligante, existe uma tendência de melhoria no coeficiente, ou seja, dentre os betões com 50% de PV pode-se notar que o pior deles é o 300C50VV (300 kg de ligante), em seguida o 400C50VV, 500C50VV e finalmente 600C50VV. Em relação as cinzas volantes, aos 28 dias, com exceção da composição 500C70VV (70% de PV) todas as demais composições contendo PV apresentam melhor desempenho. Aos 90 dias existe uma tendência semelhante, tendo apenas as composições 500C700VV e 300C50VV apresentado coeficientes piores que os da composição de CV.

A introdução de partículas de vidro permite uma melhor compactação na mistura, reduzindo o teor de vazios. Os resultados de porosidade aberta podem ajudar a explicar os resultados muito bons obtidos nos testes de resistência à compressão.

A avaliação da carbonatação acelerada permite afirmar que as composições com menor teor de cimento (500C70VV e 300C50VV) apresentam resultados piores que os da referência. Todas as demais têm efeito positivo, reduzindo a carbonatação. Na comparação com as cinzas volantes, as composições 400C50VV e 500C50VV mostram-se ligeiramente melhor, mas com certa similaridade. Estas composições apresentam uma redução no teor de cimento (200 kg/m³ e 250 kg/m³) o que é bastante interessante,

pois de um modo geral, a menor taxa de carbonatação indica que apesar das reações pozolânicas do PV reduzirem o hidróxido de cálcio, a baixa permeabilidade mitigou os efeitos danosos, impedindo a difusão de CO_2 .

Quanto aos cloretos, existe uma clara tendência de redução no coeficiente de difusão de cloreto para betões com PV. Essa redução é maior com uma maior quantidade de aglomerante usado. Existe também uma clara redução entre os 28 e 90 dias em todos os betões com PV.

O PV pode vir a ser um bom substituto para as CV. Quando utilizado em dosagens semelhantes às CV (500C50VV) conseguiu obter melhores indicadores de durabilidade e praticamente igualou em termos de resistência mecânica. Com dosagens ligeiramente maiores (600C50VV) o PV é melhor em todos os itens avaliados. O fato de composições PV com dosagens de 150 kg/m^3 terem apresentado resultados, em geral inferiores, não é motivo para descartar as opções. Tem que se levar em consideração a grande diferença de dosagem existente (são 100 kg/m^3 a menos) e também deve-se avaliar para qual finalidade se pretende utilizar o betão, pois os benefícios gerados com a redução do teor de cimento são relevantes e talvez possam justificar seu uso, principalmente quando se leva em consideração a escassez de CV.

Os resultados comprovam que a alta substituição do cimento por PV pode ser uma alternativa viável. Além das vantagens em termos técnicos, o uso de betão com baixo teor de cimento promove a redução das emissões de CO_2 e do consumo de energia relacionado à produção de cimento. As composições com maior redução no teor de cimento (300C50VV, 500C70VV e 400C50VV) demonstram um viés mais voltado para questões ambientais, sem comprometer os fatores funcionais e económicos. Já as composições com maiores dosagens de cimento (500C50VV e 600C50VV) se mostram aptas a aplicações onde as demandas funcionais são mais exigentes, tendo menos benefícios ambientais que as demais, porém ainda assim sendo benéficas.

A incorporação do PV apresenta um desenvolvimento lento da resistência nas primeiras idades, mas a partir dos 28 dias ocorre um ganho significativo, permitindo com que todas as composições em estudo atingissem não só a resistência almejada de 35 MPa, como inclusive superando os valores obtidos pela referência. Dentre as composições estudadas aquela com menor teor de cimento (150 kg/m^3), e com 50% de substituição (300C50VV) atingiu 32,09 MPa em 28 dias e 46,42 MPa aos 90 dias, algo bastante razoável, pois permite uma ampla utilização no mercado. Considerando composições com menor percentual de redução no teor de cimento, pode-se citar a 500C50VV, com 250 Kg/m^3 de cimento, que atinge 71,50 MPa aos 90 dias. Ou seja, em termos de resistência mecânica foi possível obter betões com elevado desempenho e com redução significativa no teor de cimento.

5.2 Sugestões de desenvolvimento futuro

A campanha experimental concentrou-se nos resultados de desempenho mecânico até os primeiros 180 dias. Seria interessante avaliar os resultados em idades mais avançadas (1 ano), pois o PV demonstrou possuir desenvolvimento de resistência em idades avançadas.

No ensaio de carbonatação, os provetes foram submetidos à câmara de CO₂ em idades em que ainda não havia o pleno desenvolvimento das reações pozolânicas do PV. Seria interessante refazer este ensaio para provetes curados pelo menos por 180 dias, antes de iniciar o ensaio.

Os ensaios de durabilidade feitos indicaram uma boa condição do PV. Seria interessante realizar ensaios de microestrutura nos provetes, para entender que tipo de reações ocorreram e tentar justificar com maior assertividade quais foram as razões para os resultados obtidos.

Houve ao longo da campanha uma dificuldade em ajustar a quantidade de água ideal. Seria interessante determinar a relação existente entre o aumento do PV e a redução da demanda hídrica.

O processo de moagem do material apresenta um gasto energético que provavelmente poderá ser reduzido em aplicações industriais. Seria interessante avaliar um procedimento que minimizasse os gastos com a transformação do resíduo em PV, se possível, simulando a escala industrial.

Nesta campanha foi utilizado vidro verde oriundo de embalagens. Seria interessante simular comparações com outros tipos de vidro, de forma a facilitar o processo de obtenção do PV, verificando se há alterações significativas nos resultados.

A utilização de um resíduo como insumo na produção de betão é influenciada por diversos fatores locais. Apesar de ter sido simulado alguns cenários para avaliar a sustentabilidade das composições, seria importante realizar uma campanha de análise do ciclo de vida (LCA) pormenorizada, considerando as condições locais no estudo.

Referências

- A. Aliabdo, A. E. M. Abd Elmoaty, and A. Y. Aboshama, "Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 124, pp. 866–877, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.016>.
- A. Camões, "Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes," Universidade do Minho, 2002. <https://hdl.handle.net/1822/7>
- AIE- Agência Internacional de Energia, www.iea.org, acessado em 18/12/2022.
- Ahmad Shayan, Aimin Xu, Value-added utilisation of waste glass in concrete, outubro de 2002, *Cement and Concrete Research* 34 (2004) 81–89, doi:10.1016/S0008-8846(03)00251-5.
- AIVE- Associação dos Industriais do Vidro de Embalagem, www.aive.pt, acessado em 20/10/2022.
- Almeida, Ivan R. de, 1990, *Betões de alta resistência e durabilidade – composições e características*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, tese de doutoramento apresentada à Universidade Técnica de Lisboa (IST), Lisboa, pp. 740.
- Alonso, J. L. and Wesche, K., 1991, *Characterization of fly ash*, Fly ash in concrete: properties and performance, Report of technical committee 67-FAB – use of fly ash in building, RILEM, K. Wesche ed., E&FN SPON, pp. 3-23.
- A. M. Matos and J. Sousa-Coutinho, "Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 36, pp. 205–215, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.027>
- A. M. Matos and S. C. Joana, "Waste glass powder in cement: Macro and micro scale study," *Adv. Cem. Res.*, vol. 28, no. 7, pp. 423–432, 2016. DOI: 10.1680/jadcr.14.00025
- A.M. Neville, "Properties of concrete", 5th edition, Pearson Education Limited, Harlow, England, 2011, ISBN 978-0-273-75580-7. Previous published: 1963, 1973, 1975, 1977, 1981, 1985 (by Longman Group Limited).
- A. Morandeau, M. Thiery, P. Dangla, Investigation of the carbonation mechanism of CH and CSH in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties, *Cem. Concr. Res.* 56 (2014) 153–170. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.015>
- Andreas Schmitz, Jacek Kaminski, Bianca Maria Scalet, Antonio Soria, Energy consumption and CO2 emissions of the European glass industry, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.09.022>
- Ana Mafalda Matos, Estudo de argamassas com substituição parcial de cimento por resíduos de vidro moídos, FEUP, 2010. <http://hdl.handle.net/10216/59733>.
- APA – agência portuguesa do ambiente – relatório de gestão de resíduos 2021., www.apambiente.pt, acessado em set/2022.
- ASTM C618-15 - Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, 2015.
- ASTM C1866-20 Standard Specification for Ground-Glass Pozzolan for use in concrete, 2020.
- ASTM C125-21a, "Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates." American Society for Testing and Materials, p. 9, 2021.
- A. Xu, S.L. Sarkar, Microstructural development in high-volume fly-ash cement system, *J. Mater. Civ. Eng.* 6 (1) (1994) 117–136. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1994\)6:1\(117\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1994)6:1(117))

- B. M. Thomas, D. Ph, P. Eng, C. Engineering, and N. Brunswick, "Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete". 2007.
- Browne, R. D., 1991, Field investigations: site & laboratory tests: maintenance repair and rehabilitation of concrete structures, CEEC, Lisboa;
- Caijun Shi, Keren Zheng, A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete, College of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha, China, 20 April 2007. DOI: 10.1016/j.resconrec.2007.01.013
- C. Cao, W. Sun, H. Qin, The analysis on strength and fly ash effect of roller compacted concrete with high volume fly ash, *Cem. Concr. Res.* 30 (1) (2000) 71–75. DOI: 10.1016/
- C.D. Atis_, High-volume fly ash concrete with high strength and low drying shrinkage, *J. Mater. Civ. Eng.* 15 (2) (2003) 153–156. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:2(153)
- C.D. Atis_, Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash, *Constr. Build. Mater.* 17 (3) (2003) 147–152. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00116-2](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00116-2)
- Cembureau – The European Cement Association, Cements for a low-carbon Europe, 2013, <http://cembureau.eu/library/reports/activityreport>, 2011 (acesso em 15 de agosto de 2022).
- C.-H. Huang et al., Mix proportions and mechanical properties of concrete containing very high-volume of Class F fly ash, *Constr. Build. Mater.* 46 (2013) 71–78. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.016
- Concrete Society, 1987, Permeability testing of site concrete. A review of methods and experience, Technical Report, n° 31.
- Coutinho, A. de Sousa, "Fabrico e Propriedades do Betão", Volume 1, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1988, ISBN:978-972-49-0326-2.
- Coutinho, A. de Sousa e Gonçalves, Arlindo, 1994, *Fabrico e propriedades do betão*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Volume III, Lisboa, pp.368.
- Coutinho, Joana Sousa - Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da cofragem. FEUP Edições.1988. ISBN 9727520731.
- Costa, L. M. Influência da pozolanicidade na ativação alcalina. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Cross, D., Stephens, J. and Vollmer, J., "Field Trials of 100% Fly Ash Concrete," *Concrete International*, September 2005, pages 47 to 51.
- C. Yüksel, A. Mardani-Aghabaglou, A. Beglarigle, H. Yazici, K. Ramyar and O. Andic-Cakir, Influence of water/powder ratio and powder type on alkali-silica reactivity and transport properties of self-consolidating concrete, *Mater. Struct.* 49, 289 (2016). <http://doi.org/10.1617/s11527-014-0497-y>.
- Deepa Paul, K.R. Bindhu, Ana Mafalda Matos, João Delgado, Eco-friendly concrete with waste glass powder: A sustainable and circular solution, *Construction and Building Materials* 355 (2022) 129217, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129217>
- Direção geral de energia e geologia, estatísticas anuais 2021, dgeg.gov.pt, acessado em 20/10/2022.
- Dhirendra Patel, R.P. Tiwari, R. Shrivastava, R.K. Yadav, Effective utilization of waste glass powder as the substitution of cement, *Construction and Building Materials* 199 (2019) 406–415. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.017>

- Dunstan, Jr, E. R. Fly ash and fly ash concrete. United States: N. p., 1984. <https://www.osti.gov/biblio/6450107>
- E. Berodier and K. Scrivener, Understanding the filler effect on the nucleation and growth of C-S-H, *J. Am. Ceram. Soc.* 97, 3764 (2014). <https://doi.org/10.1111/jace.13177>.
- E. Berodier, *Impact of the supplementary cementitious materials on the kinetics and microstructural development of cement hydration*, Ph.D. Thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne 2015, p. 156. <https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-6417>
- E. Berry, R. Hemmings, B. Cornelius, Mechanisms of hydration reactions in high volume fly ash pastes and mortars, *Cem. Concr. Compos.* 12 (4) (1990) 253–261. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(90\)90004-H](https://doi.org/10.1016/0958-9465(90)90004-H)
- E. Liisma, S. Sein and M. Järvpõld. - The influence of carbonation process on concrete bridges and durability in Estonian practice The influence of carbonation process on concrete bridges and durability in Estonian practice. 2017. DOI 10.1088/1757-899X/251/1/012072
- Elaqra, H. A., Haloub, M. A. A., & Rustom, R. N. (2019). Effect of new mixing method of glass powder as cement replacement on mechanical behavior of concrete. *Construction and Building Materials*, 203, 75–82. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.01.077.
- Elisabete R. Teixeira, Ricardo Mateus, Aires F. Camões, Luís Bragança, Fernando G. Branco; Comparative environmental life-cycle analysis of concretes using biomass and coal fly ashes as partial cement replacement material, *Journal of Cleaner Production*, Volume 112, Part 4, 2016, Pages 2221-2230, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.124>.
- ERCMO – European Ready Mixed Concrete Organization, Ready-Mixed Concrete Industry Statistics 2019.
- Eurostat, “Recycling rates of packaging waste for monitoring compliance with policy targets, by type of packaging,” 2021.
- FEVE – European glass container glass federation www.feve.org, acessado em set2022.
- Flower, D.J.M., Sanjayan, J.G., 2007. Green house gas emissions due to concrete manufacture. *Int. J. Life Cycle Assess.* 12, 282e288. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-007-0327-3>.
- French Association of Civil Engineering, "Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages – Indicateurs de durabilité", , table 9, pg 90, July 2004.
- Global Cement and Concrete Association (GCCA) - <https://gccassociation.org/>, acesso em 15/08/2022.
- Greenspec (2018), 'Thermal mass', <http://www.greenspec.co.uk/building-design/thermal-mass/> (acessado em 23 de fevereiro de 2018).
- Guignone, G.; Calmon, J.L.; Vieira, G.; Zulcão, R.; Rebello, T.A.; Life Cycle Assessment of Waste Glass Powder Incorporation on Concrete: A Bridge Retrofit Study Case. *Appl. Sci.* 2022, 12, 3353. <https://doi.org/10.3390/app12073353>
- G. W. McLellan and E. B. Shand, “Glass Engineering Handbook. (Retroactive Coverage),” McGraw-Hill B. Company, 1221 Ave. Am. New York, New York 10020, USA, 1984. 512, 1984.
- Hammond G.; Jones C. Inventory of Carbon & Energy (ICE) Version 1.6a. Sustainable Energy Research Team (SERT) Department of Mechanical Engineering University of Bath, UK. 2008.
- H.A. Alaka, L.O. Oyedele, High volume fly ash concrete: the practical impact of using superabundant dose of high range water reducer, *J. Build. Eng.* 8 (2016) 81–90. DOI: 10.1016/j.jobbe.2016.09.008

- Herath, C., Gunasekara, C., Law, D.W. e Setunge, S., 2020. Performance of high-volume fly ash concrete incorporating additives: A systematic literature review. *Construction and Building Materials*, 258, p120606. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120606
- H.F.W. Taylor, *Cement chemistry*, 2nd edition, Ed.Thomas Telford, 1997
- Hongjian Du, Kiang Hwee Tan, Properties of high-volume glass powder concrete, *Cement and Concrete Composites* 75 (2017) 22e29, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.10.010>.
- IEA - International Energy Agency – Cement Roadmaps 2009 – www.iea.org/roadmaps, acesso em 15 de agosto de 2022.
- Isaia, G., & Gastaldini, A.; Perspectivas ambientais e econômicas do concreto com altos teores de adições minerais: um estudo de caso. *Ambiente Construído*. Porto Alegre, Brasil, 2004.
- I. Soroka and N. Setter, The effect of fillers on strength of cement mortars, *Cem. Concr. Res.* 7, 449 (1977). [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(77\)90073-4](https://doi.org/10.1016/0008-8846(77)90073-4).
- I. Yoshitake et al., Tensile properties of high-volume fly-ash (HVFA) concrete with limestone aggregate, *constr. Build. Mater.* 49 (2013) 101–109. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.020>
- Jamshid Esmaeili, Ammar Oudah AL-Mwanes, A review: Properties of eco-friendly ultra-high-performance concrete incorporated with waste glass as a partial replacement for cement, *Materials Today: Proceedings* 42 (2021) 1958–1965, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.242>.
- Jani, Y., Hogland, W., 2014. Waste glass in the production of cement and concrete – a review. *J. Environ. Chem. Eng.* 2, 1767–1775. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.03.016>.
- J.A. Jain, N. Neithalath, Chloride transport in fly ash and glass powder modified concretes - Influence of test methods on microstructure, *Cem. Concr. Compos.* 32 (2) (2010) 148–156, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.11.010>.
- J. Aspdin, “Specification of Joseph Aspdin - artificial stone,” 1824.
- J. Lehne and F. Preston, *Making Concrete Change*, Chatham House Report, June 2018. ISBN: 978 1 78413 272 9.
- Jones, R., McCarthy, M., & Newslands, M.; Fly ash route to low embodied CO2 and implications for concrete construction. 2011 World of Coal Ash (WOCA) Conference. Denver, CO, USA, 2011.
- Lane, R. O. and Best, J. F., 1978, *Laboratory studies on the effects of superplasticizers on the engineering properties of plain and fly ash concretes*, Superplasticizers in concrete, Proceedings of the International Symposium, V. M. Malhotra, E. E. Berry and T. A. Wheat ed., CANMET, Energy, Mines and Resources, Canada, Ottawa, May 29/31, pp. 379-402.
- LNEC E391 – Determinação da resistência a carbonatação em betões, LNEC, 1993.
- LNEC E393 – Determinação da absorção de água por capilaridade, LNEC, 1993.
- LNEC E394 – Determinação da absorção de água por imersão, LNEC, 1993.
- LNEC E463 – Determinação do coeficiente de difusão de cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário, LNEC, 2004.
- LNEC E 464, Betões. Metodologia prescritiva para uma vida útil de projecto de 50 e de 100 anos face às acções ambientais, 2007.

- M.C.G. Juenger and R. Siddique, Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete, *Cem. Concr. Res.* 78, 71 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.018>.
- Madalena Dobiszewska, Waste Materials Used in Making Mortar and Concrete, *Journal of Materials Education* Vol.39 (5-6): 133-156 (2017). <https://oai.dlibra.pbs.edu.pl:1169>.
- Mahsa Kamali, Ali Ghahremaninezhad, Effect of glass powders on the mechanical and durability properties of cementitious materials, Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering, University of Miami, Coral Gables, FL 33146, United States, 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.010.
- Malheiro, Raphaele Lira Meireles Castro, Durabilidade do betão à ação combinada da carbonatação e dos íões cloreto considerando a presença de cinzas volantes, Tese de Doutorado, Universidade do Minho, 2018, <https://hdl.handle.net/1822/58335>
- Malhotra V.M, Reducing CO2 emissions—the role of fly ash and other supplementary cementitious materials, *Concr. Int.* 28 (2006) 42–45.
- Malhotra, V. M. and Mehta, P. Kumar, 1996, *Pozzolanitic and cementitious materials*, Advances in Concrete Technology, Volume 1, V. M. Malhotra ed., Gordon and Breach Science Publishers, Ottawa, Ontario, Canada, pp.191.
- Malhotra V. M. and P. K. Mehta, High-performance, High-volume Fly Ash Concrete: Materials, Mixture Proportioning, Properties, Construction Practice, and Case Histories. Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development, 2005.
- Marceau, M.L., Gajda, J. and VanGeem, M.G. (2002) Use of Fly Ash in Concrete: Normal and High-Volume Ranges. PCA R&D Serial No. 2604, Portland Cement Association, Skokie.
- Mateus, R., Neiva, S., Bragança, L., Mendonça, P., Macieira, M., 2013. Sustainability assessment of an innovative lightweight building technology for partition walls e comparison with conventional technologies. *Build. Environ.* 67, 147e159. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.05.012>.
- Mehta, P. Kumar and Aïtcin, Pierre-Claude, 1990, *Principals underlying the production of high-performance concrete*, Cement, Concrete and Aggregates, ASTM, Volume 12, Number 2, pp. 70-78.
- M.E.I. Saraya, Study physico-chemical properties of blended cements containing fixed amounts of silica fume, blast furnace slag, basalt and limestone, a comparative study, *Constr. Build. Mater.* 72, 104 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.071>.
- Mirzahosseini, M., & Riding, KA (2014). Effect of curing temperature and glass type on the pozzolanic reactivity of glass powder. *Cement and Concrete Research*, 58, 103-111. DOI: 10.1016/j.cemconres.2014.01.015
- Moreira, Alberto Mário Vasconcelos Tavares - Patologia do Betão. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2016.
- Moreira, Bruna Alexandra da Silva - Incorporação de resíduo de vidro moído em argamassas como substituto parcial do cimento, Universidade do Minho, julho 2022. <https://hdl.handle.net/1822/85022>
- M. Schneider, M. Romer, M. Tschudin, H. Bolioc, Sustainable cement production present and future, *Cem. Concr. Res.* 41 (2011) 642–650. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.019>.

- Nafisa Tamanna and Rabin Tuladhar, Sustainable Use of Recycled Glass Powder as Cement Replacement in Concrete, *The Open Waste Management Journal*, 2020, Volume 13, DOI:10.2174/1874347102013010001, 2020, 13, 1-13
- N. Almeida, F. Branco, J. de Brito and J.R. Santos, High-performance concrete with recycled stone slurry, *Cement and Concrete Research*, 37 (2007) 210-220. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.11.003>.
- NP EN 196-6, 2019, Métodos de ensaio de cimentos - Parte 6: determinação da finura, Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 197-1:2012 - Cimento Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes. Portugal: IPQ, 2012.
- NP EN 1097-2, “Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 2 - Método de determinação à fragmentação.” IPQ, p. 32, 2000.
- NP EN 1097-6, 2004, Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados – Parte 6: determinação da massa volúmica e da absorção de água, Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 206-1 – Betão. Parte 1: Especificação. Desempenho, produção e conformidade. IPQ: Instituto Português da Qualidade, 2007.
- NP EN 450-1, “Cinzas volantes para betão; Parte 1: Definição, especificações e critérios de conformidade.” IPQ, p. 35, 2012.
- Oliveira, L. A. Pereira, J. P. Castro-Gomes, and P. M. S. Santos, “The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 31, pp. 197–203, 2012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.110
- Onyelowe KC, Ebid AM, Riofrio A, Soleymani A, Baykara H, Kontoni D-PN, Mahdi HA and Jahangir H (2022), Global warming potential-based life cycle assessment and optimization of the compressive strength of fly ash-silica fume concrete; environmental impact consideration. *Front. Built Environ.* 8:992552. doi: 10.3389/fbuil.2022.992552
- Ö. Özkan and İ. Yüksel, “Studies on mortars containing waste bottle glass and industrial by- products,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 6, pp. 1288–1298, 2008. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.01.015
- P. Dinakar, K. Babu, M. Santhanam, Durability properties of high-volume fly ash self-compacting concretes, *Cem. Concr. Compos.* 30 (10) (2008) 880–886. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2008.06.011
- Pengwei Guo, Weina Meng, Hani Nassif, Hongye Gou, Yi Bao, New perspectives on recycling waste glass in manufacturing concrete for sustainable civil infrastructure, *Construction and Building Materials* 257 (2020) 119579, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119579>.
- Patel D., R.P. Tiwari, R. Shrivastava, R.K. Yadav, Effective utilization of waste glass powder as the substitution of cement, *Construction and Building Materials* 199 (2019) 406–415. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.017>
- Pontes, Klaus Henrique Morais, Incorporação de resíduos de vidro moído em betões: uma alternativa às cinzas volantes? Tese Mestrado, Universidade do Minho, 2023. <https://hdl.handle.net/1822/85024>

- R. Malheiro, B. Moreira, K. Pontes, C. Jesus, A. Camões – Utilização do pó de vidro como substituto parcial do cimento: uma abordagem experimental acerca da resistência mecânica, CLBMCS, Salvador, 2022. <https://hdl.handle.net/1822/81939>.
- Rana A, Kalla P, Verma H K and Mohnot J K 2016 *Journal of Cleaner Production* 135 pp 312– 331. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.126>
- Redação SustentArqui. (2019). Impactos Ambientais da Construção Civil. SustentArqui, Consultado a 05 junho, 2019, em <https://sustentarqui.com.br/impactos-ambientais-da-construcao-civil/>.
- Rêgo, J. H. S. As cinzas de casca de arroz (CCAs) amorfa e cristalina como adição mineral ao cimento– aspectos de microestrutura das pastas. 2004. Tese de Doutorado. Tese de Doutorado. Faculdade de Tecnologia. UNB. Brasília, 2004, 274p.
- Reis, Rui Jorge Alves da Cunha, Influência da adição de cal hidratada na carbonatação de betões de elevado volume de cinzas volantes, Tese de Doutorado, Universidade do Minho, 2022 - <https://hdl.handle.net/1822/81153>
- R. Reis, A. Camões; Betões eco-eficientes para uma construção sustentável; Conference: Workshop Construção e Reabilitação Sustentáveis - Soluções Eficientes para um Mercado em Crise, Guimarães, Portugal, February 2012.
- Rodier I., Holmer Savastano Jr, Use of glass powder residue for the elaboration of eco-efficient cementitious materials, *Journal of Cleaner Production* 184 (2018) 333e341, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.269>
- R. Siddique, Fracture toughness and impact strength of high-volume class-F fly ash concrete reinforced with natural san fibres, *Leonardo Electron. J. Pract. Technol.* 12 (2008) 25–36. DOI: 10.1680/ccfdc.34013.0054
- Scrivener, K., John, V., Gartner, E. (2016), Cimentos ecoeficientes: soluções potenciais e economicamente viáveis para uma indústria de materiais à base de cimento com baixo teor de CO₂, Paris: Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, <https://www.lc3.ch/wp-content/uploads/2017/03/2016-UNEP-Report-Complete6.pdf> (acessado em 20 de novembro de 2016).
- S. Gupta, B. N. Mohapatra, and M. Bansal, “A review on development of Portland limestone cement: A step towards low carbon economy for Indian cement industry,” *Curr. Res. Green Sustain. Chem.*, vol. 3, p. 100019, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2020.100019>
- Shehata, M.H. and Thomas, M.D.A., “The Effect of Fly Ash Composition on the Expansion of Concrete Due to Alkali Silica Reaction.” *Cement and Concrete Research*, Vol. 30 (7), 2000, pages 1063 to 1072. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00283-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00283-0)
- Shashiprakash, S.G. and Thomas, M.D.A., “Sulfate Resistance of Mortars Containing High-Calcium Fly Ashes and Combinations of Highly Reactive Pozzolans and Fly Ash”, *Proceedings of the Seventh CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, ACI SP-199, American Concrete Institute, Detroit, MI., 2001. ISBN: 9780870310263
- Soliman N.A, A. Tagnit-Hamou, Development of ultra-high-performance concrete using glass powder – Towards ecofriendly concrete, *Construction and Building Materials* 125 (2016) 600–612, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.073>.
- S. Sujjavanich, V. Sida, P. Suwanvitaya, Chloride permeability and corrosion risk of high-volume fly ash concrete with mid-range water reducer, *ACI Mater. J.* 102 (3) (2005) 177

- Steven H. Gebler and Paul Klieger, Effect of Fly Ash on Physical Properties of Concrete Volume: 91, pg 1-50, 1986. DOI: 10.14359/10063
- Taha, B., & Nounu, G. (2009). Utilizing waste recycled glass as sand/cement replacement in concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21(12), 709-721. DOI:10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:12(709)
- Taha, B., e G. Nounu. "Using lithium nitrate and pozzolanic glass powder in concrete as ASR suppressors." *Cement & Concrete Composites*, 2008: 497 - 505. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2007.08.010
- Thomas, M.D.A., Shehata, M., Shashiprakash, S.G., "The Use of Fly Ash in Concrete: Classification by Composition." *Cement, Concrete and Aggregates*, Vol. 12, No. 2, 1999, pages 105 to 110.
- Tucker, E.L.; Ferraro, C.C.; Laux, S.J.; Townsend, T.G. Economic and life cycle assessment of recycling municipal glass as a pozzolan in Portland cement concrete production, *Resources Conserv. Recycl.* 2018, 129, 240–247.
- Warda Ashraf, Carbonation of cement-based materials: Challenges and opportunities, *Construction and Building Materials* 120 (2016) 558–570, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.080>.
- W. Jin, C. Meyer, S. Baxter, *ACI Mater. J.* 97 2000 (março-abril) 208-213.
- W. Kurdowski, *Cement and Concrete Chemistry*, Springer, London, 2014, p. 676, <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7945-7>.
- X. Jiang, R. Xiao, Y. Bai, B. Huang, and Y. Ma, "Influence of waste glass powder as a supplementary cementitious material (SCM) on physical and mechanical properties of cement paste under high temperatures," *J. Clean. Prod.*, vol. 340, p. 130778, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130778>.
- Y. Jiang, T.-C. Ling, K. H. Mo, and C. Shi, "A critical review of waste glass powder – Multiple roles of utilization in cement-based materials and construction products," *J. Environ. Manage.*, vol. 242, pp. 440–449, 2019. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.04.098.
- Y. Shao, T. Lefort, S. Moras, and D. Rodriguez, "Studies on concrete containing ground waste glass," *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 1, pp. 91–100, 2000. DOI: 10.1016/S0008-8846(99)00213-6.
- Y. Zhang, R. Xiao, X. Jiang, W. Li, X. Zhu, and B. Huang, "Effect of particle size and curing temperature on mechanical and microstructural properties of waste glass-slag-based and waste glass-fly ash-based geopolymers," *J. Clean. Prod.*, vol. 273, p. 122970, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122970>.
- Zameer Kalakada, Jeung-Hwan Doh and Sanaul Chowdhury, Glass powder as replacement of cement for concrete – an investigative study, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2022, VOL. 26, NO. 3, 1046–1063, <https://doi.org/10.1080/19648189.2019.1695149>.
- Zhi-hai He, Pei-min Zhan, Shi-gui Du, Bao-ju Liu, Wei-bin Yuan, Creep behavior of concrete containing glass powder, *Composites Part B: Engineering*, Volume 166, 2019, Pages 13-20, ISSN 1359-8368, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.133>.