

ARGAMASSAS DE CIMENTO ALCALINO HÍBRIDO REFORÇADAS COM FIBRAS

JORGE KEVIN DE MUSSÁ E TOMÉ

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ESTRUTURAS DE ENGENHARIA CIVIL

Orientador: Professora Doutora Castorina Fernanda Silva Vieira
Coorientador: Mestre Filipe André Leitão de Almeida

JULHO DE 2023

MESTRADO EM ESTRUTURAS DE ENGENHARIA CIVIL 2022/2023

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 190

Fax +351-22-508 1446

✉ mestec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias 4200-465 PORTO Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil - 2022/2023 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2023.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha família

Tudo é Possível” Kevin Garnett

O Caminho de Deus É Perfeito. #AtrasDoCheese.

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento desta dissertação só foi possível com a ajuda e o apoio de diversas pessoas, portanto expresso aqui a minha gratidão.

Em primeiro lugar quero agradecer à minha orientadora e ao meu coorientador, à Professora Castorina Fernandes Silva Vieira e ao Mestre Filipe André Leitão de Almeida, não só por me terem dado a oportunidade de expandir os meus conhecimentos, mas também pela cooperação, apoio, e disponibilidade ao longo de todo o processo. Cresci muito neste processo e o vosso apoio foi fundamental.

À todos os técnicos do LEMC, que foram uma parte fulcral deste trabalho. À Eng^a. Patrícia Pereira pelas sugestões e pela ajuda incansável, em especial na contribuição que teve na realização de ensaios e ajuda na preparação dos trabalhos de laboratório. E a todos os outros, que me ajudaram em diversas situações, Cecília, Manuel, Gil, Paulo, Dora, Fernando e Paula.

À Eng^a. Paula e Eng.^o Luís Matos que auxiliaram em alguns ensaios, nomeadamente calorimetrias e granulometrias a laser.

À Eng.^a Célia Ferreira, do Laboratório de Geoambiente (CERENA-FEUP, Departamento de Engenharia de Minas), pela realização do ensaio de fluorescência de raios X sobre a escória.

À Megasa, pelo fornecimento do material para realização deste trabalho, bem como da realização da análise química dos cimentos estudados.

À minha melhor amiga Lina Maura, por me direcionar sempre.

Aos meus irmãos Rita, Quimasse, Dário, Tânia e Tassiana, vocês são minha maior fonte de inspiração.

Aos meus primos, Jacqueline, Kaynara, Edwin, Gizela e Hugo, obrigado por serem um suporte para mim.

Aos meus Padrinhos, Eugénio e Aurora, obrigado pelo apoio.

A minha tia Natália, minha tia Noémia e meu tio João, obrigado pelo apoio.

Ao meu grande amigo Alvaro Diogo por sempre me apoiar nesta caminhada.

Ao meu clube NCR Valongo e aos meus colegas de equipa, obrigado pelo apoio.

Por fim, o maior agradecimento de todos é dirigido aos meus Pais, Manuel Tomé, Yolanda Mussá, Takin Howin e Fernanda Vasconcelos que sempre me apoiaram, aliviaram as minhas preocupações e garantiram a minha formação académica.

Um Muito Obrigado a todos.

RESUMO

É consensual que um dos eixos prioritários atuais é a proteção do ambiente. O trabalho a desenvolver neste âmbito inclui encontrar soluções que resultem numa indústria com um menor consumo de recursos naturais e energia. No que diz respeito às matérias-primas, é importante desenvolver materiais e produtos que incorporem os resíduos que são gerados na indústria, evitando uma rotina comum, que é a sua deposição em aterro.

A indústria cimenteira é responsável pela emissão de uma quantidade muito significativa de dióxido de carbono para a atmosfera, um aspeto que tem forçosamente de ser alterado. Considerando este dado, é importante desenvolver cimentos mais sustentáveis. Uma possível solução para alcançar este objetivo é a utilização de cimentos alcalinos híbridos, que consistem em ativar quimicamente, através do uso de uma pequena quantidade de um ativador alcalino, uma mistura de baixo teor de clínquer Portland com materiais cimentícios suplementares (como, por exemplo, escória ou cinza volante).

A escória branca gerada no processo de afinação que ocorre durante a produção do aço na aciaria elétrica integrada na unidade de produção de aço da MEGASA, apresenta propriedades que podem permitir a sua utilização como material cimentício suplementar no tipo de cimentos mencionados anteriormente. Estes cimentos, no caso de se confirmar a sua viabilidade, serão um ligante válido para serem utilizados no fabrico de argamassas e betões. No caso das argamassas com cimentos híbridos alcalinos, existe um tópico de investigação que carece de mais estudo, que é a caracterização dessas argamassas reforçadas com fibras.

O presente trabalho teve como objetivos: caracterizar cimentos alcalinos híbridos utilizando como material cimentício suplementar a escória mencionada anteriormente; caracterizar argamassas fabricadas com cimentos alcalinos híbridos; e avaliar o efeito da incorporação de fibras metálicas (teores iguais a 1%, 2% e 3%) nas propriedades dessas argamassas. Os resultados obtidos demonstraram que os cimentos alcalinos híbridos alcançaram resistências mecânicas inferiores, quando comparadas com as resistências do cimento Portland CEM I 42,5 R utilizado como referência. No entanto, as resistências alcançadas pelos cimentos alcalinos híbridos abrem boas perspectivas para a sua utilização em argamassas. No que diz respeito às argamassas reforçadas com fibras, pode afirmar-se que a presença destes elementos beneficiou o aumento da capacidade de absorção de energia das argamassas, sendo que foi o teor de fibras de 2% aquele que melhor contribuiu para alterar o comportamento pós-fissuração das argamassas. Realça-se, também, que a introdução de fibras nas argamassas não pareceu causar efeitos na capacidade de absorção de água e que as variações observadas nos ensaios de expansão foram desprezáveis para o período de monitorização incluído neste trabalho.

Pode considerar-se que a utilização de argamassas com cimentos alcalinos híbridos será um contributo importante para um setor da construção mais sustentável e circular.

PALAVRAS-CHAVE: Cimentos alcalinos híbridos, escória, argamassas reforçadas com fibras, construção circular.

ABSTRACT

It is consensual that one of the current main priorities is the protection of the environment. The work to be carried out within this context includes finding solutions allowing a lower consumption of natural resources and energy in industry. Concerning raw materials, it is important to develop materials and products including the waste that is generated in industry, avoiding its landfilling.

The cement industry is responsible for releasing into environment a significant amount of carbon dioxide, as aspect that needs to be changed. Considering this circumstance, it is important to develop more sustainable cements. A possible solution to accomplish this goal is to use hybrid alkaline cements that consist of the chemical activation, by means of a small amount of an alkaline activator, of blend cements including low clinker content and supplementary cementitious materials (e.g. slag or fly ash).

The ladle furnace slag resulting from the steel production occurring in MEGASA displays properties that may allow its use as supplementary cementitious materials in the previously mentioned cements. In case of being confirmed its feasibility, these cements will be a valid binder in the manufacture of mortar and concrete. Regarding mortars with hybrid alkaline cements, there is a research topic that needs to be deepened, which is the characterisation of those mortars with fibre-reinforcement.

The present work had the following goals: characterisation of hybrid alkaline cements using the previously mentioned slag as supplementary cementitious material; characterisation of mortars manufactured with hybrid alkaline cements; and assessment of the effect of the incorporation of fibres (contents of 1, 2 and 3%) on the properties of those mortars. The results showed that the hybrid alkaline cements had lower mechanical strengths compared to the reference Portland cement CEM I 42,5R. However, the achieved strengths by the hybrid alkaline cements open good perspectives for their use in mortars. Concerning the fibre-reinforced mortars, it can be mentioned that the presence of fibres favoured the increase of the energy absorption capacity of the mortars, being the content of fibres of 2% the one that made a better contribution to improve the post-cracking behaviour of the mortars. It is worth mentioning that the introduction of fibres into the mortars did not appear to have had effect on their water absorption and that the changes observed during the expansion tests were meaningless for the monitoring period included in this work.

It can be considered that the use of mortars with hybrid alkaline cements will be an important contribution to achieve a more sustainable and circular construction sector.

KEYWORDS: Hybrid alkaline cements, slag, fibre-reinforced mortar, circular construction.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v

1. INTRODUÇÃO..... 11

2. ESTADO DA ARTE..... 13

2.1. ECONOMIA CIRCULAR: UM PARADIGMA PARA UMA CONSTRUÇÃO MAIS SUSTENTÁVEL..... 13

2.2. CIMENTO: UM MATERIAL DE CONSTRUÇÃO FUNDAMENTAL.....14

2.2.1. CIMENTO PORTLAND.....16

2.2.1.1. Definição.....16

2.2.1.2. Constituintes principais..... 16

2.2.1.3. Fabrico de cimento Portland..... 18

2.2.1.4. Tipos de Cimento..... 19

2.2.1.5. Impactos ambientais gerados pela indústria cimenteira 21

2.2.2. CIMENTOS ALCALINOS.....24

2.2.2.1. Resenha histórica 24

2.2.2.2. Componentes dos sistemas ativados alcalinamente..... 26

2.2.2.3. Produtos de reação..... 27

2.2.3. CIMENTOS ALCALINOS HÍBRIDOS..... 28

2.2.3.1. Princípios..... 28

2.2.3.2. Produtos de reação..... 29

2.2.3.3. Resultados de investigações anteriores sobre cimentos alcalinos híbridos 29

2.3. ARGAMASSAS..... 30

2.3.1. DEFINIÇÃO.....30

2.3.2. LIGANTES, AGREGADOS, ADJUVANTES E ADIÇÕES.....30

2.3.3. FUNÇÕES E APLICAÇÕES.....31

2.4. ARGAMASSAS REFORÇADAS COM FIBRAS..... 31

2.4.1. OBJETIVOS..... 31

2.4.2. TIPOS DE FIBRAS E PROPRIEDADES.....32

2.4.3. FIBRAS DE AÇO.....34

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	35
3.1. MATERIAIS.....	35
3.1.1. ESCÓRIA BRANCA DE ACIARIA.....	35
3.1.1.1.Preparação e moagem	36
3.1.1.2.Composição química.....	39
3.1.1.3. Análise granulométrica	39
3.1.1.4. Massa volúmica.....	40
3.1.2. CIMENTO.....	43
3.1.2.1.Composição Química	43
3.1.2.2. Análise granulométrica	43
3.1.2.3. Massa volúmica.....	44
3.1.3. FIBRAS DE AÇO.....	44
3.2. METODOLOGIA.....	45
3.2.1. HOMOGENEIZAÇÃO DOS CIMENTOS.....	45
3.2.2. PASTAS.....	46
3.2.2.1. Composições e fábrica	46
3.2.2.2.Tempos de presa.....	51
3.2.2.3. Ensaio de resistência à compressão	55
3.2.2.4.Calorimetria	56
3.2.3. ARGAMASSAS.....	56
3.2.3.1.Composições e fábrica	56
3.2.3.2. Ensaio de consistência por espalhamento	61
3.2.3.3. Ensaio de resistência à flexão e compressão	62
3.2.3.4. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	63
3.2.3.5. Ensaio de absorção de água por capilaridade	64
3.2.3.6. Ensaio de expansão	66
4.RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	67
4.1. PASTAS.....	67
4.1.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	67
4.1.2. TEMPOS DE PRESA.....	68
4.1.3. CALORIMETRIA.....	69
4.2. ARGAMASSAS - FASE I.....	71
4.2.1. CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO.....	71
4.2.2. RESISTÊNCIAS À FLEXÃO E COMPRESSÃO.....	72

4.3. ARGAMASSAS REFORÇADAS COM FIBRAS FASE - II.....	73
4.3.1. CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO.....	73
4.3.2. RESISTÊNCIA À FLEXÃO E COMPRESSÃO.....	74
4.3.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	76
4.3.4. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	78
4.3.5. EXPANSÃO.....	81
5.CONCLUSÕES.....	83
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diagrama de borboleta âmbito da economia circular [2]	13
Figura 2.2 – Ponte e edifício construídos recorrendo ao cimento com material de construção [4]	15
Figura 2.3 – Pavimentos construídos utilizando o cimento como material de construção [4]	15
Figura 2.4 – Produção de cimento no mundo em 2022 feito com base em dados da US Geological Survey Mineral Commodity Summaries [10]	22
Figura 2.5 – Emissões de CO ₂ por queima de combustíveis fósseis [12]	23
Figura 2.6 – Estimativas do consumo do betão até 2100 [13]	23
Figura 2.7 – Componentes de sistemas ativados alcalinamente adaptado (Garcia Lodeiro,2008) [15]	26
Figura 2.8 – Estrutura do gel C-(A)-S-H (adaptado de García-Lodeiro,2008) [15]	27
Figura 2.9 – Estrutura do gel N-A-S-H (adaptado de Torres-Carrasco e Puertas,2017) [16]	28
Figura 2. 10 – Controlo de fendilhação realizado pelas fibras (adaptado de Barros,1996) [27]	32
Figura 2.11 – Formas geométrica das fibras de aço (adaptado de Naaman, 2003) [31]	34
Figura 3.1 - Escória da Megasa com alguns elementos de aço visíveis	35
Figura 3.2 – Secagem da escória na estufa.....	36
Figura 3.3 – Processo de peneiração de escória.....	36
Figura 3.4 – Imagens da escória tal como recebida	37
Figura 3.5 – Material retido e passado no peneiro de malha com abertura de 1mm	38
Figura 3.6 – Moagem de escória.....	38
Figura 3.7 – Etapas de processo de moagem e armazenamento da escória.....	39
Figura 3.8 – Distribuição granulométrica das partículas de escória e cimento.....	40
Figura 3.9 – Picnómetro	41
Figura 3.10 – Pesagem da amostra	41
Figura 3.11 – Colocação de petróleo no picnómetro	42
Figura 3.12 – Introdução da amostra no picnómetro e repouso na câmara climática	42
Figura 3.13 – Cimento CEM I 42.5 R	43
Figura 3.14 – Fibras utilizadas na investigação	44
Figura 3.15 – Preparação da câmara de moagem para homogeneização dos cimentos	45
Figura 3.16 – Pesagem de cimento e da escória para processo de homegeneização	46
Figura 3.17– Estrutura da composição do cimento híbrido estudado	46
Figura 3.18 – Sulfato de sódio.....	47
Figura 3.19 – Ensaio prévios para determinação da relação A/C das pastas	47
Figura 3.20 – Pé e balde da misturadora	48
Figura 3.21 – Pesagem de água e de cimento para para o fabrico das pastas.....	48
Figura 3.22 – Fabrico das pastas na misturadora	49
Figura 3.23 – Aplicação de óleo descofrante nos moldes cúbicos utilizados para moldar as pastas ..	49
Figura 3.24 – Moldagem e compactação das pastas.....	50
Figura 3.25 – Armazenamento dos moldes cúbicos utilizados na moldagem das pastas.....	50
Figura 3.26 – Desmoldagem dos provetes cúbicos	51
Figura 3.27 – Cura dos provetes cúbicos na câmara climática.....	51
Figura 3.28 – Aparelho de Vicat para determinação de início e fim de tempo de presa	52
Figura 3.29 – Momento de hidratação do cimento ('instante zero')	52
Figura 3.30 – Colocação de pasta no molde.....	53
Figura 3.31 – Leitura da profundidade de penetração da sonda durante o ensaio dos tempos de presa	53

Figura 3.32 – Ensaio de tempo de presa	54
Figura 3.33 – Provete após o final do ensaio de determinação dos tempos de presa	55
Figura 3.34 – Ensaios de resistência à compressão das pastas	56
Figura 3.35 – Materiais utilizados no fabrico das argamassas (cimento, água, areia e fibras metálicas)	58
Figura 3.36 – Aplicação de óleo desmoldante nos moldes e mesa de compactação	58
Figura 3.37 – Balde com água e cimento, introdução de areia normalizada e visão geral da misturadora	58
Figura 3.38 – Compactação da argamassa, remoção de material em excesso e provetes moldados	59
Figura 3.39 – Provetes prismáticos após desmoldagem	59
Figura 3.40 – Recursos utilizados no fabrico de provetes cilíndricos de argamassas reforçadas com fibras	60
Figura 3.41 – Pesagens de cimento, areia e fibras para o fabrico de um provete cilíndrico	60
Figura 3.42 – Homogeneização da argamassa reforçada com fibras	61
Figura 3.43 – Compactação do molde com o provete cilíndrico	61
Figura 3.44 – Provetes cilíndricos após desmoldagem	61
Figura 3.45 – Ensaio de consistência por espalhamento de argamassas	62
Figura 3.46 – Ensaio de resistência a flexão e a compressão de argamassas	63
Figura 3.47 – Discos para os ensaios de tração por compressão diametral das argamassas reforçadas com fibras	64
Figura 3.48 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	64
Figura 3.49 – Ensaios de absorção de água por capilaridade das argamassas	65
Figura 3.50 – Medição de um provete durante os ensaios de expansibilidade das argamassas	66
Figura 4.1 – Resultados de ensaios de resistência a compressão de pastas	67
Figura 4.2 – Tempos de presa das pastas	69
Figura 4.3 – Taxa de libertação de calor de pastas	70
Figura 4.4 – Calor total acumulado das pastas	70
Figura 4.5 – Resultados dos ensaios de determinação de consistência por espalhamento no estado fresco realizados às argamassas (Fase I)	71
Figura 4.6 – Resultados dos ensaios de resistência a flexão de argamassas – Fase I	72
Figura 4.7 – Resultados de ensaios de resistência a compressão de argamassas – Fase I	72
Figura 4.8 – Resultados de ensaios de consistência ao espalhamento no estado fresco de argamassas reforçadas com fibras (Fase II)	74
Figura 4.9 – Resultados de ensaios de resistência a compressão de argamassas reforçadas com fibras – Fase II	74
Figura 4.10 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão das argamassas reforçadas com fibras – Fase II	75
Figura 4.11 – Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral das argamassas reforçadas com fibras	76
Figura 4.12 – Curvas médias tensão-abertura de fenda das argamassas reforçadas com fibras	77
Figura 4.13 – Variação das resistências residuais das argamassas de acordo com o teor de fibras	77
Figura 4.14 – Variação da energia dissipada das argamassas de acordo com o teor de fibras	78
Figura 4.15 – Resultados dos ensaios de expansão das argamassas	81

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Datas e acontecimentos relevantes na história do cimento [5]	15
Tabela 2.2 – Componentes de clínquerização [5]	19
Tabela 2.3 – Classes de resistência dos cimentos e requisitos mecânicos e físicos (NP EN 197-1) [6]	20
Tabela 2.4 – Cimentos fabricado em Portugal [9]	21
Tabela 2.5 – Momentos importantes na história dos cimentos ativados alcalinamente [15]	25
Tabela 2.6 – Propriedades das fibras.[28].....	33
Tabela 3.1 – Taxa de aproveitamento da escória	37
Tabela 3.2 – Composição química de escória e do cimento.....	39
Tabela 3.3 – Massa volúmica de escoria intacta	42
Tabela 3.4 – Massa volúmica escória moída	43
Tabela 3.5 – Massa volúmica de cimento	44
Tabela 3.6 – Composição das pastas	46
Tabela 3.7 – Composições das argamassas	57
Tabela 4.1 – Coeficientes de absorção de água da argamassa A_REF/CIM.....	79
Tabela 4.2 – Coeficientes de absorção de água da argamassa A_20C/75S	80
Tabela 4.3 – Coeficientes de absorção de água da argamassa A_20C/75S_1F	80
Tabela 4.4 – Coeficientes de absorção de água da argamassa A_20C/75S_2F	80
Tabela 4.5 – Coeficientes de absorção de água da argamassa A_20C/75S_3F	80

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

a.C. – antes de Cristo

A/C – relação água/cimento

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

C_m – coeficiente de absorção de água médio

Cr – coeficiente de absorção de água

C-A-S-H – Silicato cálcico que incorpora alumínio na sua composição

C-S-H – silicato cálcico hidratado

CO₂ – dióxido de carbono

D – sílica de fumo

K – clínquer do cimento Portland

S – escória granulada de alto forno

P,Q – materiais pozzolânicos

G – energia absorvida

GEE – Gases com efeito de estufa

LVDT – transformador diferencial de variação linear

N – newton

N-A-S-H – alumino-silicato sódico cálcico

R_{ti} – Resistência a tração por compressão diametral

S – escória

V,W – cinza volante

V – Cinza volante siliciosa

As normas regulamentares são referidas pela nomenclatura convencional; e.g. NP EN 197-1:2012 e EN 14889-1:2008

1

INTRODUÇÃO

Motivações associadas à proteção do ambiente e, conseqüentemente, à qualidade de vida da população, estão a promover a transição de um modelo económico linear para um paradigma circular, em que se pretende, entre outros, um uso eficiente de recursos e energia, bem como a reutilização, recuperação e reciclagem de materiais e produtos, diminuindo, desta forma, a deposição de resíduos em aterro. Tendo em conta estas expectativas, a indústria deve encontrar soluções que procurem um menor consumo de recursos naturais e energia, e a atribuição de funções mais nobres para os resíduos que são gerados.

A indústria cimenteira é responsável pela emissão para a atmosfera de uma quantidade muito significativa de dióxido de carbono, que é o mais conhecido gás com efeito de estufa. Tendo em conta esta circunstância, é razoável exercer pressão para que sejam encontradas soluções mais sustentáveis que anulem este efeito prejudicial para o ambiente. Uma dessas soluções pode ser a utilização de cimentos alcalinos híbridos, que consistem na ativação alcalina de uma mistura de baixo teor de clínquer Portland (em muitos casos utilizam-se percentagens até 30%) com materiais cimentícios suplementares através de um ativador alcalino (usualmente até 5%). São exemplos de materiais cimentícios suplementares as pozolanas naturais, escórias de alto-forno, ou cinzas volantes.

Estes cimentos, que têm vindo a ser alvo de investigação nos últimos anos, demonstram, em muitos casos, terem propriedades mecânicas que permitem equacionar a sua utilização no fabrico de argamassas e betões, que, como é comumente divulgado, é o produto mais consumido no mundo, a seguir à água.

Um dos passos que pode ser equacionado no âmbito do estudo de cimentos mais sustentáveis é a análise do comportamento de argamassas incorporando esses cimentos como ligante. No caso dos cimentos alcalinos híbridos, parece existir também a necessidade de se aprofundar o conhecimento acerca do efeito da incorporação de fibras nas argamassas que são fabricadas com aqueles cimentos híbridos.

Atendendo à quantidade de cimento que é consumida mundialmente, é razoável afirmar-se que a entrada no mercado dos cimentos alcalinos híbridos, possibilitando a sua utilização em argamassas, é um aspeto que irá promover uma maior circularidade no setor da construção, diminuindo o impacto negativo que este setor tem no ambiente e, conseqüentemente, na qualidade de vida da população. Ao encontrarem-se soluções mais sustentáveis no setor da construção, também se estarão a dar passos para se alcançarem algumas das metas definidas nos 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável incluídos na Agenda 2030 das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável.

Os objetivos do presente trabalho são: 1) caracterização de cimentos alcalinos híbridos utilizando como material cimentício suplementar uma escória gerada no processo de afinação que ocorre durante a produção de aço numa aciaria elétrica na unidade da MEGASA da Maia; 2) caracterização de argamassas incluindo como ligantes os cimentos alcalinos híbridos; e 3) análise do efeito da incorporação de fibras metálicas nas propriedades das argamassas mencionadas anteriormente.

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos principais.

No presente capítulo é realizado um breve enquadramento e apresentados os objetivos do trabalho.

O segundo capítulo é dedicado à revisão do estado da arte. São abordados os seguintes tópicos principais: cimento Portland, cimentos alcalinos e cimentos alcalinos híbridos, argamassas e a utilização de fibras no seu reforço.

O terceiro capítulo apresenta o programa experimental que foi projetado e inclui informações em relação aos materiais utilizados e a descrição dos ensaios realizados.

No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados alcançados.

O quinto e último capítulo apresenta as conclusões da investigação.

2

ESTADO DA ARTE

2.1. ECONOMIA CIRCULAR: UM PARADIGMA PARA UMA CONSTRUÇÃO MAIS SUSTENTÁVEL

O modelo de economia linear é baseado no princípio extrair-fabricar-descartar. Para realizar a transição de uma economia linear para uma economia circular, em que se pretende prolongar ao máximo o período de vida útil dos materiais e produtos introduzidos na economia, são necessárias medidas e abordagens novas, que incluem evitar a produção de resíduos desde o início, e transformando o que hoje é desperdiçado em novos recursos [1, 2].

O diagrama sistêmico da economia circular, conhecido como “diagrama de borboleta”, ilustra o fluxo contínuo de materiais em uma economia circular (Figura.2.1). São dois ciclos principais – o técnico e o biológico. No ciclo técnico, os produtos e materiais são mantidos em circulação por meio de processos como reutilização, reparação, remanufatura e reciclagem. No ciclo biológico, os nutrientes de materiais biodegradáveis são devolvidos à Terra para regenerar a natureza [2].

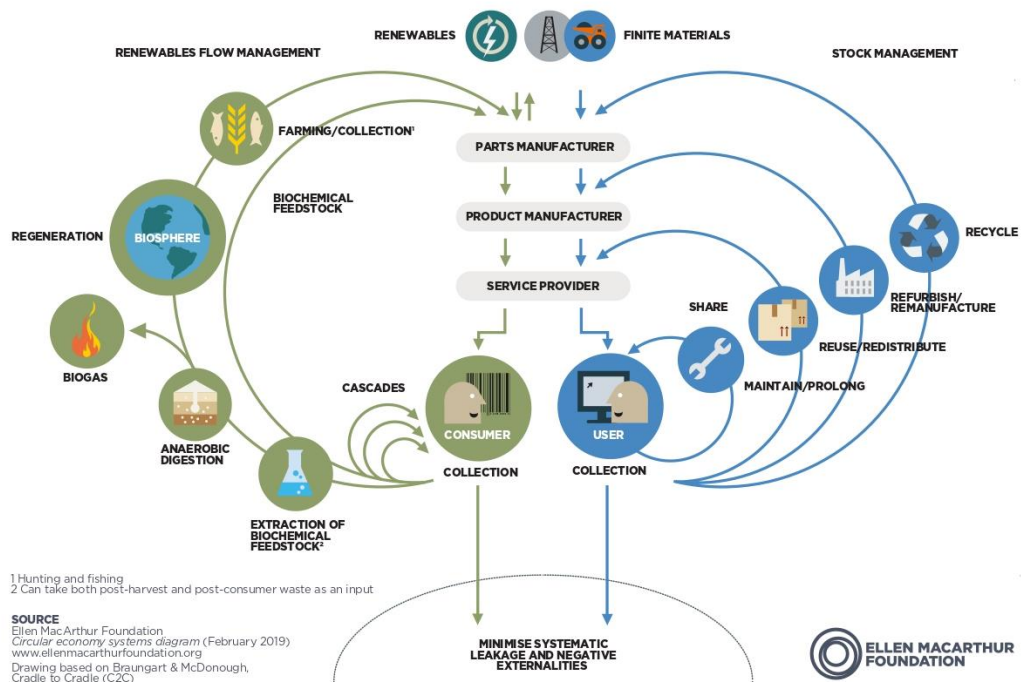


Figura 2.1 – Diagrama de borboleta âmbito da economia circular [2]

Segundo a APA,2021 [1], as principais estratégias deste modelo incluem:

- O ciclo de vida prolongado dos produtos e dos materiais, através da sua reutilização, reparação e remanufatura;
- A produção inteligente, através do desenho de produtos e serviços que eliminam os resíduos e a poluição e reduzem o consumo de recursos;
- O consumo consciente e a sensibilização da sociedade para escolhas sustentáveis e para a redução do desperdício;
- A restauração e renovação de recursos e dos serviços ambientais.

É sabido que há muitos processos que decorrem nas atividades que se desenvolvem no setor da construção que não respeitam estes princípios. Pode admitir-se que não é fácil alterar repentinamente o paradigma da construção. No entanto, também deve ser referido que o setor da construção tem de fazer esforços para encontrar soluções mais verdes, minimizando, ao máximo, os impactos ambientais negativos que são gerados. É, pois, importante, trabalhar para alcançar uma construção mais circular. Soluções como o desenvolvimento de cimentos usando como matérias-primas resíduos, ou a utilização de agregados reciclados em argamassas e betões são dois exemplos que terão um impacto significativo para alcançar esse objetivo.

2.2. CIMENTO: UM MATERIAL DE CONSTRUÇÃO FUNDAMENTAL

Os primeiros vestígios de betão datam de 7000 a.C. em Yiftah El, na Galileia, onde foi encontrado betão de cal em estrada. Ao longo dos séculos, o betão foi utilizado em diversas civilizações antigas, como na construção das pirâmides de Gizé, no Egito por volta de 2500 a.C. Os romanos também utilizaram este material em algumas construções como aquedutos, pontes, cais e grandes edifícios.

A utilização do betão prolongou-se pela Idade Média e pelo Renascimento, sendo utilizado em fundações e em pisos térreos, mas a sua aplicação tornou-se mais ampla e frequente após a invenção do cimento Portland por Louis Vicat. O cimento Portland começou a ser conhecido pelas sua hidraulicidade e rapidez de endurecimento. Os romanos também pensaram que ao juntar pozolanas (finas cinzas vulcânicas que contêm sílica e alumínio) poderiam obter um ligante (cimento pozolânico)

Louis Vicat, descobriu, em 1812, a hidraulicidade das cais e desenvolveu o cimento artificial, através da cozedura conjunta de calcário quando estava responsável pela construção da ponte de Souillac. Em 1824, Joseph Aspdin (Inglaterra) patenteava a fabricação do cimento artificial através de um processo semelhante ao de Vicat, no qual utilizava uma temperatura de calcinação mais elevada, obtendo assim silicato tricálico, que possibilita uma resistência mais elevada. Em 1848, Joseph-Louis Lambot inventou o betão armado, que consiste na incorporação de armaduras de aço para resistir à tração.

A partir de 1890, o betão armado teve uma expansão significativa com as construções de François Hennebique e os estudos teóricos que estabeleceram as leis fundamentais da resistência do material. Em 1889, Auguste Perret começou a utilizar o betão de forma arquitetónica, definindo um estilo característico da época. Ao longo dos anos, foram realizadas várias experiências para determinar as proporções ideais dos componentes do betão. Em 1896, R. Feret estabeleceu uma relação entre a tensão de rotura e a compacidade da mistura, levando em consideração a dosagem de cimento, volume de água e agregados. Esses avanços na composição e uso do betão foram essenciais para a sua ampla aplicação na construção civil, permitindo a criação de estruturas duráveis e resistentes que desempenham um papel fundamental na sociedade moderna [3, 4]. Apresenta-se nas Figura 2.2 e 2.3 alguns exemplos de estruturas em que foi utilizado o cimento.



Figura 2.2 – Ponte e edifício construídos recorrendo ao cimento com material de construção [4]



Figura 2.3 – Pavimentos construídos utilizando o cimento como material de construção [4]

A palavra cimento vem do latim “caementum”, sendo uma referência à velha Roma. Este nome é designado a um material com propriedades hidráulicas, isto é, com as características de ligante, que endurece em contacto com ar ou água. A evolução do cimento vem dos tempos antigos, estando os marcos históricos mais notáveis apresentados na Tabela 2.1 [5]:

Tabela 2.1 – Datas e acontecimentos relevantes na história do cimento [5]

Data	Nome	Origem	Evolução
1786	John Smeaton	Inglaterra	Criação de mistura resistente através de calcinação de calcários argilosos e moles
1818	Vicat	França	Criação de mistura resistente através de calcinação de calcários argilosos e moles
1824	Joseph Aspdin	Inglaterra	Cimento Portland - queima de calcário e argila em forno, dando origem a um pó fino
1844	Isacc Johnson	Inglaterra	Cálculo rigoroso da misturas de matéria prima
1846	Dupont e Demarle	Boulogne	Primeira fábrica de cimento
1855	Frederick Ransome	Inglaterra	Forno rotativo

A tecnologia de produção de cimento foi evoluindo ao longo do tempo. Para a produção de uma tonelada de clínquer em 1870, o constituinte base do cimento, eram necessárias 40 horas. Atualmente produz-se uma tonelada a cada 3 minutos.

2.2.1. CIMENTO PORTLAND

2.2.1.1. Definição

Segundo a norma europeia (EN 197-1) [6] cimento é um ligante hidráulico, isto é, um material inorgânico finamente moído que, quando misturado com água forma uma pasta que ganha presa e endurece por reações e processos de hidratação e que depois de endurecida, conserva a sua capacidade resistente e estabilidade mesmo debaixo de água.

Os cimentos com designação CEM são todos aqueles que estão de acordo com a norma europeia EN 197 – 1. Estes cimentos, quando misturados devidamente com água e agregados podem formar betão ou argamassas com trabalhabilidade adequada, intervalos de resistência especificados em função da idade e com expansibilidade ao longo tempo normalizada.

O endurecimento hidráulico de cimento CEM é principalmente devido à hidratação dos silicatos de cálcio, embora outros compostos químicos, tais como os aluminatos, possam também participar no processo de endurecimento. A soma das percentagens do óxido de cálcio reativo (CaO) e do dióxido de silício reativo (Si₂O) no cimento CEM deve ser pelo menos 50% em massa quando as percentagens são determinadas de acordo com a EN 196-2 [7].

2.2.1.2. Constituintes principais

A norma EN 197-1 [6] apresenta um conjunto de informações relativas aos constituintes principais do cimento, que se reproduzem nesta secção.

O clínquer do cimento Portland (K) resulta de sinterização de uma mistura rigorosamente especificada de matérias-primas (farinha ou pasta) contendo elementos, geralmente expressos em óxidos, CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ e pequenas quantidades de outros materiais. A farinha, ou pasta, está finamente dividida, intimamente misturada e por isso homogénea.

O clínquer é um material hidráulico que deve ser constituído por, pelo menos, dois terços em massa de silicatos de cálcio (3CaO.SiO₂ e 2CaO.SiO₂), sendo o restante constituído por fases do clínquer contendo alumínio e ferro e outros compostos. A razão em massa (CaO)/(SiO₂) não deve ser inferior a 2,0. O teor de óxido de magnésio (MgO) não deve exceder 5,0 % em massa.

A escória granulada de alto-forno (S) resulta do arrefecimento rápido de uma escória fundida de composição apropriada, como a obtida na fusão do minério de ferro num alto-forno, contendo pelo menos dois terços em massa de escória vítrea e possuindo propriedades hidráulicas, quando adequadamente ativada.

A escória granulada de alto-forno deve ser constituída por, pelo menos, dois terços em massa da soma de óxido de cálcio (CaO), de óxido de magnésio (MgO) e de dióxido de silício (SiO₂). O restante contém óxido de alumínio (Al₂O₃), juntamente com pequenas quantidades de outros compostos. A razão em massa (CaO + MgO)/SiO₂ deve exceder 1,0.

Materiais pozolânicos (P,Q) são substâncias naturais de composição siliciosa ou silico-aluminosa ou uma combinação de ambas. A cinza volante e a sílica de fumo, embora tenham propriedades pozolânicas, estão especificadas em secções separadas.

Os materiais pozolânicos quando misturados com água não endurecem por si próprios, mas, quando finamente moídos e na presença de água, reagem à temperatura ambiente normal com o hidróxido de cálcio dissolvido (Ca(OH)_2) para formar compostos de silicato e aluminato de cálcio que desenvolvem resistência. Estes compostos são similares aos que são formados no endurecimento dos materiais hidráulicos. As pozolanas são constituídas essencialmente por dióxido de silício reativo (SiO_2) e por óxido de alumínio (Al_2O_3). O restante inclui óxido de ferro (Fe_2O_3) e outros óxidos. A percentagem de óxido de cálcio reativo que contribui para endurecimento é insignificante. O teor de dióxido de silício reativo não deve ser inferior a 25,0 % em massa.

Os materiais pozolânicos devem ser corretamente preparados, isto é, selecionados, homogeneizados, secos, ou tratados termicamente e pulverizados, dependendo do seu estado de produção ou de entrega. Importa também apresentar detalhes em relação a dois tipos de pozolanas:

- Pozolana natural (P) -Pozolanas naturais são materiais geralmente de origem vulcânica ou rochas sedimentares com apropriada composição química e mineralógica.
- Pozolana natural calcinada (Q) -Pozolanas naturais calcinadas são materiais de origem vulcânica, argilas, xistos ou rochas sedimentares, ativados por tratamento térmico.

A cinza volante (V,W) é obtida por precipitação eletrostática ou separação mecânica das poeiras dos gases de combustão das fornalhas alimentadas com carvão pulverizado.

A cinza obtida por outros métodos não deve ser usada em cimento conforme com a EN 197-1 [6].

A cinza volante poderá ser de natureza siliciosa ou calcária. A primeira tem propriedades pozolânicas; a segunda poderá ter, além disso, propriedades hidráulicas. Existem limites relativos à perda ao fogo que devem ser respeitados.

A cinza volante siliciosa (V) é um pó fino formado principalmente por partículas esféricas com propriedades pozolânicas. É constituída essencialmente por dióxido de silício reativo (SiO_2) e por óxido de alumínio (Al_2O_3). O restante contém óxido de ferro (Fe_2O_3) e outros compostos. Propriedades, como por exemplo, a percentagem de óxido de cálcio reativo (CaO) ou o teor de óxido de cálcio livre, devem respeitar limites.

A cinza volante calcária (W) é um pó fino, com propriedades hidráulicas ou pozolânicas. É constituída essencialmente por óxido de cálcio reativo (CaO), por dióxido de silício reativo (SiO_2) e por óxido de alumínio (Al_2O_3). O restante contém óxido de ferro (Fe_2O_3) e outros compostos. Existem requisitos mecânicos para este constituinte.

O xisto cozido (T), especificamente xisto betuminoso cozido, é produzido num forno especial a temperaturas de cerca de 800 °C. Devido à composição do material natural e ao processo de produção, o xisto cozido contém fases de clínquer, principalmente silicato bicálcico e aluminato monocálcico. Também contém, além de pequenas quantidades de óxido de cálcio livre e de sulfato de cálcio, maiores quantidades de óxidos com reação pozolânica, especialmente dióxido de silício. Assim, quando finamente moído, o xisto cozido apresenta propriedades hidráulicas acentuadas como o cimento Portland e, ainda, propriedades pozolânicas. Este constituinte deve cumprir alguns requisitos, entre os quais se destacam a resistência à compressão e a expansibilidade.

O calcário (L, LL) deve satisfazer os seguintes requisitos: a) o teor de carbonato de cálcio (CaCO_3), calculado a partir do teor de óxido de cálcio, deve ser pelo menos 75 % em massa; b) o teor de argila

não deve exceder 1,20 g/100 g; e c) o teor de carbono orgânico total (TOC) deve estar conforme com um dos seguintes critérios: 1) LL: não deve exceder 0,20 % em massa; 2) L: não deve exceder 0,50 % em massa.

A sílica de fumo (D) provém da redução de quartzo de elevada pureza com carvão em fornos de arco elétrico na produção de ligas de silício e de ferro-silício e é constituída por partículas esféricas muito finas contendo pelo menos 85 % em massa de dióxido de silício amorfo. O teor de silício (Si) não deve ser maior que 0,4 % em massa. A sílica de fumo deve satisfazer requisitos relacionados com a perda ao fogo e a superfície específica (BET).

Para uma moagem conjunta com clínquer e sulfato de cálcio, a sílica de fumo poderá estar no seu estado original, compactada ou granulada (com água) ou processada de forma equivalente.

2.2.1.3. Fabrico de cimento Portland

O cimento possui 70% a 80% de calcário como matéria-prima, por isso, é comum que a localização das fábricas de cimento estejam localizadas nas imediações de formações calcárias [8].

O fabrico do cimento é realizado de acordo com as seguintes fases: a) preparação do cru; b) cozedura; c) arrefecimento, adição de gesso e moagem; e d) ensilagem e ensacagem.

A preparação do cru inclui:

1. Preparação do cru
 - Extração de calcário
 - Britagem
 - Pré homogeneização – formação de pilha de armazenamento com argila e remoção por cortes verticais (75% brita calcária + 25% argila).
 - Moagem e homogeneização (via seca ou via húmida)
 - Correção com aditivos (calcário, sílica, ferro ou alumina)
2. Cozedura
 - Armazenamento nos silos alimentadores do forno
 - Pré aquecimento
 - Entrada no forno rotativo
3. Arrefecimento, adição de gesso e moagem
4. Ensilagem e Ensacagem

O cimento Portland artificial cinzento é obtido a partir de uma mistura devidamente proporcionada, de calcário (carbonato de cálcio), argila (silicatos de alumínio e ferro) e, eventualmente, constituintes ricos em sílica (areia), alumina (bauxite) ou ferro (granalha).

O calcário, após extração, apresenta-se em blocos com dimensões que podem ir até cerca de 1m³ sendo que é necessário reduzir o seu tamanho a uma granulometria adequada para posterior utilização nas fases seguintes do fabrico, operação que é feita em britadores [5].

As fábricas de cimento são projetadas incluindo armazéns para acomodar a grande quantidade e dimensão da matéria-prima.

O processo de dosagem da matéria-prima é feito por meio de computadores. Depois de serem definidas as doses é realizada a moagem da mistura em moinhos tubulares de duas câmaras com corpos moentes (bolas metálicas de diversos diâmetros), ou em moinhos verticais. Quando se realiza o transporte do cru do moinho para o armazém, aproveita-se para se fazer a secagem.

Dependendo da tecnologia de cada fábrica, o processo de cozedura e os tipos de forno variam. O processo de cozedura é realizado a uma temperatura de 1450 °C, através da combustão de carvão pulverizado, fuelóleo, gás natural e outros combustíveis secundários. Este é o processo de formação de clínquer, e às reações químicas originadas neste processo dá-se o nome de clinquerização. Na Tabela 2.2 apresenta-se os principais componentes de clinquerização.

Tabela 2.2 – Componentes de clinquerização [5]

Principais fases	Abrev e composição (%)	Contribuição ao nível do comportamento do clínquer
Silicato Tricálcio (Alite)	C3S = 50-70	Resistência mecânica a idades jovens e a termo; Moderada resistência química; Desenvolvimento de calor de hidratação
Silicato Bicálcio (Belite)	C2S = 15 - 25	Resistência mecânica a longo prazo; Superior resistência química; Baixo calor de hidratação
Aluminato Tricálcio (Aluminato)	C3A = 0 - 17	Fracas resistências mecânicas; Alto calor de hidratação; Muito fraca resistência química
Aluminoferato Tetracálcio (Ferrite)	C4AF = 5 - 15	Baixa resistência mecânica; elevada resistência química; Baixo calor de hidratação
Cal Livre	CaO = 0.5 - 1.5	Baixa resistência mecânica; Alta expansibilidade

O cimento é resultado de um processo de moagem fina de vários componentes, sendo o componente principal e em maior proporção é o clínquer, a que se adiciona o gesso e aditivos como cinzas volantes, escórias de alto forno, folhas de calcário e outros. As proporções de cada componente são devidamente definidas, e a moagem é realizada em fornos verticais ou tubulares.

2.2.1.4. Tipos de Cimento

As classes de resistência dos cimentos correntes, de qualquer dos tipos CEM I (cimento Portland), CEM II (cimento Portland composto), CEM III (cimento de alto-forno), CEM IV (cimento pozolânico) ou CEM V (cimento composto), distinguem-se pelas resistências à compressão, conforme se apresenta na Tabela 2.3 [6].

Tabela 2.3 – Classes de resistência dos cimentos e requisitos mecânicos e físicos (NP EN 197-1) [6]

Requisitos mecânicos e físicos dos cimentos correntes da NP EN 197 - 1					
Classe de resistência	Resistência à compressão (MPa)			Tempo de início de presa (minutos)	Expansibilidade (mm)
	Aos primeiros dias		Resistência de referência		
	2 dias	7 dias	28 dias		
32,5 N	-	≥ 16	-	-	≤ 10
32,5 R	≥ 10	-	≥ 32,5 ≤ 52,5	≥ 75	
42,5 N	≥ 10	-	-	-	
42,5 R	≥ 20	-	≥ 32,5 ≤ 62,5	≥ 60	
52,5 N	≥ 20	-	-	-	
52,5 R	≥ 30	-	-	≥ 45	

Os cimentos actualmente produzidos em Portugal de acordo com a norma NP EN 197-1 [9] são os seguintes:

- cimento Portland CEM 42,5 R e cimento Portland CEM I 52,5 R;
- cimento Portland de calcário CEM II/A-L 42,5 R e cimento Portland de calcário CEM II/B-L 32,5N;
- cimento Portland de pozolana CEM II/B-P 32,5 N (produzido apenas nos Açores);
- cimento Portland composto CEM II/B-M (V-L) 32,5 N;
- cimento pozolânico CEM IV/A-V 32,5 R;
- cimento pozolânico CEM IV/B- V 32,5 R;

Em Portugal, são também fabricados cimentos brancos (br), a saber [9]:

- cimento Portland CEM I 52,5 R (br), cimento Portland de calcário CEM II/A-L 52,5 N(br);
- cimento Portland de calcário CEM II/B-L 32,5 R(br)

A Tabela 2.4 apresenta a constituição dos cimentos que são fabricados em Portugal.

Tabela 2.4 – Cimentos fabricado em Portugal [9]

Cimentos da NP EN 197 - 1 produzidos em Portugal				
Tipo e notação	Mínimo de clínquer Portland	Composição principal		
		Máximo de		
		calcário (L)	Cinzas (V)	pozolana (P)
CEM I	95 %	-	-	-
CEM II/A-L	80 %	20 %	-	-
CEM II/B-L	65 %	35 %	-	-
CEM II/B-P	65 %	-	-	35 %
CEM II/B-M (V-L)	65 %	35 %	35 %	-
CEM IV/A (V)	65 %	-	35 %	-
CEM IV/B (V)	45 %	-	35 %	-

2.2.1.5. Impactos ambientais gerados pela indústria cimenteira

Em 2022 em todo mundo, produziram-se aproximadamente 4,1 mil milhões de toneladas de cimento. A sustentabilidade tem vindo a ser cada vez mais um compromisso da indústria de produção de cimento. De acordo com U.S. Geological Survey Mineral Commodity Summaries 2023 apresenta-se na Figura 2.4 a produção de cimento no mundo [10].

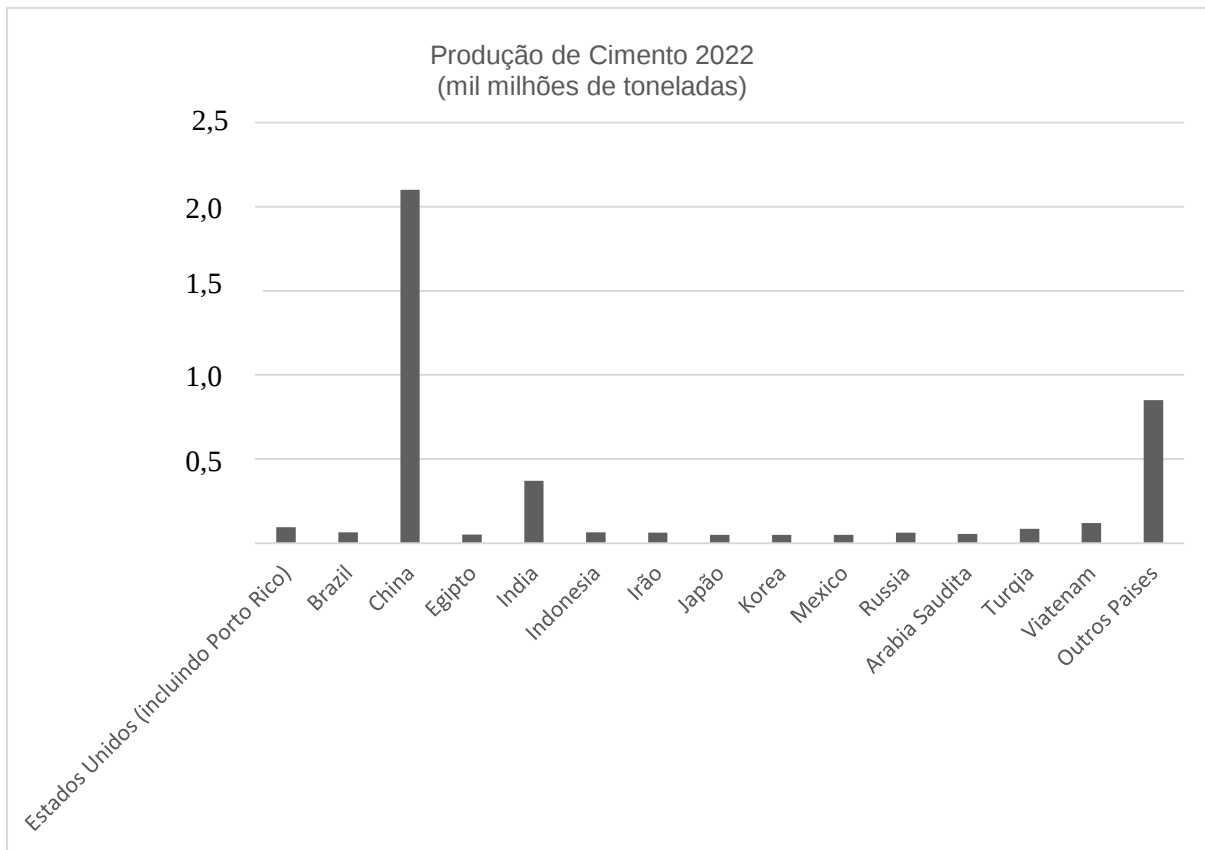


Figura 2.4 – Produção de cimento no mundo em 2022 feito com base em dados da US Geological Survey Mineral Commodity Summaries [10]

O setor de produção de cimento é o terceiro maior consumidor industrial de energia e o segundo maior emissor industrial de CO₂ globalmente. O aumento da população global e os padrões de urbanização, juntamente com as necessidades de desenvolvimento de infraestrutura, aumentam a procura por cimento e betão, levando a uma maior pressão para acelerar a ação na redução da pegada de carbono da produção de cimento. Colocando um cenário que considera os compromissos de mitigação de carbono anunciados e as metas de eficiência energética dos países, o setor de cimento aumentaria as suas emissões diretas de CO₂ em apenas 4% globalmente até 2050, para um crescimento esperado de 12% na produção de cimento no mesmo período. No entanto, ações mais ambiciosas seriam necessárias para atingir as metas climáticas globais [11].

A produção de cimento é caracterizada pelo consumo de grandes quantidades de combustível. Geralmente, utiliza-se uma combinação de diversos produtos como óleo, coque de petróleo e resíduos industriais. A produção de cimento é responsável por 7% das emissões de CO₂ no nosso planeta (Figura 2.5) devido ao processo de combustão a elevadas temperaturas e a descarbonatação da matéria-prima. Por este motivo, torna-se muito importante o estudo de soluções alternativas ao cimento Portland mais sustentáveis, por forma a diminuir os impactos ambientais gerados. Exemplos de alternativas serão abordados nas próximas secções [11, 12].

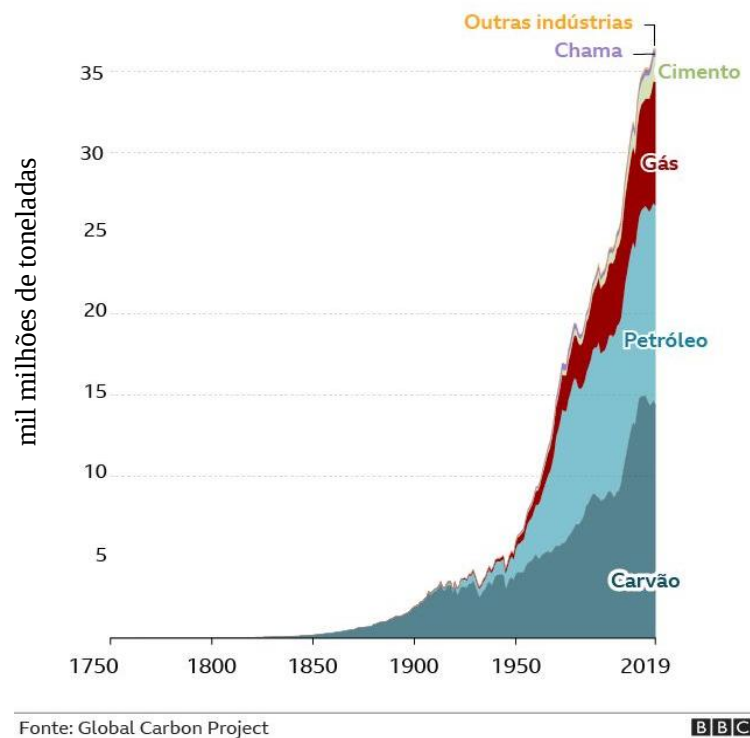


Figura 2.5 – Emissões de CO₂ por queima de combustíveis fósseis [12]

Uma vez que a produção de betão está diretamente relacionada com a produção de cimento, apresenta-se na Figura 2.6 um gráfico com as estimativas do consumo de betão até 2100.

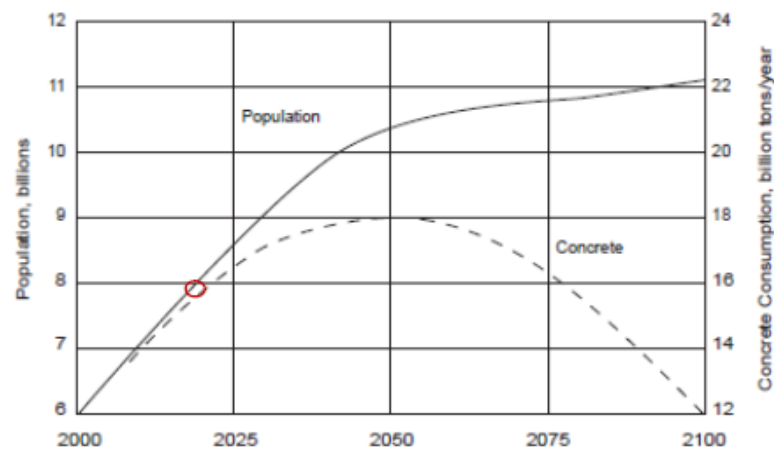


Figura 2.6 – Estimativas do consumo do betão até 2100 [13]

De acordo com a Figura 2.6, a expectativa é que, apesar do aumento da população, o consumo de betão venha a diminuir a partir de 2050. No entanto, não há margem para continuar a exercer pressão no ambiente nas próximas décadas, sendo necessária a procura de soluções alternativas ao cimento Portland, conforme mencionado anteriormente.

2.2.2. CIMENTOS ALCALINOS

2.2.2.1. Resenha histórica

A ativação alcalina de resíduos é um processo químico que permite transformar estruturas vítreas (parcial ou totalmente amorfas e/ou metaestáveis) em compósitos cimentícios bem compactados [14].

Os principais avanços que se observaram neste tópico de investigação surgiram no século XX. A exposição segue García-Lodeiro [15].

O processo de ativação alcalina tem as suas raízes na década de 1930, quando Kulh analisou o desempenho de misturas de escória moída com hidróxido de potássio. No entanto, só décadas mais tarde é que se deram avanços significativos. Em 1967, Glukhovsky gerou materiais conglomerantes através do uso de dissoluções de metais alcalinos com aluminossilicatos livres de cálcio, ou de baixo teor em cálcio [15].

Glukhovsky enquadrou as suas misturas em dois grupos, dependendo dos materiais de partida utilizados:

- Sistemas ativados alcalinamente do tipo $\text{Me}_2\text{O}-\text{Me}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$
- Sistemas ativados alcalinamente na presença de catiões alcalinoterrosos $\text{Me}_2\text{O}-\text{MeO}-\text{Me}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$

No âmbito das investigações que foram conduzidas sobre este tema, deve também referir-se o trabalho de Davidovits, que, em 1982, sintetizou materiais cimentícios através da mistura de álcalis com caulinita, calcário e dolomita. Davidovits designou os materiais que desenvolveu por geopolímeros, por apresentarem uma estrutura polimérica (estes materiais podem associar-se ao sistema $\text{Me}_2\text{O}-\text{Me}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ de Glukhovsky).

A Tabela 2.5 compila um conjunto de momentos importantes no âmbito da história dos cimentos ativados alcalinamente.

Tabela 2.5 – Momentos importantes na história dos cimentos ativados alcalinamente [15]

Data	Nome	Origem	Evolução
1930	Kulh	Alemanha	Investigou o comportamento de misturas de escória moída na presença de uma dissolução de potássio
1937	Chassevent	Desconhecido	Determinou a reatividade da escória usando dissoluções de sódio e de potássio
1940	Purdon	Bélgica	Investigou o endurecimento de cimentos preparados com misturas de escórias com sódio e potássio produzidas a partir de sais alcalinos
1967	Glukhovsky	USSR	Sintetizou cimentos a partir de argilas (aluminossilicatos) e álcalis. Propôs distinguir entre dois sistemas: a) $\text{Me}_2\text{O}-\text{MeO}-\text{Me}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$; b) $\text{Me}_2\text{O}-\text{Me}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$
1982	Davidovits	França	Utilizou álcalis mistos com misturas de caulinita, calcário e dolomita (previamente calcinadas). Patentou "Geopolymer"
1984	Langton & Roy	USA	Estudo de características deste materiais em edifícios antigos
1989	Talling Brandstert	Republica Checa e Filandia	Estado da arte e futuro do betão de escória com ativação alcalina.
1991	Roy & Sibee	USA	Cimentos alcalinos de presa rápida
1993	Shi & Day	Canadá	Ativação de cimentos com base em pozolanas naturais e cal
1994	Glukhovsky & Krivenko	Ucrânia	1ª Conferência Internacional de Cimento e betões alcalinos
1996	Shi	Canadá	Estudos de resistência mecânica, estrutura porosa e permeabilidade de argamassas de escória ativada alcalinamente
1997	Fernández-Jiménez & Puertas	Espanha	Cimentos de escória de ativação alcalina
1999	Palomo & Grutzeck	Espanha & USA	Cinzas volantes ativadas alcalinamente. Cimento para o Futuro
2002	Xu & Van Deventer	Australia	Ativação de múltiplos minerais (Aluminossilicatos)
2006	Fernández-Jiménez & Palomo	Espanha	Determinação quantitativa de fases em cinzas volantes ativadas alcalinamente
2006	Shi, Krivenko & Roy	Internacional	Primeiro livro na língua inglesa: "Alkali activated Cements and Concrete"
2007	Duxson, Fernandez Jiménez & Colaboradores	Australia & Espanha	Estado da arte de ativação de aluminossilicatos
2007	Van Deventer & Palomo	Australia & Espanha	Fundação de comité técnico RILEM "Alkali Activated Materials"

2.2.2.2. Componentes dos sistemas ativados alcalinamente

Os sistemas ativados alcalinamente são formados por dois componentes: o ativador alcalino e o material cimentício (precursor) (Figura 2.7). A exposição segue García-Lodeiro [15].

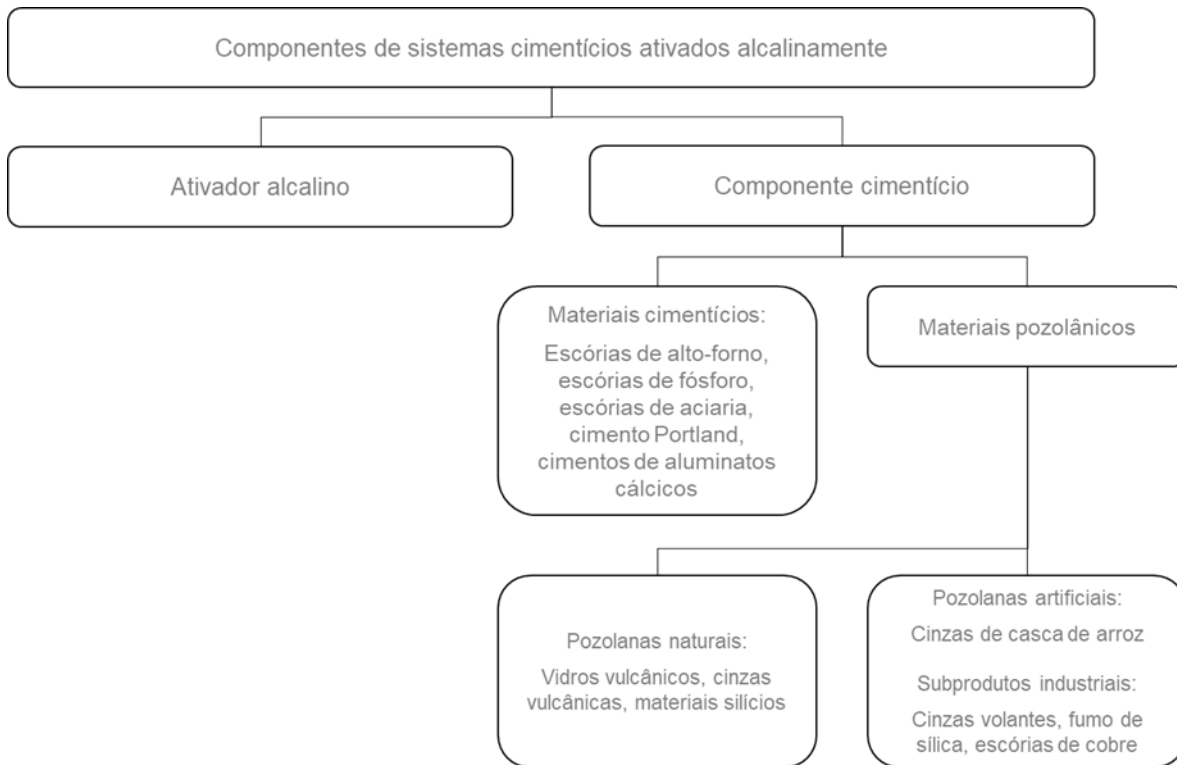


Figura 2.7 – Componentes de sistemas ativados alcalinamente adaptado de [15]

Os ativadores alcalinos são geralmente sais alcalinos ou soluções cáusticas. De acordo com Glukhovsky e colaboradores (1978), os ativadores podem ser classificados nos seguintes seis grupos.

- Soluções cáusticas: MOH ;
- Sais ligeiramente ácidos não silícicos: M_2CO_3 , M_2SO_3 , M_2PO_4 , MF , etc;
- Silicatos: $\text{M}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$;
- Aluminatos: $\text{M}_2\text{O} \cdot n\text{Al}_2\text{O}_3$;
- Aluminossilicatos: $\text{M}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$;
- Sais fortemente ácido não silícicos: M_2SO_4 ;

Importa também referir que, em 1989, Shi e colaboradores descobriram que soluções cáusticas ou sais alcalinos solúveis cujos aniões, ou grupos aniônicos, pudessem reagir com o Ca^{2+} e formar compostos de cálcio menos solúveis que o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, poderiam também ser considerados ativadores.

O valor inicial do pH da dissolução ativadora tem influência nas primeiras fases da ativação das escórias (em especialmente a baixas temperaturas), enquanto que a natureza do anião, ou do grupo aniônico do ativador, assume importância durante as fases de ativação mais tardias (especialmente a elevadas temperaturas).

Resultados de investigações anteriores demonstraram que os ativadores alcalinos têm efeitos diferentes mediante o tipo de escórias utilizadas como componente cimentício. O Na_2CO_3 revelou ser um ativador adequado para escórias ricas em C_2MS , enquanto que o NaOH funciona bem como ativador de escórias ricas em C_2AS . A dose correta de ativador depende do tipo da componente cimentícia, da natureza do ativador e as condições de cura.

Os componentes cimentícios podem ser materiais cimentícios ou pozolânicos. Exemplos destes componentes incluem escórias de alto-forno, escórias de aciaria, cinzas vulcânicas, cinzas de casca de arroz, cinzas volantes ou “sílica de fumo”. Realça-se que a maioria dos estudos realizados no âmbito da ativação alcalina incluem o uso de subprodutos industriais. Como as propriedades químicas e mineralógicas dos subprodutos industriais apresentam variabilidade, é difícil desenvolver cimentos ativados alcalinamente com comportamentos homogêneos.

2.2.2.3. Produtos de reação

Os produtos de reação dos cimentos ativados alcalinamente são um composto amorfo. Estes produtos dependem, entre outras, das propriedades químicas dos materiais utilizados como componente cimentícia. A exposição segue García-Lodeiro [15].

O principal produto de reação da ativação de sistemas ricos em cálcio e sílica (o caso das escórias de alto-forno) é um gel do tipo C-S-H (silicato cálcico hidratado), que é semelhante ao gel que se forma durante a hidratação do cimento Portland. Este gel pode evoluir para um gel do tipo C-(A)-S-H (aluminossilicato cálcico hidratado) (Figura 2.8) quando pequenos teores de alumínio são incorporados. Neste contexto, diz-se que o alumínio ocupa as denominadas posições ponte.

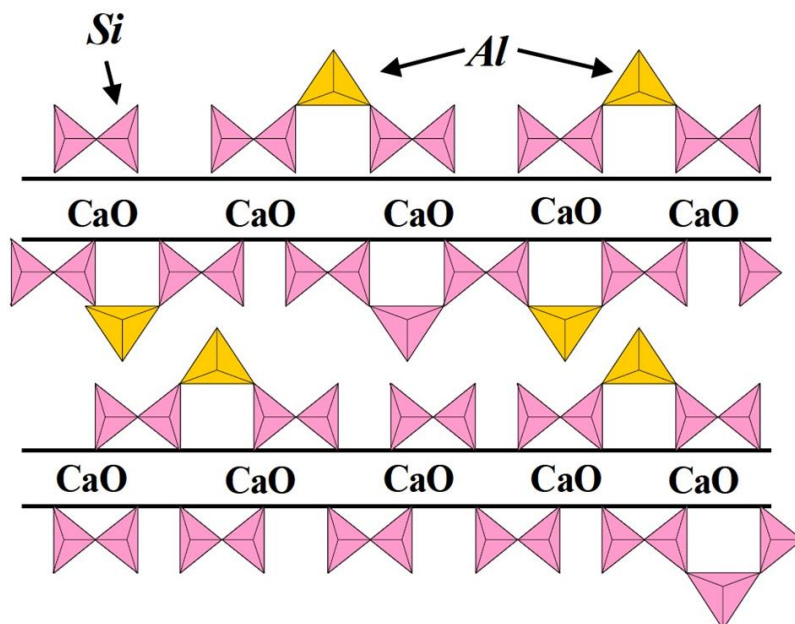


Figura 2.8 – Estrutura do gel C-(A)-S-H adaptado de [15]

Quando os sistemas são ricos em sílica e alumina (casos das cinzas volantes ou do metacaulino), forma-se um gel do tipo N-A-S-H (aluminossilicato sódico hidratado), com uma estrutura tridimensional (Figura 2.9).

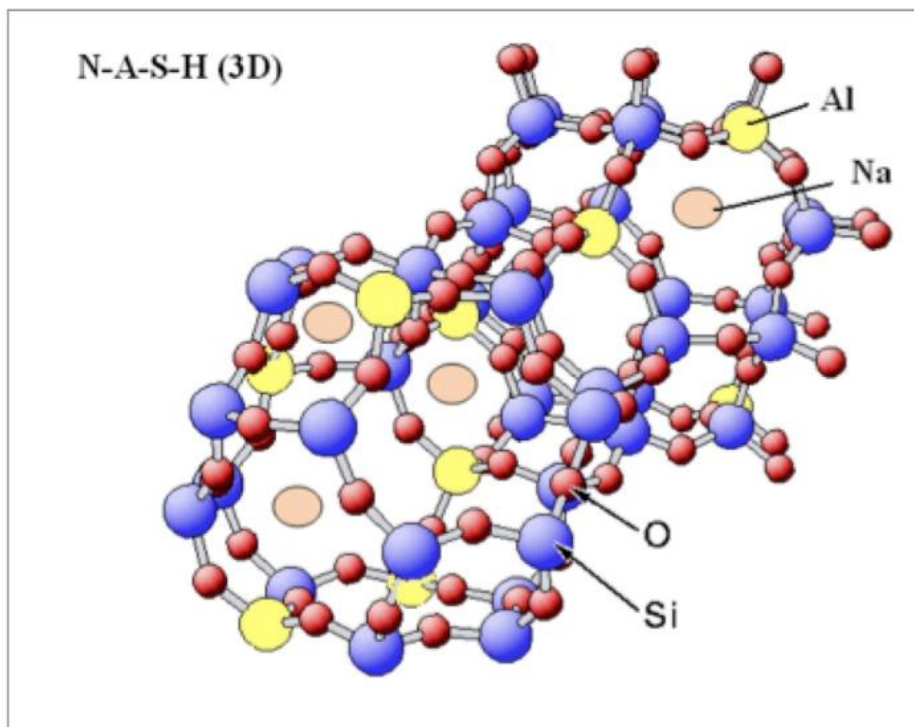


Figura 2.9 – Estrutura do gel N-A-S-H adaptado de [16]

No caso do gel do tipo C-S-H, os tetraedros de silício existentes unem-se e geram cadeias lineares (estrutura “*dreierketten*”). Por outro lado, o gel do tipo N-A-S-H contém tetraedros de silício e alumínio que se distribuem aleatoriamente gerando um esqueleto tridimensional.

2.2.3. CIMENTOS ALCALINOS HÍBRIDOS

2.2.3.1. Princípios

Os denominados cimentos alcalinos híbridos consistem em ativar alcalinamente misturas em que se utilizam elevadas percentagens de materiais cimentícios suplementares (tais como escória de alto-forno, cinzas volantes, ou pozolanas) com baixos teores de clínquer Portland (preferencialmente até 30%) através do uso de ativadores alcalinos (habitualmente até 5%) [17].

A utilização de materiais cimentícios suplementares no cimento Portland está salvaguardada na norma NP EN 197-1. No entanto, quando a percentagem destes materiais suplementares é alta, observam-se cimentos com tempos de presa mais altos e resistências mecânicas baixas para idades de cura mais jovens.

Os cimentos alcalinos híbridos surgem como uma solução para ultrapassar esses dois inconvenientes. Os ativadores alcalinos utilizados neste contexto podem ser líquidos (NaOH, soluções de silicato de sódio ou silicato de potássio) ou sólidos (silicatos de sódio ou potássio, carbonatos ou sulfatos) [18].

Realça-se a possível utilização de ativadores no estado sólido, uma vez que o uso de soluções alcalinas potencia o risco de degradar materiais e equipamentos utilizados para fabricar materiais de construção, nomeadamente, argamassas ou betões. Quando se utilizam ativadores no estado sólido, a hidratação dos cimentos alcalinos híbridos é realizada com água, um outro aspeto que beneficia a sua utilização quer no contexto de obra, quer na indústria da prefabricação de elementos de betão. Deve ainda relevar-se que este tipo de cimentos híbridos ganha presa à temperatura ambiente, ao contrário de alguns cimentos ativados alcalinamente.

Apesar dos bons desempenhos em termos de resistências mecânicas que se conhecem para os betões fabricados com cimentos alcalinos, a circunstância da utilização do ativador no estado sólido no caso dos cimentos híbridos, é um aspeto com muito peso tendo em conta o objetivo de acelerar a sua introdução no setor da construção.

2.2.3.2. Produtos de reação

Os produtos de reação que se detetam nos cimentos alcalinos híbridos são os já referidos geles amorfos. Os tipos de geles são condicionados pelas matérias-primas que são utilizadas como materiais cimentícios suplementares.

No entanto, no caso dos cimentos alcalinos híbridos, observa-se habitualmente a coexistência de uma mistura de geles cimentícios do tipo C-S-H e C-A-S-H, ou N-A-S-H, que são, respetivamente, os produtos de reação da hidratação do clínquer Portland e da ativação alcalina de escória e de aluminossilicatos [19]. As estruturas destes geles foram já discutidas na secção 2.3.2.3.

2.2.3.3. Resultados de investigações anteriores sobre cimentos alcalinos híbridos

As composições dos cimentos alcalinos híbridos podem ser diversas, considerando a vasta existência de materiais cimentícios suplementares. Nesta secção, apresentar-se-ão alguns aspetos decorrentes de três investigações com cimentos híbridos que foram conduzidas anteriormente. Os aspetos incluem as composições dos cimentos alcalinos híbridos adotados, os valores das resistências mecânicas (obtidas através do fabrico de argamassas de acordo com a norma EN 196-1 [20]), bem como os tipos de geles formados (que providenciam aos cimentos as suas propriedades mecânicas).

A investigação de García-Lodeiro et al. [21] debruçou-se sobre o estudo de um cimento híbrido composto por 60% de clínquer Portland e 40% de uma mistura de cinzas provenientes da incineração de resíduos sólidos urbanos. O ativador usado (5%) foi uma mistura de CaSO_2 e Na_2SO_4 .

Os ensaios de resistências mecânicas que foram realizados revelaram uma resistência à compressão aos 28 dias igual a 33 MPa, valor esse, que se pode considerar bastante positivo. No que diz respeito aos produtos de reação, observou-se a presença de vários tipos de geles, a saber: geles C-(A)-S-H e C-A-S-H com a incorporação de S, Cl e metais pesados como o Pb.

Que et al. (2016) [17] investigaram um cimento híbrido constituído por 30% de clínquer Portland, 32,5% de escória e 32,5% de cinza volante. O tipo de ativador usado não foi divulgado, apenas o seu teor (5%). Neste estudo, foi estudado o efeito de um ciclo de pré-cura de 20 horas com duas temperaturas: 25 °C e 85 °C.

Estes cimentos alcançaram resistências à compressão aos 28 dias de cura a rondar os 35 MPa e os 30 MPa, respetivamente, para temperaturas de pré-cura de 25 °C e 85 °C. Os produtos de reação que se detetaram foram uma mistura de geles do tipo C-(A)-S-H e C-A-S-H.

No caso da investigação de Fernández-Jiménez et al. [22], o cimento híbrido estudado em que se utilizou Na_2SO_4 como ativador sólido (teor igual a 2,5%) incluiu 50% de cimento Portland 42,5R e 50% de cinza volante.

A resistência à compressão que foi observada para este cimento após 28 dias de cura foi notável: 53 MPa. No que diz respeito aos produtos de reação que se formaram, foi possível observar uma mistura de geles do tipo C-A-S-H e N,C-A-S-H.

Conforme se pôde constatar, a grande maioria dos cimentos estudados nestas investigações alcançou resistências mecânicas que cumprem requisitos que constam da norma NP EN 197-1, no que diz respeito às classes de resistência dos cimentos. Apesar de este não ser o único requisito, a verdade é que obter as resistências mínimas é um passo muito importante para consolidar os cimentos alcalinos híbridos como soluções alternativas ao cimento Portland.

2.3. ARGAMASSAS

2.3.1. DEFINIÇÃO

As argamassas são materiais de construção formados por uma mistura homogênea de um ligante hidráulico, agregados (como, por exemplo, as areias), água e, caso se revele necessário, adjuvantes e adições, que têm a função de ajustar propriedades como a presa ou a trabalhabilidade. Estes componentes, quando misturados, formam uma pasta que endurece, conferindo à mistura níveis de coesão e resistência mecânica adequados à sua utilização como material de construção [13, 23].

2.3.2. LIGANTES, AGREGADOS, ADJUVANTES E ADIÇÕES

As argamassas podem ser fabricadas usando como ligante o gesso, as cais aéreas ou hidráulicas, e os cimentos [24]. Informações mais pormenorizadas acerca dos ligantes, em especial, os cimentos, por ser este o material de construção comumente utilizado em argamassas, podem ser consultadas na secção 2.2.

Um agregado, segundo a norma Europeia EN 998-1 [25], é um material granular inerte, ou seja, não intervém na reação de endurecimento da argamassa e é usualmente utilizado para aumentar a compacidade e conferir estabilidade volumétrica à pasta. São classificados segundo várias categorias como: origem (natural ou artificial), dimensão das partículas (finas ou grosseiras) e massa volúmica (pesados ou leves) [23].

Os agregados podem ser classificados de acordo com a sua origem, densidade e dimensão das partículas [8]. No que diz respeito à sua origem, os agregados podem ser: naturais, artificiais ou reciclados. As areias, britas ou godos pertencem ao grupo dos agregados naturais, enquanto que, por exemplo, os agregados provenientes da demolição de estruturas de betão enquadram-se no grupo dos agregados reciclados. A argila expandida ou escórias metalúrgicas são exemplos de agregados artificiais.

Relativamente à densidade, os agregados podem ser considerados como leves, de massa volúmica normal e pesados. De acordo com as dimensões das partículas, o agregado pode ser considerado fino ou grosso (quando a dimensão máxima das suas partículas são, respetivamente, inferiores ou iguais a 4 mm, ou superiores a esta dimensão) [24].

Os agregados utilizados nas argamassas devem cumprir um conjunto de requisitos, a saber [24]:

- “Forma, dimensão máxima e mínima e composição granulométrica adequadas;

- Não reagir com agentes externos;
- Compatibilidade química com os constituintes da argamassa;
- Resistências mecânicas à altura das necessidades impostas;
- Ausência de materiais nocivos, tais como matéria orgânica, partículas demasiado finas ou quantidade excessiva de argila.”

Informações mais detalhadas em relação aos requisitos que os agregados e fileres devem cumprir para que possam ser utilizados nos diversos tipos de argamassas podem ser consultados na norma NP EN 13139 [26].

Os adjuvantes e adições são materiais que podem ser utilizados para alterar diversas propriedades das argamassas, quer no estado fresco, quer no estado endurecido. Exemplos de adjuvantes incluem plastificantes/redutores de água, introdutores de ar, aceleradores ou retardadores de presa. Os pigmentos orgânicos, as cinzas volantes ou a sílica de fumo são exemplos de adições [24].

2.3.3. FUNÇÕES E APLICAÇÕES

As argamassas podem ser utilizadas como material de construção para exercerem diversas funções, a saber [24]:

- “União de elementos de alvenaria e auxílio à resistência dos esforços horizontais que surgem em paredes (flexão e corte – motivado pelo vento; paralelos ou perpendiculares – ao plano das paredes).
- Absorção de certas deformações que a alvenaria ou juntas sofrem naturalmente.
- Acabamento de tectos e paredes (rebocos), regularização de pavimentos (betonilhas), reparação de obras (betão, reabilitação, ...).”

As argamassas são um material muito versátil, que podem ser utilizadas em diferentes fases da construção. A norma NP EN 13139 [26] especifica exemplos de aplicações correntes em edifícios, estradas e trabalhos no âmbito da engenharia civil destes materiais de construção:

- Argamassas para alvenaria;
- Argamassas para revestimento de pavimentos;
- Argamassas para revestimento de paredes interiores;
- Argamassas para revestimento de paredes exteriores;
- Argamassas para fundação;
- Argamassas para reparação;
- Injeções.

2.4. ARGAMASSAS REFORÇADAS COM FIBRAS

2.4.1. OBJETIVOS

Um conjunto muito alargado de fibras discretas de diferentes materiais são utilizadas atualmente para reforçar matrizes cimentícias, argamassas ou betões. Estes elementos são utilizados com o objetivo de melhorar o comportamento pós-fissuração, a capacidade de absorção de energia ou o controlo de fendilhação desses materiais de construção. A exposição segue Barros [27].

A utilização das fibras conduz a uma resistência suplementar à degeneração das microfissuras, que são geradas por ação das cargas impostas, em macrofendas, uma vez que será necessária uma maior energia para promover o deslizamento das fibras relativamente à matriz envolvente (ou para induzir a cedência das fibras).

As fibras que se utilizam habitualmente têm um comprimento superior às dimensões dos agregados grossos. Neste contexto, as fibras exercem a função de reforço de caráter estrutural, uma vez que a sua solicitação só se inicia após a fendilhação da matriz envolvente. Desta forma, a participação das fibras não tem um efeito muito significativo na carga de início de fendilhação. Isto só ocorrerá no caso de se introduzirem microfibras que atravessam as microfendas, conforme esquematizado na Figura 2.10. Neste quadro, o que se observa é que as microfibras vão realizar a missão de “coser” as microfendas que se desenvolvem de forma aleatória na matriz, o que conduz a um aumento da amplitude da fase de comportamento em regime elástico do material em estudo.

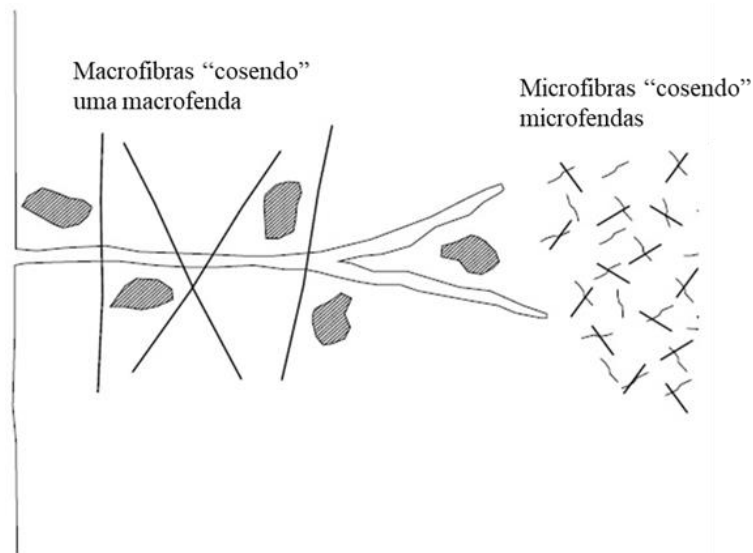


Figura 2. 10 – Controle de fendilhação realizado pelas fibras adaptado de [27]

2.4.2. TIPOS DE FIBRAS E PROPRIEDADES

Existem fibras de diversos materiais existentes no mercado para realizar a função de reforço. São exemplos as fibras de aço, de carbono, de vidro, naturais ou sintéticas (por exemplo, de poliéster ou polietileno). A Tabela 2.6 exhibe um conjunto de propriedades relativamente aos diversos tipos de fibra disponíveis. Relativamente às informações fornecidas, nomeadamente no que diz respeito a duas propriedades relevantes que são a resistência à tração e o módulo de elasticidade, importa mencionar que a forma geométrica da fibra tem especial influência no comportamento da interface fibra-matriz envolvente.

Tabela 2.6 – Propriedades das fibras.[28]

Tipo de fibra	Diâmetro	Densidade	Módulo de Elasticidade	Resistência à Tração	Extensão Rotura
	(μm)	(g/cm ³)	(GPa)	(MPa)	(%)
Aço	5 - 1000	7,85	195 - 210	200 – 2600	0,5 – 5,0
Vidro (E)	8 - 15	2,54	72	2000 – 4000	3,0 – 4,8
Vidro (AR)		2,7	80	1500 - 3700	2,5 – 3,6
Acrílico (PAN)	5 - 17	1,18	14,6 – 19,6	200 – 1000	7,5 – 50
Aramida	10 - 12	1,4 – 1,5	62 – 130	2000 - 3500	2,0 – 4,6
Carbono (LM)	7 - 18	1,6 – 1,7	38 – 43	800 - 1100	2,1 – 2,5
Carbono (HM)	7 - 18	1,7 – 1,9	200 - 800	1500 - 4000	1,3 – 1,8
Nylon	20 - 25	1,16	5,17	965	20
Poliéster	10 – 80	1,34 – 1,39	10 – 18	280 – 1200	10 – 50
Polietileno (PE)	25 - 1000	0,96	5	80 - 600	12 – 100
Polietileno (HPPE)	-	0,97	80 - 150	1000 - 4000	2,9 – 4,1
Polipropileno (PP)	10 - 200	0,90 – 0,91	3,5 – 4,9	310 - 760	6 – 15
Acetato de polivinil (PVA)	3 - 8	1,2 – 2,5	20 - 80	800 - 3600	4 - 12
Madeira	15 - 125	1,5	10 – 50	300 - 2000	20
Coco	100 - 400	1,12 – 1,15	19 - 25	120 - 200	10 - 25
Bambu	50 - 400	1,5	33 - 40	200 - 440	-
Juta	100 – 200	1,02 – 1,04	25 - 32	250 - 350	1,5 – 1,9
Amianto	0,02 - 25	2,55	164	200 - 1800	2 - 3
Wollastonita	25 - 40	2,87 – 3,09	303 - 530	2700 - 4100	-

No que diz respeito às fibras metálicas, a que se dará maior destaque por serem objeto deste estudo, é importante referir que duas das suas vantagens, que podem ser observadas na Tabela 2.6, são a elevada resistência à tração e o elevado módulo de elasticidade.

De acordo com Barros [27], as principais características das fibras são a forma e o material usado como matéria-prima, o comprimento, o diâmetro, a esbelteza (relação entre o comprimento e o diâmetro), a percentagem volumétrica na mistura, a resistência à tração e a aderência à matriz envolvente.

2.4.3. FIBRAS DE AÇO

Considerando a norma NP EN 14889-1 [29], as fibras de aço podem ser divididas em cinco grupos, de acordo com o material de base utilizado no seu fabrico:

- Grupo I: fio estirado a frio;
- Grupo II: cortado de chapa;
- Grupo III: extraído a quente;
- Grupo IV: fio estirado a frio por aplainamento;
- Grupo V: extraído de blocos de aço por fresagem.

A maioria das fibras de aço que são utilizadas para exercer a função de reforço pertencem ao grupo I. As fibras dos grupos II e IV também se utilizam com bastante frequência. Por outro lado, as fibras que menos se utilizam neste contexto pertencem aos grupos III e V [30].

Conforme mencionado anteriormente, um aspeto relevante é a forma geométrica da fibra. A Figura 2.11 apresenta algumas dessas formas. Conforme se percebe, o mecanismo de ancoragem da fibra à matriz envolvente varia de acordo com a sua forma geométrica.

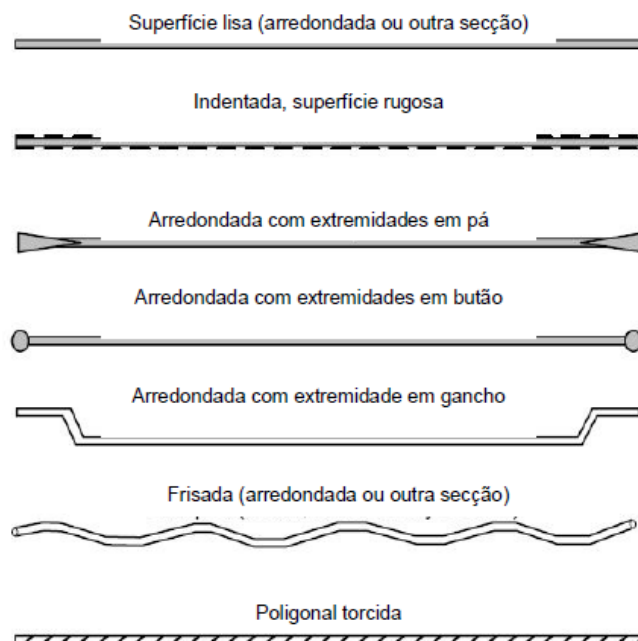


Figura 2.11 – Formas geométrica das fibras de aço adaptado de [31]

O comprimento das fibras varia entre 30 mm e 60 mm. Por outro lado, o diâmetro das fibras pertence ao intervalo 0,15-1 mm. O fator de forma, que corresponde à relação entre o comprimento e o diâmetro da fibra e varia habitualmente entre 30 e 100, é um parâmetro com especial relevância. A expectativa é que quanto maior for o fator de forma, mais positivas serão os efeitos que as fibras vão fornecer (isto, desde que se garanta uma distribuição de fibras homogênea). No entanto, é importante mencionar que maiores fatores de forma resultam na degradação da trabalhabilidade e homogeneidade na distribuição das fibras [32].

3

PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. MATERIAIS

Nas próximas secções serão apresentados aspetos acerca dos principais materiais utilizados no fabrico e caracterização de pastas e argamassas, a saber: escória branca de aciaria, cimento CEM I 42,5R e fibras metálicas.

3.1.1. ESCÓRIA BRANCA DE ACIARIA

A escória branca estudada neste trabalho (doravante escória), fornecida pela unidade de produção de aço da MEGASA localizada na Maia, foi gerada no processo de afinação que ocorre durante a produção de aço na aciaria elétrica (Figura. 3.1).



Figura 3.1 - Escória da Megasa com alguns elementos de aço visíveis

3.1.1.1. Preparação e moagem

O primeiro procedimento que se realizou à amostra fornecida foi a secagem da escória, numa estufa, a uma temperatura de 110°C, durante 24 horas (Figura 3.2).



Figura 3.2 – Secagem da escória na estufa

Uma vez que as amostras continham partículas com dimensões consideráveis, após o processo de secagem, decidiu-se seleccionar para o presente trabalho a fração do material inferior a 1 mm, utilizando um peneiro de malha quadrada com a abertura mencionada (Figura 3.3).



Figura 3.3 – Processo de peneiração de escória

No sentido de perceber que quantidade de material seria valorizada neste trabalho face à amostra fornecida, realizaram-se pesagens iniciais. Numa análise a dois baldes recebidos, verificaram-se percentagens de aproveitamento de 70,6% e 76,0% (Tabela 3.1). De forma conservativa, pode afirmar-se que a taxa de valorização da escória que é gerada na unidade de produção de aço da Megasa rondou os 70% neste trabalho de investigação, um valor muito significativo (Figuras 3.4 e 3.5 ilustram o material aproveitável e não aproveitável).

Tabela 3.1 – Taxa de aproveitamento da escória

	Amostra (kg)	Fração da amostra < 1 mm (kg)	Taxa de aproveitamento (%)
Balde 1	17,53	12,38	70,6
Balde 2	16,86	12,81	76,0



Figura 3.4 – Imagens da escória tal como recebida



Figura 3.5 – Material retido e passado no peneiro de malha com abertura de 1mm

Com o objetivo de aumentar a reatividade da escória, realizou-se a sua ativação mecânica, através da condução de um ciclo de moagem de 16 horas. Nestes ciclos, adotou-se um rácio 1:4 no que diz respeito à relação entre a massa de material e a massa de esferas. Importa também dizer que foram utilizadas esferas metálicas com diferentes diâmetros. Por forma a evitar contaminação de materiais, o moinho foi submetido a um processo de limpeza utilizando areia antes de serem iniciados os ciclos de moagem (Figura. 3.6).



Figura 3.6 – Moagem de escória

Após cada ciclo, procedeu-se ao armazenamento da escória moída (por cada ciclo, foi moída uma massa de 2 kg). O procedimento incluiu a utilização de um peneiro com uma malha quadrada de abertura igual a 4,5 mm por forma a garantir que as esferas não se misturavam com a escória moída (Figura. 3.7).



Figura 3.7 – Etapas de processo de moagem e armazenamento da escória

3.1.1.2. Composição química

A composição química da escória foi analisada através de espectrometria de fluorescência de raios-X e pode ser consultada na Tabela 3.2. Observou-se que os principais compostos da escória foram o CaO (50,97%) e o SiO₂ (22,50%). Realça-se, também, a baixa percentagem de Al₂O₃ (3,99%), um composto com importância no âmbito da técnica da ativação alcalina.

Tabela 3.2 – Composição química de escória e do cimento

Material	Composição em compostos (%)									
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Fe ₂ O ₃ /FeO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MnO
Escória	50,97	22,50	3,99	6,16	6,13	— / 0,77	0,02	—	0,16	0,18
Cimento	62,48	19,47	5,77	5,53	2,55	2,20 / —	1,05	0,28	0,19	0,02

3.1.1.3. Análise granulométrica

A análise do tamanho das partículas da escória na fração inferior a 1 mm, antes e após moagem, foi realizada através de difração a laser (Figura. 3.8). O efeito do ciclo de moagem foi notório. Após a moagem, não se observou a existência de partículas superiores a 76 µm, enquanto que na escória não moída aproximadamente 25% das partículas encontravam-se acima dessa dimensão. Outro aspeto a destacar é que, após a moagem, aproximadamente 75% das partículas encontravam-se abaixo de 30 µm. Por outro lado, esta percentagem de passados acumulados na escória não moída foi aproximadamente igual a apenas 33%.

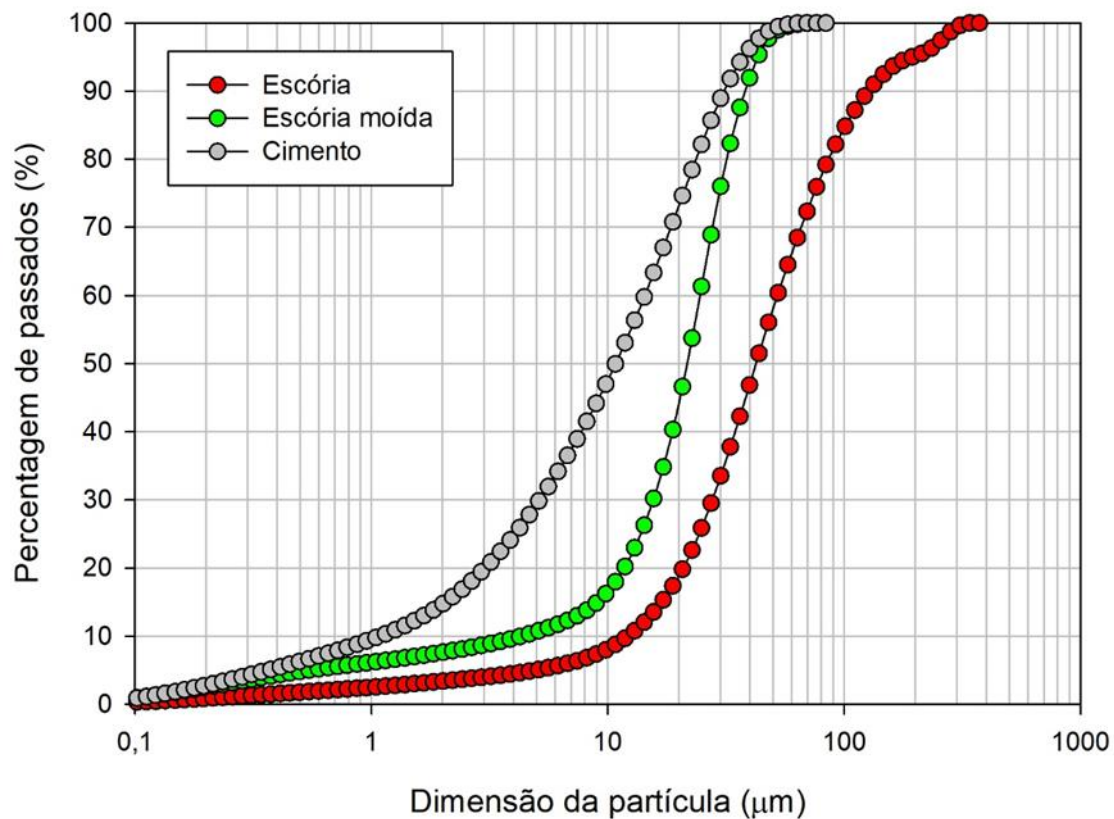


Figura 3.8 – Distribuição granulométrica das partículas de escória e cimento.

3.1.1.4. Massa volúmica

A determinação da massa volúmica foi realizada utilizando um picnómetro de Le Chatelier (Figura. 3.9). A unidade de medida padrão utilizada é o quilograma por metro cúbico (kg/m³). Para determinar a massa volúmica do cimento recorreu-se à norma NP EN 196-6 [33].

O procedimento do ensaio inclui diversos passos:

- Secagem da amostra;
- Pesagem da amostra (massa superior a 50 g) (Figura. 3.10);
- Introdução de petróleo no voluminímetro (Figura. 3.11) e leitura (V_1);
- Colocação da amostra no voluminímetro, seguida de agitação (Figura. 3.11);
- Período de repouso de uma hora do voluminímetro na câmara climática (Figura. 3.12);
- Realização das leituras no picnómetro (V_2).



Figura 3.9 – Picnómetro



Figura 3.10 – Pesagem da amostra

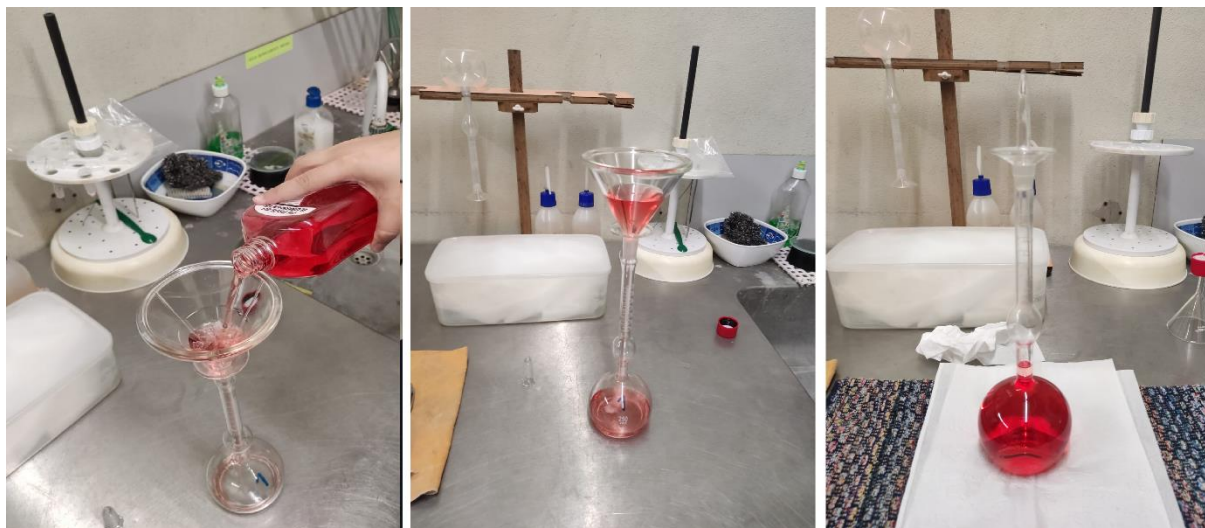


Figura 3.11 – Colocação de petróleo no picnômetro

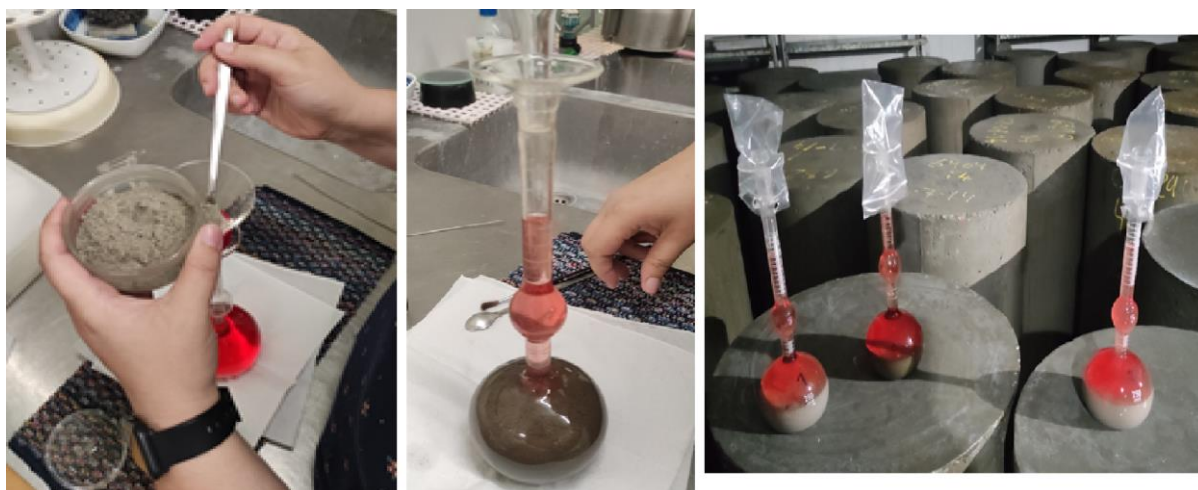


Figura 3.12 – Introdução da amostra no picnômetro e repouso na câmara climática

As Tabelas 3.3 e 3.4 apresentam os resultados das massas volúmicas de escória intacta e moída.

Tabela 3.3 – Massa volúmica de escoria intacta

Referência da amostra:	Escória intacta - provete 1 (escória seca <1mm) picnômetro 2		
	Líquido auxiliar		petróleo
m -	Massa do provete	(g)	65
V ₁ -	Leitura no voluminímetro contendo apenas o líquido auxiliar	(cm ³)	0,2
V ₂ -	Leitura no voluminímetro contendo o líquido auxiliar e o provete	(cm ³)	22
	Massa volúmica do provete = $(m/(V_2-V_1))$	(g/cm ³)	2,98

Tabela 3.4 – Massa volúmica escória moída

Referência da amostra:		Escória moída - provete 1 - picnômetro 1	
		Líquido auxiliar	petróleo
m -	Massa do provete	(g)	65
V ₁ -	Leitura no voluminímetro contendo apenas o líquido auxiliar	(cm ³)	0,2
V ₂ -	Leitura no voluminímetro contendo o líquido auxiliar e o provete	(cm ³)	21,6
	Massa volúmica do provete = $(m/(V_2-V_1))$	(g/cm ³)	3,04

Os resultados demonstraram que a massa volúmica da escória moída (3,04 g/cm³) foi ligeiramente superior à massa volúmica da escória não moída (2,98 g/cm³) (Tabela 3.3).

3.1.2. CIMENTO

O cimento Portland utilizado neste trabalho, fornecido pela Secil, foi um cimento CEM I 42,5 R (Figura 3.13). Este tipo de cimento obtém resistências elevadas para idades de cura muito jovens e apresenta uma resistência mínima igual a 42,5 MPa após 28 dias de cura.



Figura 3.13 – Cimento CEM I 42.5 R

3.1.2.1. Composição Química

A composição química do cimento, determinada igualmente através de espectrometria de fluorescência de raios-X, está exibida no Tabela 3.2. Observou-se que os principais compostos deste cimento foram o CaO (62,48%), o SiO₂ (19,47%) e o Al₂O₃ (5,77%).

3.1.2.2. Análise granulométrica

A análise do tamanho das partículas do cimento foi realizada recorrendo à mesma técnica utilizada para a escória, e está exibida na Figura 3.8. Conforme pode ser constatado, o cimento foi o material mais fino

utilizado na investigação. No que diz respeito à dimensão inferior a 30 μm , observou-se uma percentagem de acumulados superior a 88%.

3.1.2.3. Massa volúmica

O ensaio de massa volúmica do cimento foi realizado de acordo com o procedimento já descrito na secção 3.1.1.4. Os resultados do ensaio podem ser consultados na Tabela 3.5. Observou-se que o cimento apresentou a massa volúmica mais elevada (3,11 g/cm³) entre os materiais analisados.

Tabela 3.5 – Massa volúmica de cimento

Referência da amostra:		CEM I 42,5 - provete 1	
		Líquido auxiliar	petróleo
m -	Massa do provete	(g)	65
V ₁ -	Leitura no voluminímetro contendo apenas o líquido auxiliar	(cm ³)	0
V ₂ -	Leitura no voluminímetro contendo o líquido auxiliar e o provete	(cm ³)	20,9
Massa volúmica do provete = $(m/(V_2 - V_1))$		(g/cm ³)	3,11

3.1.3. FIBRAS DE AÇO

As fibras de aço utilizadas neste trabalho com a referência 65/35BG foram fornecidas pela Bekaert e pertenciam à família de produtos Dramix® 3D (Figura 3.14). Estas fibras tinham um comprimento de 35 mm e as suas extremidades eram dobradas, o que promove uma ancoragem mais eficiente.



Figura 3.14 – Fibras utilizadas na investigação

De acordo com as informações do fabricante, estas fibras apresentavam uma resistência à tração e um módulo de elasticidade iguais a 1345 MPa e 210 GPa, respetivamente. A extensão na rotura era igual a 0,8%, enquanto que a esbelteza das fibras era igual 55.

Um outro aspeto relevante é que estas fibras são coladas entre si, formando plaquetas. A cola utilizada dissolve-se na água da amassadura aquando do processo de homogeneização dos diversos constituintes das argamassas e a expectativa é a distribuição homogénea das fibras na mistura.

3.2. METODOLOGIA

3.2.1. HOMOGENEIZAÇÃO DOS CIMENTOS

Antes de se iniciar o fabrico das pastas e argamassas, cujas composições vão ser apresentadas nas próximas secções, foi necessário realizar um processo de homogeneização dos cimentos. Este processo consistiu em colocar na câmara de moagem os diferentes componentes dos cimentos híbridos (cimento, escória e ativador). As esferas metálicas foram removidas da câmara e foi colocado um acessório de cartão para ajudar a concretizar a homogeneização (Figura 3.15). Cada um dos ciclos de homogeneização teve a duração de uma hora.



Figura 3.15 – Preparação da câmara de moagem para homogeneização dos cimentos

A preparação dos materiais para o processo de homogeneização foi realizada de acordo com os seguintes passos: a) pesagem do cimento; b) pesagem da escória moída; c) pesagem do ativador (informações adicionais acerca deste material vão ser fornecidas na próxima secção); e d) homogeneização manual (com uma colher) dos materiais no tabuleiro em que foram realizadas as pesagens. A massa de cimento homogeneizada durante cada ciclo foi igual a 1300 g (Figura 3.16).



Figura 3.16 – Pesagem de cimento e da escória para processo de homogeneização

3.2.2. PASTAS

3.2.2.1. Composições e fabrico

Os cimentos alcalinos híbridos estudados neste trabalho respeitaram a estrutura exibida na Figura 3.17. As composições das pastas (percentagens em massa), que foram hidratadas com água, podem ser consultadas na Tabela 3.6 (a relação água/cimento (A/C) das composições também é apresentada).

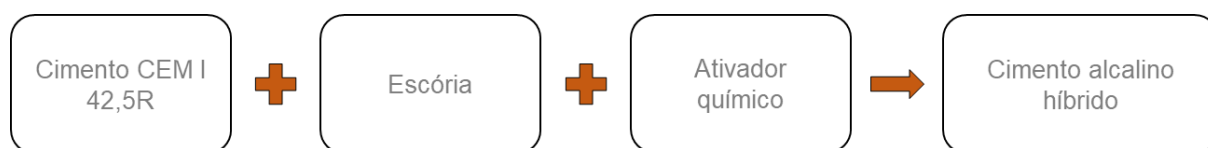


Figura 3.17– Estrutura da composição do cimento híbrido estudado

Tabela 3.6 – Composição das pastas

Referência	Cimento (%)	Escória (%)	Ativador (%)	A/C
REF/CIM	100	—	—	0,30
P_20C/75S	20	75	5	0,30
P_30C/65S	30	65	5	0,30
P_40C/55S	40	55	5	0,30

Para o presente trabalho foram preparados 3 cimentos híbridos, com percentagens de substituição de cimento por escória iguais a 75%, 65% e 55%. A percentagem do ativador foi igual em todas as composições (5%).

O ativador utilizado nesta experiência foi o sulfato de sódio (Na_2SO_4) (Figura 3.18). Em teoria, este ativador reage com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) que é gerado durante a hidratação do cimento, promovendo alcalinidade, e, conseqüentemente, levando ao aumento do pH. Neste contexto, o ativador será mais eficaz tendo em vista a ativação do material cimentício suplementar que, neste caso, foi a escória.

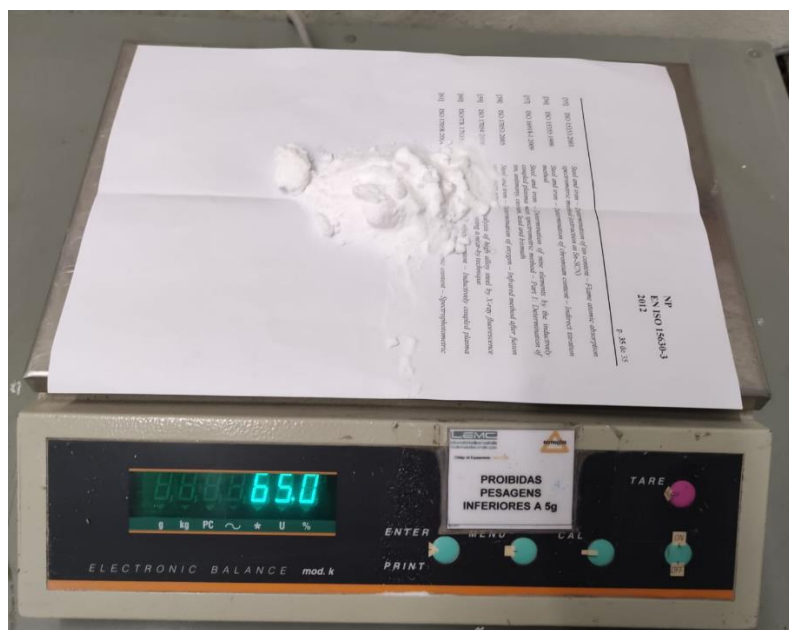


Figura 3.18 – Sulfato de sódio

Para se determinar a relação A/C das pastas realizaram-se ensaios prévios. Estes ensaios prévios consistiram em testar a trabalhabilidade das pastas através da hidratação com água de baixas massas dos cimentos (Figura 3.19). Decidiu-se adotar uma relação A/C igual a 0,30 para todas as pastas, uma vez que os ensaios prévios garantiram uma trabalhabilidade adequada para o processo de moldagem.



Figura 3.19 – Ensaios prévios para determinação da relação A/C das pastas

O fabrico das pastas foi realizado de acordo com o procedimento apresentado na norma NP EN 196-3 [34]. O fabrico iniciou-se com a adição de água ao balde da misturadora (equipamento de acordo com as instruções mencionadas na norma NP EN 196-1 [20]) (Figura.3.20), seguido da introdução do cimento

(uma massa igual a 840 g revelou-se ser suficiente para realizar a moldagem dos 3 provetes). O procedimento incluiu um período de homogeneização de 3 minutos (após um período inicial de 1 minuto e 30 segundos, realizou-se uma pausa de 30 segundos para empurrar a pasta aderente às paredes do balde para o seu fundo, a que se seguiu o restante período de homogeneização de 1 minuto e 30 segundos) (Figura.3.22).



Figura 3.20 – Pé e balde da misturadora



Figura 3.21 – Pesagem de água e de cimento para para o fabrico das pastas



Figura 3.22 – Fabrico das pastas na misturadora

As pastas foram introduzidas em moldes que possibilitaram a preparação de provetes cúbicos com uma aresta igual a 5 cm, moldes esses, previamente pincelados com óleo descofrante (Figura. 3.23). Os moldes, preparados para acomodar 3 provetes, foram colocados numa mesa vibratória durante 30 segundos para compactar as pastas, eliminando potenciais bolhas de ar existentes (Figura. 3.24).



Figura 3.23 – Aplicação de óleo descofrante nos moldes cúbicos utilizados para moldar as pastas



Figura 3.24 – Moldagem e compactação das pastas

Após moldagem, os moldes foram armazenados numa sala de cura durante 24 horas (Figura 3.25). A desmoldagem dos provetes foi realizada 24 horas após o fabrico, momento em que se procedeu à identificação dos provetes (Figura 3.26). De seguida, os provetes foram colocados numa câmara climática, com temperatura igual a 20 ± 2 °C e humidade relativa superior a 90%, até ao respetivo dia de ensaio (Figura 3.27). Foram moldadas pastas para ensaios de resistência à compressão para 3 idades de cura: 2, 7 e 28 dias.



Figura 3.25 – Armazenamento dos moldes cúbicos utilizados na moldagem das pastas

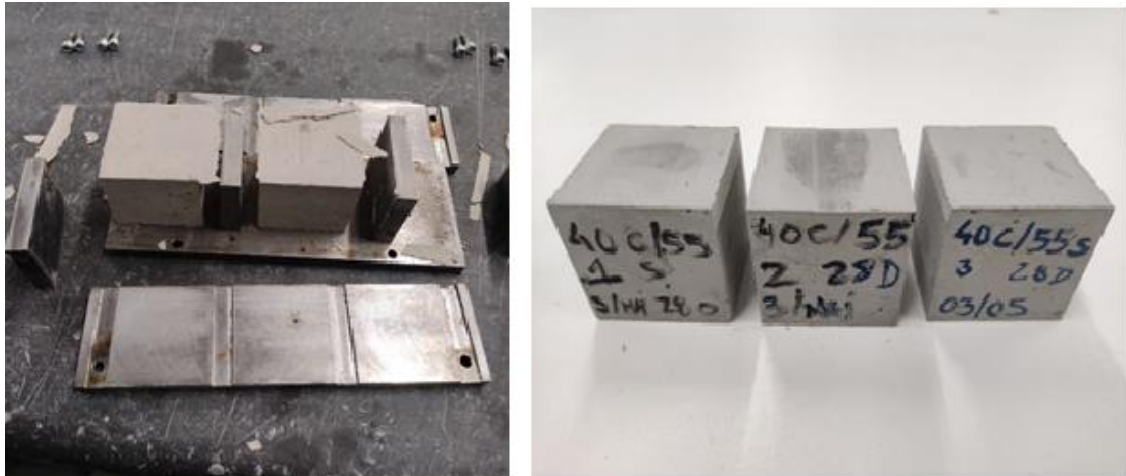


Figura 3.26 – Desmoldagem dos provetes cúbicos



Figura 3.27 – Cura dos provetes cúbicos na câmara climática

3.2.2.2. Tempos de presa

Foram realizados ensaios para avaliar os tempos de presa do cimento de acordo com os procedimentos da norma NP EN 196-3 [34]. O início de presa traduz-se como sendo o tempo que decorre desde a fabricação da amassadura até se dar a sua perda de plasticidade, enquanto que o fim de presa corresponde ao período em que a pasta necessita para possuir uma consistência que consiga suportar uma determinada pressão [35]. Para facilitar a comparação entre os diferentes cimentos estudados, adotou-se a mesma relação A/C igual a 0,30 para todas as pastas. Conforme estabelecido pela norma, utilizou-se o aparelho de Vicat para avaliar os tempos de início e fim de presa (Figura 3.28).



Figura 3.28 – Aparelho de *Vicat* para determinação de início e fim de tempo de presa

O procedimento do ensaio começou com a preparação da pasta. No início, registou-se o ‘instante zero’, momento da mistura da água com o cimento (Figura 3.29). Seguidamente, adicionou-se a pasta ao molde tronco-cónico do aparelho do *Vicat*, que se assentou numa base de vidro.

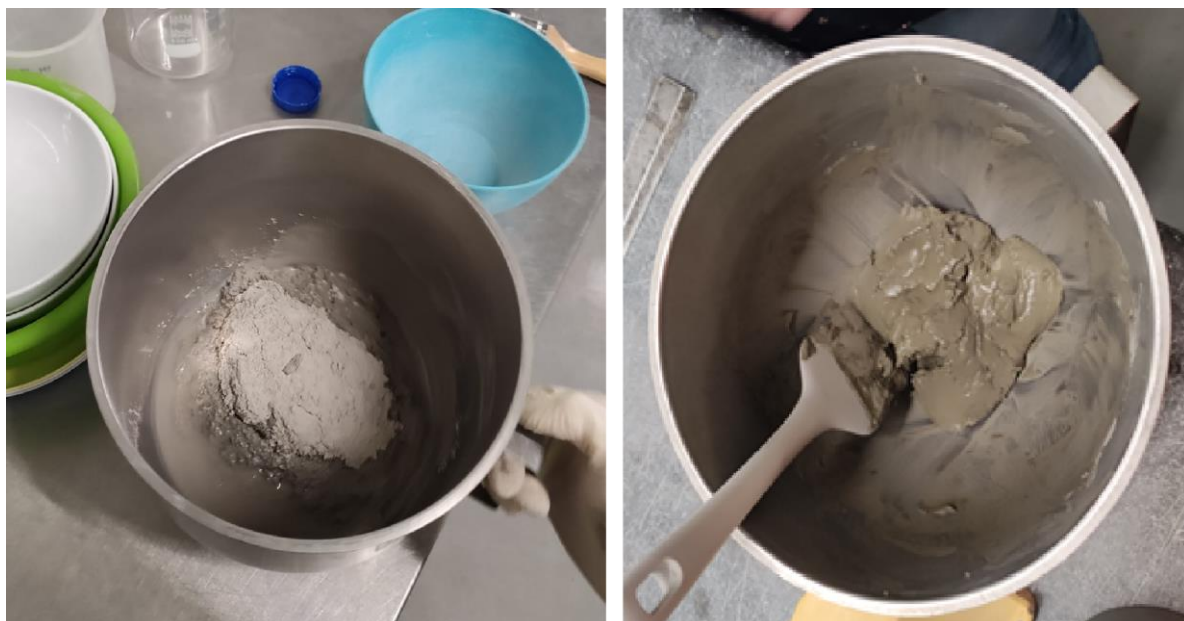


Figura 3.29 – Momento de hidratação do cimento (‘instante zero’)



Figura 3.30 – Colocação de pasta no molde

O passo seguinte foi a avaliação da consistência normal através da penetração da sonda na pasta moldada 4 minutos após o ‘instante zero’ (Figura 3.31). Neste trabalho, não se repetiram os ensaios até que fosse observada uma distância entre a sonda e a base igual a (6 ± 2) mm, uma vez que o objetivo foi avaliar os tempos de presa dos cimentos com a mesma relação A/C.



Figura 3.31 – Leitura da profundidade de penetração da sonda durante o ensaio dos tempos de presa

Após a avaliação da consistência normal, deu-se início à avaliação do tempo de início de presa, que corresponde ao momento após o 'instante zero' em que se confirma uma profundidade de penetração da agulha igual a (6 ± 3) mm (Figura 3.33).

O tempo do fim de presa é alcançado quando a profundidade de penetração alcança 0,5 mm (Figura 3.33). O equipamento foi realizando leituras automaticamente de acordo com períodos de tempo definidos previamente. O ensaio decorreu numa sala de cura com condições controladas de temperatura ((20 ± 2) °C) e humidade relativa (superior a 50%).



Figura 3.32 – Ensaio de tempo de presa



Figura 3.33 – Provete após o final do ensaio de determinação dos tempos de presa

3.2.2.3. Ensaio de resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram conduzidos em provetes cúbicos com 5 cm de aresta utilizando uma prensa hidráulica equipada com uma célula de carga de 500 kN, equipamento este que é utilizado para realizar os ensaios definidos na norma NP EN 196-1 [20] (Figura 3.34). Antes dos ensaios, que foram realizados para três idades de cura (2, 7 e 28 dias), procedeu-se à medição dos provetes e ao registo das condições de temperatura e humidade relativa. Os resultados apresentados no trabalho representam a média aritmética de 3 ensaios.



Figura 3.34 – Ensaios de resistência à compressão das pastas

3.2.2.4. Calorimetria

Procedeu-se à avaliação da taxa de libertação de calor e calor total acumulado dos cimentos através da realização de ensaios de calorimetria por condução isotérmica, que foram conduzidos num calorímetro JAF, fabricado pela *Wexham Developments*. As amostras foram preparadas de acordo com o processo de homogeneização mencionado na secção 3.2.2.1, mantendo a mesma relação A/C inicialmente adotada (0,30). No final do processo de homogeneização, as amostras foram introduzidas em sacos de plástico que foram devidamente selados numa máquina térmica e colocados para o calorímetro.

3.2.3. ARGAMASSAS

O programa experimental das argamassas foi dividido em duas fases. Na fase I foram fabricadas e caracterizadas argamassas incluindo como ligantes os cimentos híbridos estudados, enquanto que a fase II debruçou-se sobre o estudo de argamassas reforçadas com fibras (nesta fase, decidiu-se seleccionar um dos cimentos híbridos com base nos resultados obtidos na fase anterior para ser utilizado como o ligante principal das argamassas).

3.2.3.1. Composições e fabrico

As argamassas de ambas as fases I e II foram preparadas de acordo com o traço de massa de 1:3:0,5 (cimento:areia:água). As composições das argamassas desenvolvidas neste trabalho podem ser consultadas na Tabela 3.7. Realça-se que foi utilizada uma areia de acordo com a norma EN 196-1 [20] e que os teores de fibras (em percentagem) apresentados na Tabela 3.7 foram definidos em função da massa de ligante.

Tabela 3.7 – Composições das argamassas

Referência	Cimento	Fibras (%)
A_REF/CIM	REF/CIM	—
A_20C/75S	P_20C/75S	—
A_30C/65S	P_30C/65S	—
A_40C/55S	P_40C/55S	—
A_20C/75S_1F	P_20C/75S	1
A_20C/75S_2F	P_20C/75S	2
A_20C/75S_3F	P_20C/75S	3

As argamassas foram fabricadas de acordo com a norma NP EN 196-1 [20] no que diz respeito aos equipamentos utilizados em laboratório, velocidades da misturadora e tempos da mistura. No que diz respeito ao fabrico de argamassas para os ensaios de resistência à flexão e compressão e absorção de água por capilaridade, em que foram utilizados moldes com capacidade para moldar 3 provetes prismáticos com uma secção de 40 mm × 40 mm e comprimento igual a 160 mm foi realizado o seguinte procedimento:

- Pesagem dos materiais utilizados no fabrico de argamassas (Figura 3.35);
- Colocação de óleo desmoldante nos moldes (Figura 3.36);
- Introdução da água e do cimento no balde da misturadora;
- Colocação da misturadora no modo de velocidade lenta durante 30 segundos;
- Após os 30 segundos de homogeneização inicial, introdução da areia de forma regular durante os 30 segundos seguintes;
- Colocação da misturadora no modo de velocidade rápida durante 30 segundos (Figura 3.37);
- Interrupção do funcionamento da misturadora durante 90 segundos. Durante os primeiros 30 segundos deste período empurrou-se para o fundo do balde, através de uma espátula, a argamassa aderente às suas paredes. No final desta tarefa, seguiu-se um período de repouso de 60 segundos (nos casos em que as argamassas foram reforçadas com fibras, foi nesta etapa do fabrico que se adicionaram esses elementos);
- Colocação da misturadora em modo de velocidade rápida durante 60 segundos;
- Introdução no molde da primeira camada de argamassa e compactação (60 pancadas à frequência de uma pancada por segundo)
- Introdução no molde da segunda camada de argamassa e compactação (o mesmo procedimento mencionado anteriormente)
- Remoção da argamassa em excesso nos moldes.
- Iniciação do período de cura.

A desmoldagem dos provetes realizou-se 24 horas após o fabrico. Nesse momento, os provetes foram devidamente identificados e colocados numa câmara climática durante os períodos de cura definidos para cada um dos ensaios realizados. As Figuras. 3.38 a 3.39 exibem imagens recolhidas durante o fabrico de provetes prismáticos de argamassas.



Figura 3.35 – Materiais utilizados no fabrico das argamassas (cimento, água, areia e fibras metálicas)



Figura 3.36 – Aplicação de óleo desmoldante nos moldes e mesa de compactação



Figura 3.37 – Balde com água e cimento, introdução de areia normalizada e visão geral da misturadora

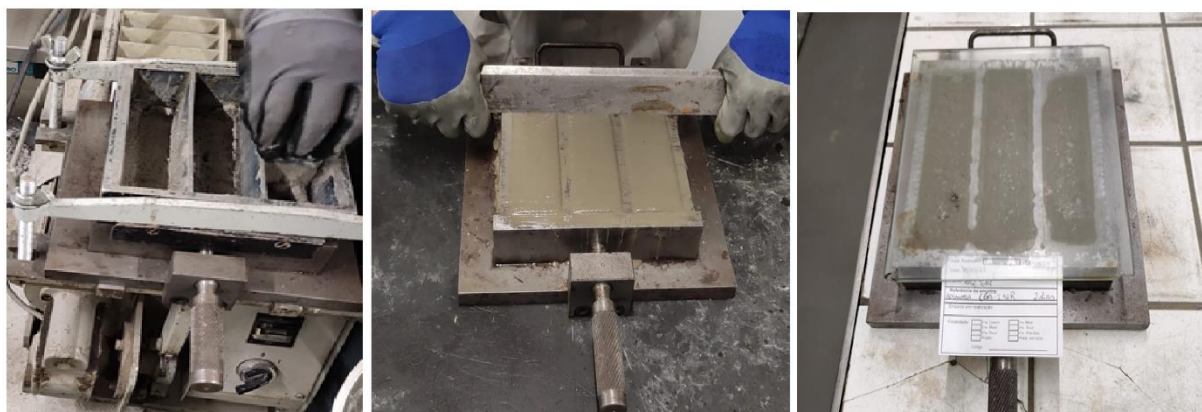


Figura 3.38 – Compactação da argamassa, remoção de material em excesso e provetes moldados

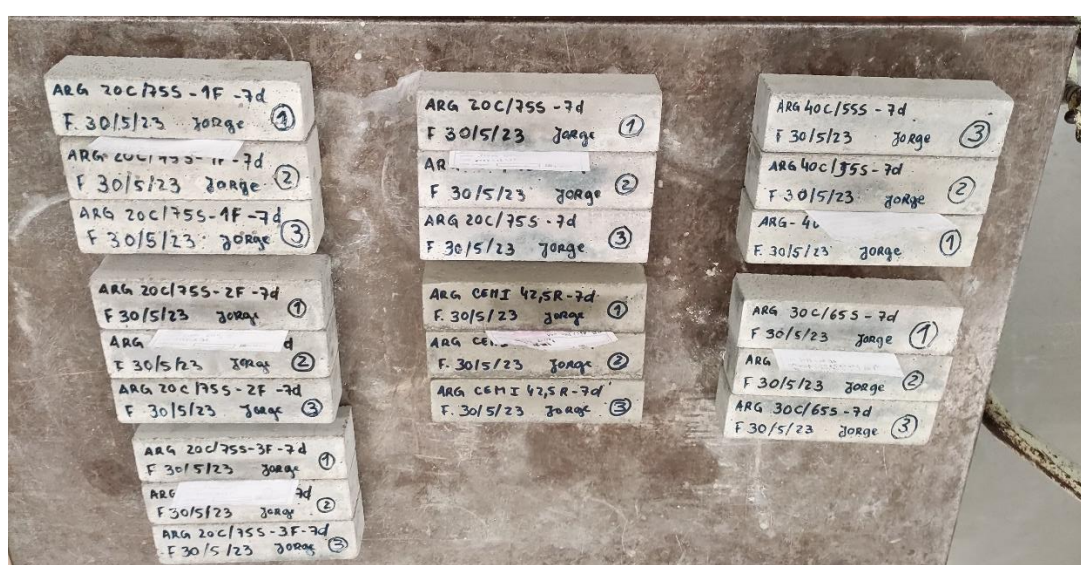


Figura 3.39 – Provetes prismáticos após desmoldagem

Para os ensaios de tração por compressão diametral de argamassas reforçadas com fibras foram moldados provetes cilíndricos com diâmetro e altura iguais a, respectivamente, 150 mm e 300 mm. O procedimento de fabrico foi adaptado de forma a moldar um provete por cada amassadura.

O processo de homogeneização dos materiais (água, cimento, areia e fibras) foi assegurado através da utilização de uma misturadora elétrica com dupla hélice (Figura. 3.40). A sequência da introdução dos materiais no balde e os períodos de homogeneização foram os mesmos adotados durante o fabrico dos

provetes prismáticos (Figuras. 3.42 e 3.43). A compactação dos moldes foi realizada numa mesa vibratória durante um período de 30 segundos (Figura.3.43).

A desmoldagem dos provetes foi realizada 24 horas após o fabrico (Figura.3.44). Os provetes foram submetidos a um processo de cura de 28 dias na câmara climática.



Figura 3.40 – Recursos utilizados no fabrico de provetes cilíndricos de argamassas reforçadas com fibras



Figura 3.41 – Pesagens de cimento, areia e fibras para o fabrico de um provete cilíndrico



Figura 3.42 – Homogeneização da argamassa reforçada com fibras



Figura 3.43 – Compactação do molde com o provete cilíndrico

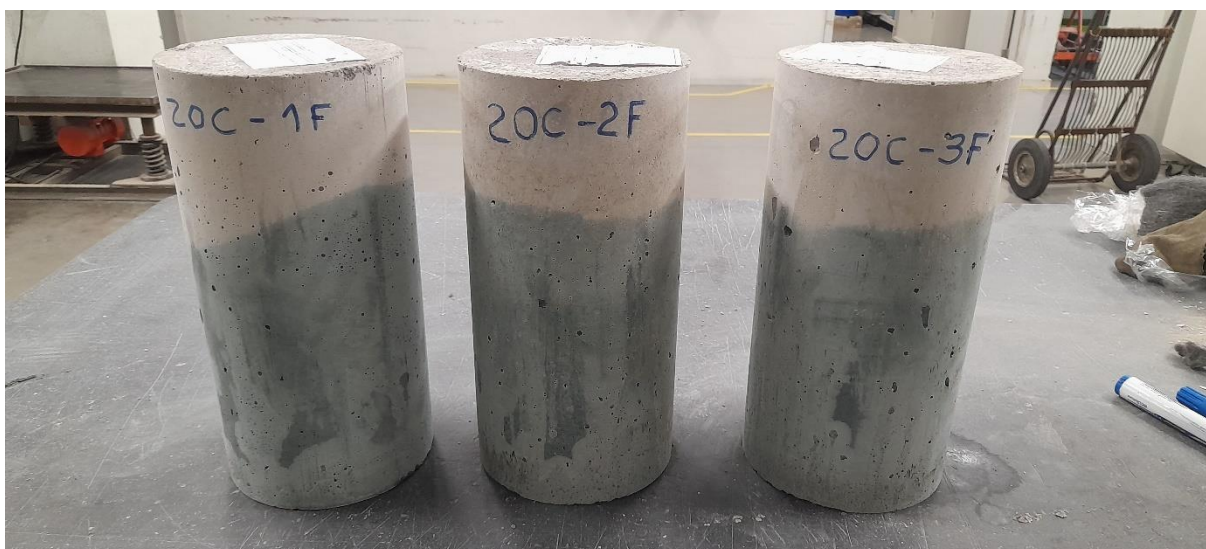


Figura 3.44 – Provete cilíndricos após desmoldagem

3.2.3.2. Ensaio de consistência por espalhamento

Os ensaios de consistência por espalhamento das argamassas foram realizados de acordo com a norma EN 1015-3 [36] (Figura 3.45). O procedimento do ensaio envolve a colocação em duas camadas de uma amostra de argamassa num molde tronco-cônico. Cada uma dessas camadas é compactada através da aplicação de 10 pancadas com um pilão.

No final do processo de compactação, o excesso de material do molde é removido e a mesa de espalhamento limpa. Após esta etapa, o molde é calmamente levantado e agita-se a mesa de espalhamento 15 vezes a uma frequência constante de uma por segundo (para o efeito, utiliza-se um volante que está integrado na mesa de espalhamento). O ensaio termina com a medição do diâmetro de espalhamento em duas direções.

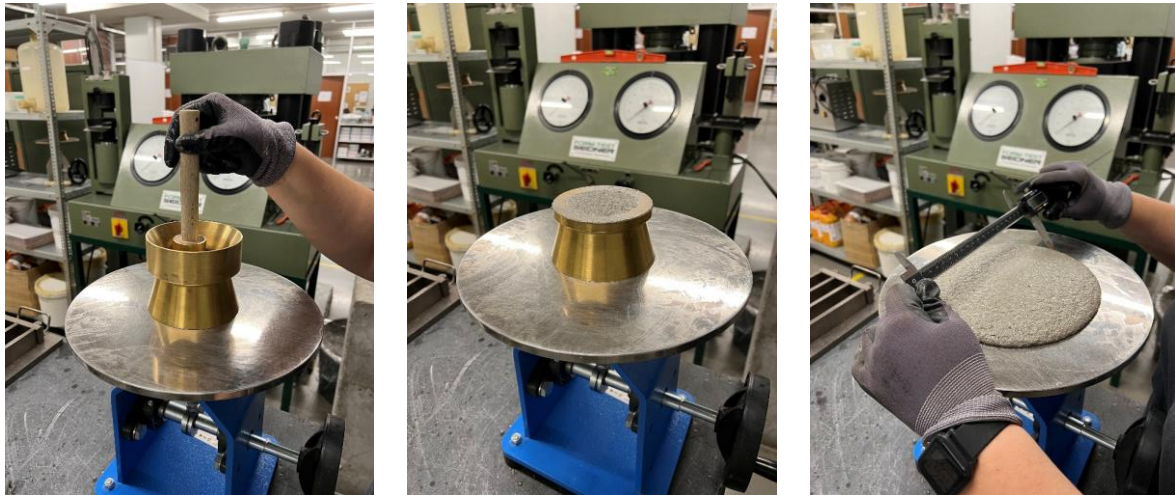


Figura 3.45 – Ensaio de consistência por espalhamento de argamassas

3.2.3.3. Ensaio de resistência à flexão e compressão

Os ensaios de resistência à flexão e compressão das argamassas foram conduzidos nos provetes prismáticos de acordo com as instruções da norma EN 14 488-3 [37] (Figura 3.46). A prensa hidráulica utilizada estava equipada com células de carga de 20 kN e 500 kN, respetivamente, para os ensaios de resistência à flexão e de compressão. Os ensaios realizaram-se para três idades de cura, a saber, 2, 7 e 28 dias. As condições de temperatura e humidade relativa foram avaliadas e registadas em todos os ensaios. Os resultados que vão ser apresentados para cada uma das amassaduras representam a média aritmética de 3 e 6 ensaios, respetivamente, para as resistências à flexão e compressão.



Figura 3.46 – Ensaio de resistência a flexão e a compressão de argamassas

3.2.3.4. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral foram realizados aos 28 dias de cura adaptando as instruções da norma ASTM C496M [38]. Antes dos ensaios, procedeu-se ao corte dos provetes cilíndricos de modo a obter discos com diâmetro e espessura iguais a, respetivamente, 150 mm e 60 mm. Além do corte dos provetes, foi também necessário realizar entalhes nas faces dos discos, de forma a definir um plano teórico de fratura (Figura. 3.47).



Figura 3.47 – Discos para os ensaios de tração por compressão diametral das argamassas reforçadas com fibras

Para avaliar a abertura de fenda foram instalados cinco transformadores diferenciais de variação linear (LVDT), três numa das faces dos discos e os restantes dois na face oposta. Os provetes foram colocados entre dois roletes, mantendo o alinhamento do entalhe com o eixo de atuação da célula de carga (com uma capacidade de 100 kN) (Figura 3.48). Foram ensaiados três provetes por cada uma das três amassaduras de argamassas reforçadas com fibras. Além da determinação das resistências, foram também preparadas curvas médias tensão-abertura de fenda.

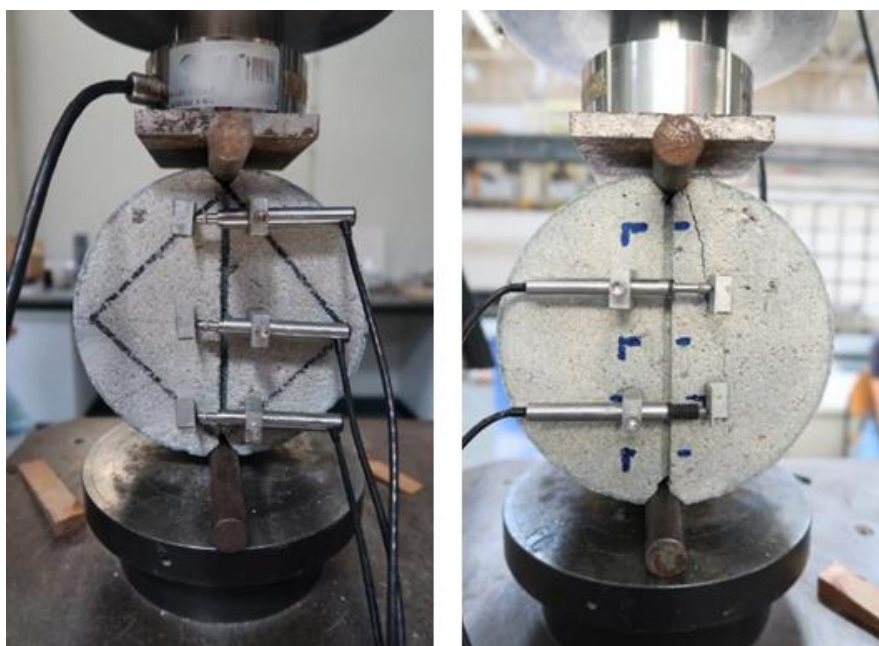


Figura 3.48 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

3.2.3.5. Ensaio de absorção de água por capilaridade

Os ensaios de absorção de água por capilaridade foram efetuados considerando a norma EN 1015-18 [39]. Por cada uma das composições estudadas foram preparados três provetes prismáticos com uma

secção de 40 mm × 40 mm e comprimento igual a 160 mm de acordo com o procedimento de fabrico mencionado na secção 3.2.3.1.

A norma EN 1015-18A [39] apresenta instruções específicas de cura: os primeiros dois dias de cura dos provetes devem decorrer dentro dos moldes a uma temperatura de $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e humidade relativa de $(95 \pm 5) \%$. Após desmoldagem, estas condições de cura prolongam-se por mais 5 dias. Os restantes 21 dias de cura devem decorrer num ambiente com a mesma temperatura de $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$, mas com uma humidade relativa de $(65 \pm 5) \%$.

No final do período de cura os provetes foram envolvidos em fita de alumínio e divididos em duas metades. De seguida, encaminharam-se os provetes para um ciclo de secagem a $60 ^\circ\text{C}$ até ser alcançada massa constante.

Terminada a fase de preparação dos provetes, seguiu-se o procedimento de ensaio, que se iniciou com a imersão em água dos provetes a uma profundidade entre 5 mm e 10 mm (Figura 3.49). Importa realçar que foram as faces de corte que ficaram apoiadas nas bases que foram colocadas dentro de água. Após imersão em água, foram realizadas pesagens dos provetes passados 10 minutos e 90 minutos. Foram ainda realizadas pesagens aos provetes 24 horas após imersão em água, em procedimento que deve ser seguido quando se estão a estudar argamassas de reparação. Cada uma das metades ensaiada foi dividida em duas partes após as pesagens para avaliar o perfil de penetração da água medindo a altura da água no centro dos provetes.

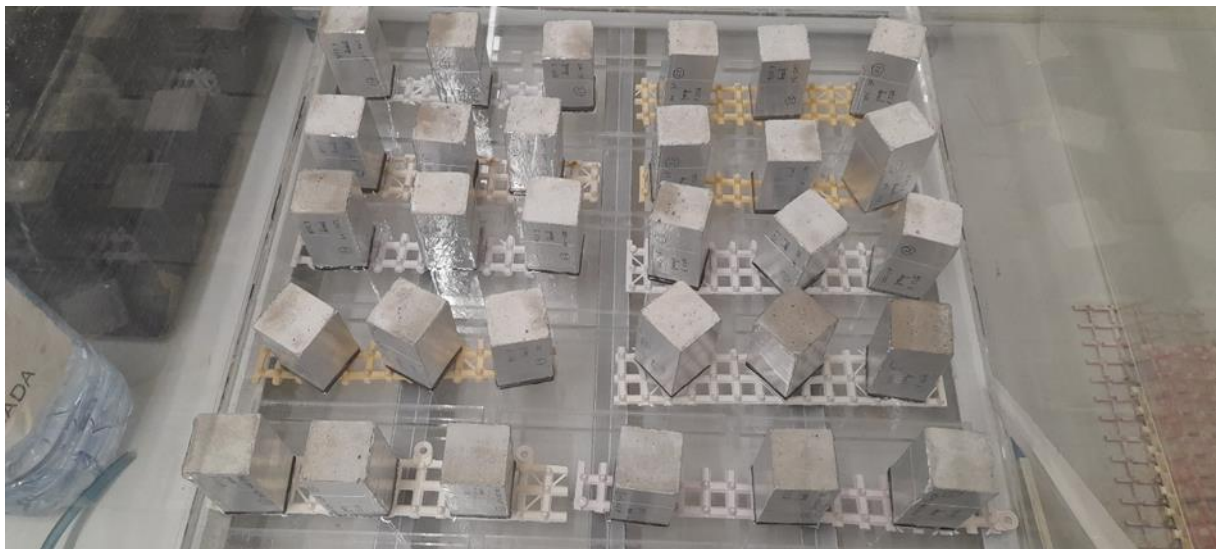


Figura 3.49 – Ensaio de absorção de água por capilaridade das argamassas

O coeficiente de absorção de água das argamassas que não de reparação obtém-se através de:

$$C = 0.1 (M2 - M1) \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5}) \quad (1)$$

em que C é o mencionado coeficiente de absorção de água, e M1 e M2 são, respetivamente, as massas dos provetes em gramas após períodos de imersão de 10 minutos e 90 minutos.

O coeficiente de absorção de água para argamassas de reparação é determinado de acordo com:

$$C_r = 0.625(M3-M0) \text{ kg/m}^2 \quad (2)$$

em que C_r é o coeficiente de absorção de água de argamassas de reparação, e $M0$ e $M3$ são, respetivamente, as massas dos provetes em gramas no final do ciclo de secagem e após um período de imersão de 24 horas.

3.2.3.6. Ensaio de expansão

Os ensaios de expansão foram conduzidos em provetes prismáticos com uma secção de 25 mm × 25 mm e comprimento igual a 250 mm considerando as condições de cura e os períodos de medição exibidos na norma EN 12617-4 [40]. Foram fabricados três provetes para cada uma das argamassas estudadas.

No que às condições de cura diz respeito, importa mencionar que, após a desmoldagem, que ocorreu 24 horas após o fabrico, os provetes foram imersos em água a uma temperatura igual a $(21 \pm 2) ^\circ\text{C}$ durante 27 dias. As medições dos provetes foram realizadas aos primeiro, terceiro, sétimo e décimo quarto dias após o período de cura através de um comparador digital de comprimento (Figura 3.50). Os resultados apresentados para cada uma das medições diárias correspondem à média aritmética de 4 leituras (uma por cada uma das superfícies dos provetes).



Figura 3.50 – Medição de um provete durante os ensaios de expansibilidade das argamassas

4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. PASTAS

Nesta secção serão apresentados os resultados dos ensaios realizados às pastas, a saber: resistência à compressão, calorimetrias e tempos de presa.

4.1.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão realizados às pastas formuladas neste trabalho podem ser consultados na Figura 4.1. Observou-se que a incorporação de escória nas pastas em substituição do cimento Portland conduz à redução das resistências. Estas perdas de resistências são menores quando se aumenta a percentagem de cimento Portland nas pastas.

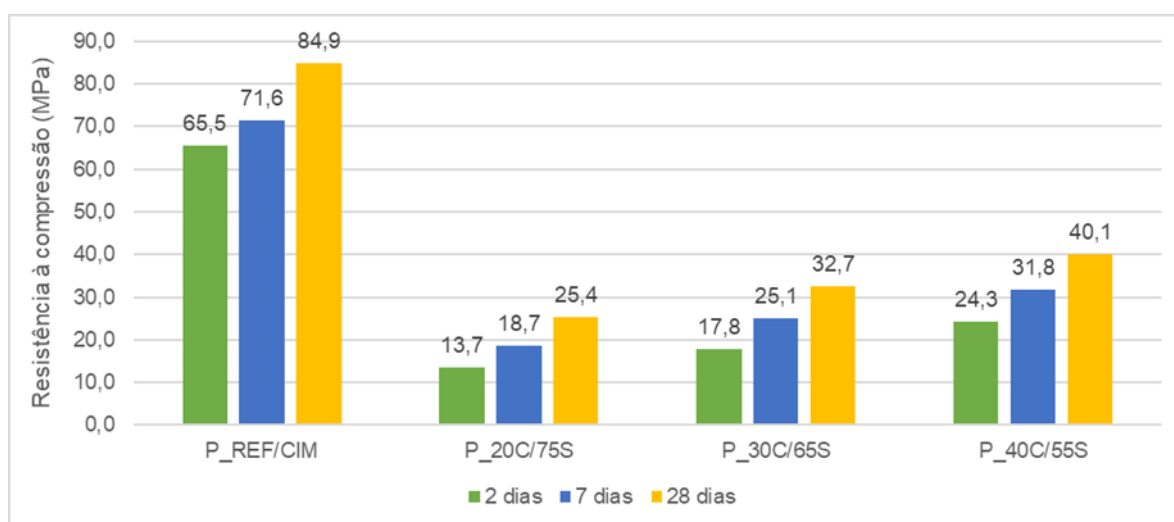


Figura 4.1 – Resultados de ensaios de resistência a compressão de pastas

Conforme expectável, a introdução da escória como material cimentício suplementar provocou diminuições muito significativas nas resistências para as idades de cura mais jovens (aos 2 dias observaram-se resistências iguais a 13,7 MPa, 17,8 MPa e 24,3 MPa, respetivamente, para as pastas

P_20C/75S, P_30C/65S e P_40C/55S). O tempo de cura contribuiu para um aumento das resistências, que alcançaram valores promissores após um período de cura de 28 dias (25,4 MPa, 32,7 MPa e 40,1 MPa, respectivamente, para as pastas P_20C/75S, P_30C/65S e P_40C/55S).

A evolução das resistências das pastas com escória ao longo do período de cura é muito diferente quando comparada com a do cimento Portland. Quando se analisa a evolução entre os 2 e os 7 dias de cura, observa-se que o aumento no cimento Portland é de 9,3%, enquanto que nas pastas com escória os aumentos variam entre 30,9% e os 40,8%. Entre os 7 e os 28 dias de cura as diferenças também são significativas: 18,6% no cimento Portland, e aumentos entre os 26,1% e 35,8% nas pastas com escória.

Os resultados deste trabalho demonstraram que as pastas com escória na sua composição tiveram resistências significativamente inferiores quando comparadas com o cimento Portland. Embora a pasta com menor percentagem de escória tenha alcançado um valor de resistência igual a 40,1 MPa aos 28 dias, a verdade é que este valor é muito inferior àquele que foi observado no cimento de referência (84,9 MPa). Existem alguns aspetos que poderão contribuir para que se observe o aumento dos valores das resistências destas pastas com escória.

Durante a realização do trabalho laboratorial percebeu-se que, aparentemente, existiria margem para diminuir as relações água/cimento das pastas com escória sem que se comprometesse a existência de processos eficazes de moldagem e compactação destas pastas. Com a presença de menos água nas pastas, seria expectável um aumento das resistências.

Poderá também equacionar-se utilizar outro reagente químico utilizado como ativador alcalino. Uma alternativa poderá ser a utilização de carbonato de sódio (Na_2CO_3), ou até estudar a adição de um ativador composto por uma mistura de Na_2SO_4 e Na_2CO_3 . Esta alteração poderá promover um aumento da reatividade da escória.

Um outro aspeto que poderá ter impacto na técnica que foi utilizada neste trabalho para desenvolver os ligantes é o baixo teor de alumínio presente na escória. A presença de um maior teor de alumínio na composição química da escória, um aspeto que pode ser otimizado durante o processo implementado na empresa que forneceu a amostra de escória que foi estudada, poderá contribuir para o desejado aumento das resistências.

A caracterização das pastas com escória através de microscopia eletrónica de varrimento e microanálise por raios-X será um contributo importante para se perceber se as suas microestruturas são compactas e quais os produtos de reação que foram gerados. É expectável que se observe a formação de uma mistura de geles cimentícios do tipo C-(A)-S-H/C-A-S-H.

É importante realçar que o valor de resistência à compressão igual a 25,4 MPa alcançado aos 28 dias na pasta com 75% de escória é um aspeto muito positivo, que pode abrir portas para a sua utilização em argamassas, cujos requisitos mecânicos não são muito elevados.

Os cimentos híbridos estudados neste trabalho com a incorporação de escória podem ser uma alternativa sustentável ao cimento Portland, principalmente se forem aplicados em situações em que não sejam exigidos valores de resistência altos. Estes cimentos oferecem benefícios ambientais uma vez que se utiliza como matéria-prima um resíduo que é gerado na indústria metalúrgica. No caso de esta solução vir a ser uma realidade, serão dados passos rumo à existência de cimentos mais sustentáveis.

4.1.2. TEMPOS DE PRESA

Os tempos de presa das pastas analisadas neste trabalho estão exibidas na Figura 4.2. É importante referir que os tempos de presa são condicionados pelas relações A/C. Nestes ensaios, decidiu-se adotar a mesma

relação A/C para todas as pastas (0,30), à imagem do que sucedeu anteriormente na avaliação das resistências mecânicas.

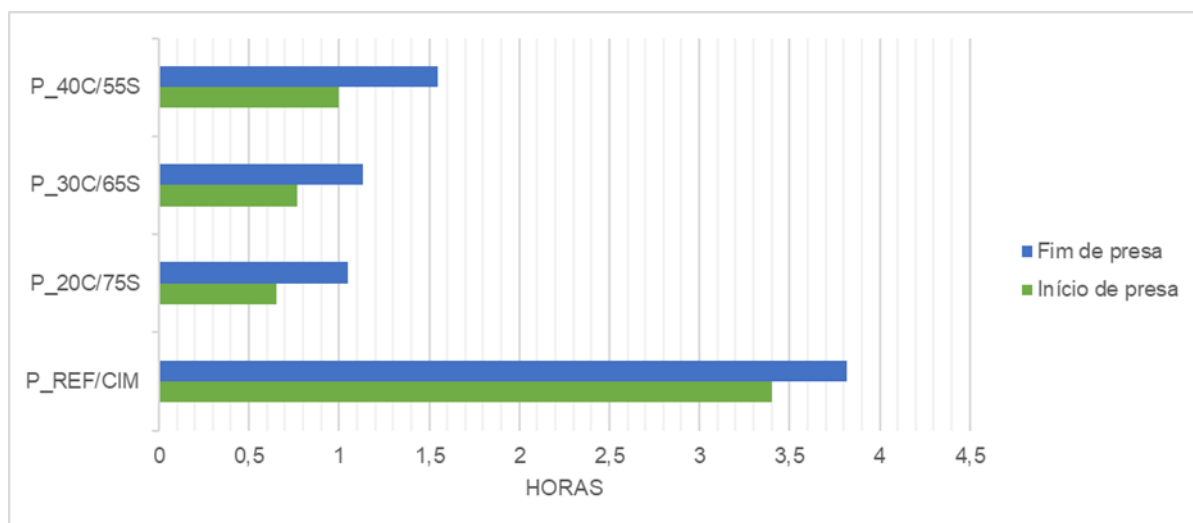


Figura 4.2 – Tempos de presa das pastas

Os resultados revelaram que ambos os tempos de presa inicial e final do cimento Portland foram significativamente superiores aos tempos de presa dos cimentos híbridos. Observou-se, também, que quanto maior foi a percentagem de substituição de escória por cimento Portland, mais baixos foram os tempos de presa (por exemplo, os tempos de presa inicial e final da pasta P_20C/75S foram iguais a, respetivamente 0,7 e 1,1 horas, enquanto que no cimento Portland foram encontrados tempos de presa inicial e final de 3,4 e 3,8 horas, respetivamente).

A justificação para estes resultados pode estar relacionada com a circunstância de o ativador acelerar as reações químicas iniciais entre os diversos elementos dos cimentos híbridos com escória, encurtando os tempos de presa.

O facto de se terem observado tempos de presa baixos para os cimentos híbridos com escória é um aspeto a destacar, uma vez que a incorporação de materiais cimentícios suplementares no cimento Portland conduz habitualmente a tempos de presa mais altos.

4.1.3. CALORIMETRIA

As taxas de libertação de calor e o calor total acumulado das pastas estudadas foram monitorizados através da realização de ensaios de calorimetria de condução isotérmica e estão exibidos, respetivamente, nas Figuras 4.3 e 4.4. É importante mencionar que foi adotada para todas as pastas a mesma relação A/C (0,30).

As curvas calorimétricas de todos os cimentos apresentam um comportamento similar: a existência de um primeiro pico que surge nos momentos iniciais seguido de um período de indução curto, e a ocorrência de um segundo pico, com uma amplitude muito mais significativa. Importa realçar que no cimento Portland o segundo pico associa-se normalmente à formação e precipitação de produtos de reação (gel C-S-H). Na fase de desaceleração do segundo pico surge um pequeno ombro que é atribuído ao consumo de sulfatos (*sulfate depletion*) [41].

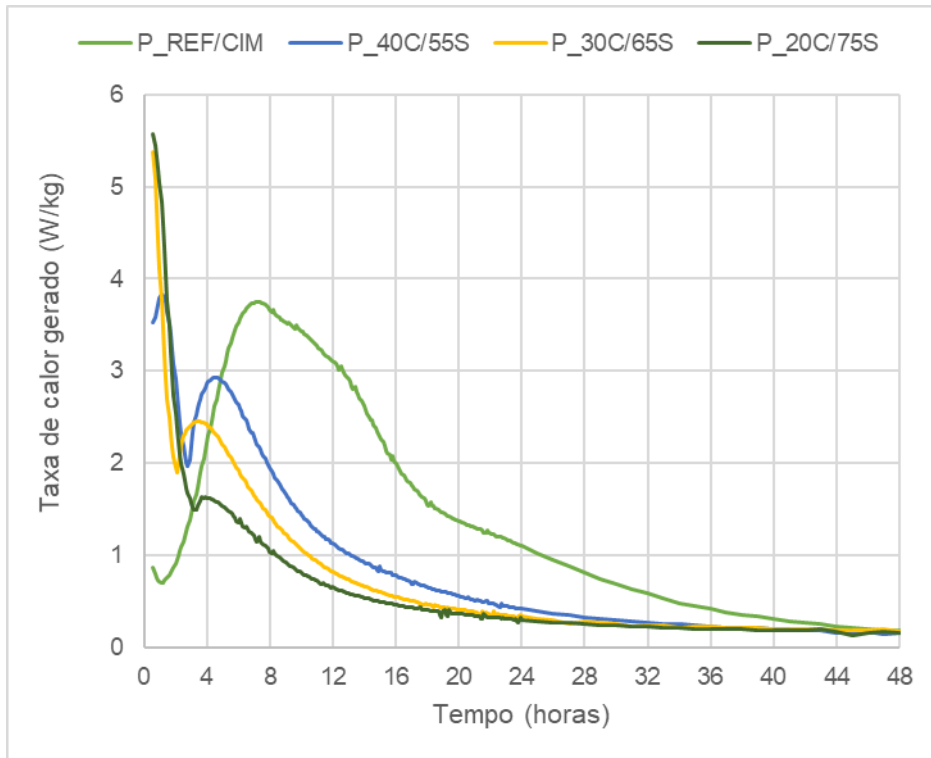


Figura 4.3 – Taxa de liberação de calor de pastas

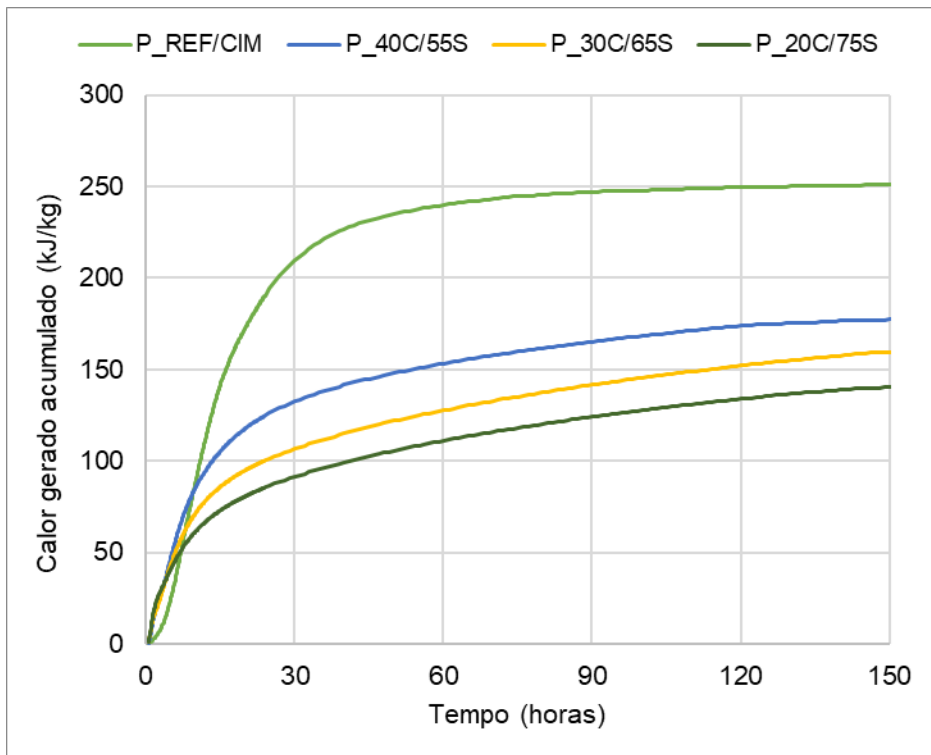


Figura 4.4 – Calor total acumulado das pastas

Observou-se uma alteração da cinética das reações nos cimentos híbridos. Nestes casos, existiu uma aceleração das reações químicas iniciais, o que terá conduzido ao endurecimento mais rápido das pastas observado nos tempos de presa. É admissível que a presença do ativador tenha tido um papel importante neste contexto. No entanto, observou-se que os picos calorimétricos nas pastas com escória foram mais baixos, libertando menos calor.

O calor total acumulado foi superior no cimento Portland, quando comparado com as restantes pastas. Entre os cimentos híbridos, observou-se que quanto maior a percentagem de substituição de cimento Portland por escória, menor o calor total acumulado. Estes resultados corroboram as resistências mecânicas obtidas para os diversos cimentos para as idades de cura mais jovens (2 e 7 dias). Conforme se observou, a resistência do cimento Portland foi significativamente superior às dos cimentos híbridos, cujas resistências foram tanto maiores, quanto mais pequena foi a percentagem de substituição do cimento Portland por escória.

4.2. ARGAMASSAS - FASE I

4.2.1. CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO

Os ensaios de consistência por espalhamento no estado fresco revelaram a existência de argamassas com trabalhabilidades próximas. Conforme se pode observar na Figura 4.5, os diâmetros de espalhamento foram próximos uns dos outros. No entanto, há um aspeto que importa destacar: parece existir uma tendência em termos de trabalhabilidade que é condicionada pela quantidade de cimento Portland no ligante. Observou-se que o diâmetro de espalhamento aumentou com o aumento da percentagem de cimento, o que significa que para iguais relações A/C, as argamassas com maior percentagem de escória no ligante (75% e 65%) tendem a ter uma menor trabalhabilidade quando comparadas com argamassas que incorporam exclusivamente cimento Portland como ligante.

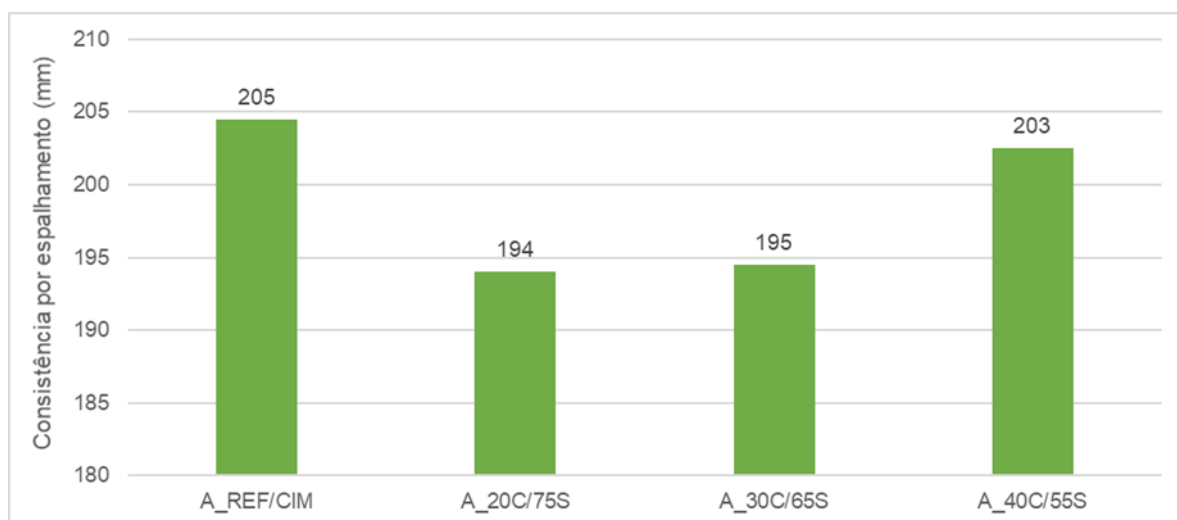


Figura 4.5 – Resultados dos ensaios de determinação de consistência por espalhamento no estado fresco realizados às argamassas (Fase I)

4.2.2. RESISTÊNCIAS À FLEXÃO E COMPRESSÃO

Os resultados dos ensaios de resistência à flexão e compressão conduzidos nas argamassas podem ser consultados, respetivamente, nas Figuras 4.6 e 4.7. A tendência que se observa nestes resultados é a mesma que se observou nas pastas: as resistências das argamassas aumentam com a diminuição da percentagem de substituição de cimento pela escória no ligante.

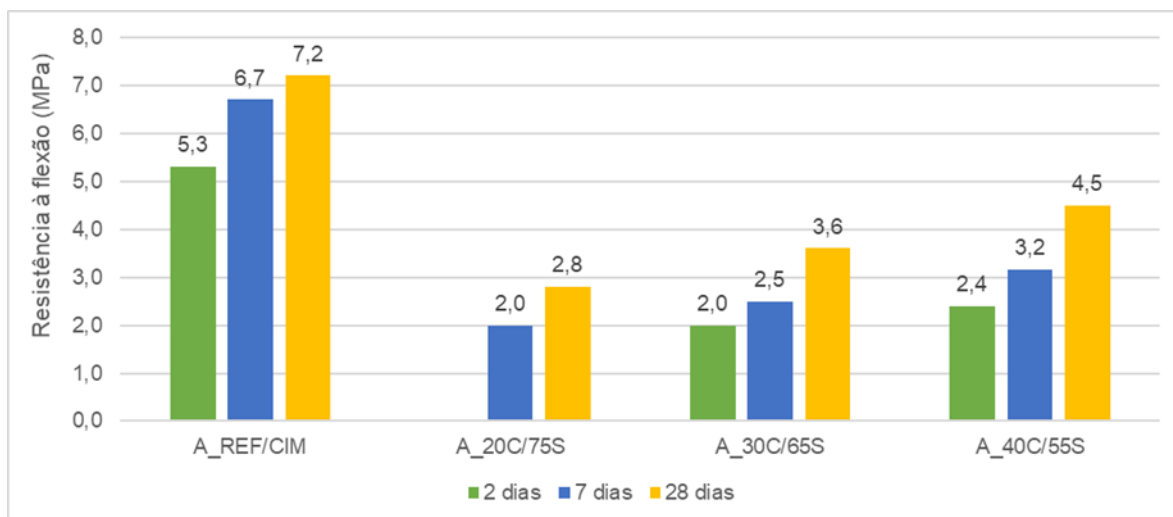


Figura 4.6 – Resultados dos ensaios de resistência a flexão de argamassas – Fase I

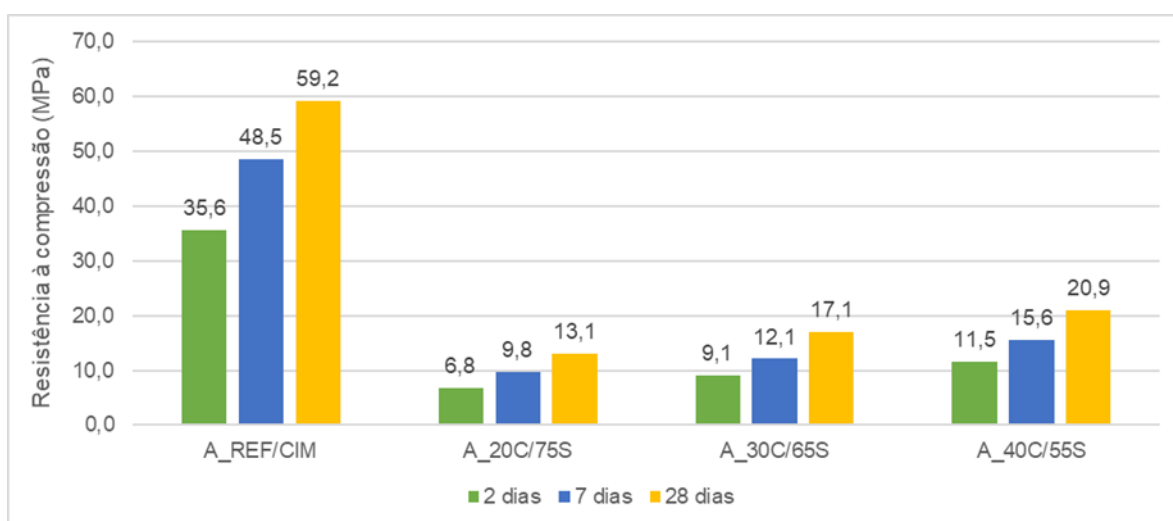


Figura 4.7 – Resultados de ensaios de resistência a compressão de argamassas – Fase I

Observou-se que a argamassa fabricada com o cimento híbrido com uma maior incorporação de escória exibiu aos 28 dias uma resistência razoável igual a 13,1 MPa. A utilização do cimento P_40C/55S no fabrico das argamassas representou um aumento de 59,5% na respetiva resistência à compressão (20,9 MPa), quando comparada com a argamassa A_20C/75S. No caso de se comparar a argamassa A_30C/65S, com menos 10% de escória na composição do cimento híbrido, o ganho de resistência aos 28 dias, quando a comparação é feita com a argamassa A_20C/75S, foi igual a 22,2% (resistência à compressão igual a 17,1 MPa).

Em termos de evolução das resistências ao longo do período de cura, observou-se que entre os 2 e os 7 dias, as argamassas com escória tiveram ganhos de resistência que variaram entre os 33,0% e os 44,1%, enquanto que entre os 7 e os 28 dias de cura, os ganhos situam-se no intervalo compreendido entre os 33,7% e 41,3%. No caso do cimento Portland, as variações de resistência que se observaram entre os 2 e os 7 dias e os 7 e 28 dias foram iguais a, respetivamente, 36,2% e 22,1%.

O desempenho mecânico das argamassas com os cimentos híbridos tem margem para ser melhorado. Talvez a solução mais adequada para otimizar as resistências seria diminuir as relações A/C. Conforme se observou anteriormente, os diâmetros de espalhamento que se obtiveram foram relativamente altos (tendo em conta a consistência de diversas aplicações de argamassas que se utilizam na engenharia civil) e pareceu ser possível diminuir o volume de água das argamassas sem comprometer a sua trabalhabilidade. Com um menor volume de água nas misturas, a expectativa é existir um aumento das resistências, embora pareça ser difícil no contexto das composições estudadas alcançar as resistências que se observaram nas argamassas que incorporaram o cimento Portland.

Observou-se, ainda, que nenhuma das argamassas com cimentos híbridos alcançou aos 28 dias de idade resistências à compressão iguais ou superiores a 32,5 MPa, impossibilitando, desta forma, o enquadramento dos cimentos híbridos estudados neste trabalho nas classes de resistência dos cimentos exibidas no Quadro 3 da secção 7.1.2 da norma NP EN 197-1 [6].

Por apresentar valores razoáveis de resistências, tendo em conta os requisitos mecânicos para as aplicações de argamassas, decidiu-se utilizar no estudo de argamassas reforçadas com fibras o cimento híbrido com uma percentagem de substituição de cimento Portland por escória igual a 75%, o que contribui para uma notável valorização deste resíduo.

4.3. ARGAMASSAS REFORÇADAS COM FIBRAS - FASE II

4.3.1. CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO

Os resultados dos ensaios de consistência por espalhamento revelaram que as argamassas com um maior teor de fibras tendem a apresentar diâmetros de espalhamento ligeiramente mais elevados (embora as diferenças sejam pouco relevantes). As fibras podem tornar a matriz menos compacta, devido à dificuldade em promover uma conveniente interface entre as fibras e os restantes elementos da matriz, e é expectável uma redução dos diâmetros de espalhamento, o que não se verificou. No presente caso de estudo, as variações na consistência por espalhamento foram marginais (a diferença mais alta que se verificou, nomeadamente entre as argamassas com incorporação de 1% e 3% de fibras, foi igual a 5 mm). Embora as diferenças sejam muito baixas, observou-se que a adição de fibras conduziu ao aumento da consistência por espalhamento destas argamassas, quando a comparação é realizada com a argamassa A_20C/75S, sem incorporação de fibras (Figura 4.8).



Figura 4.8 – Resultados de ensaios de consistência ao espalhamento no estado fresco de argamassas reforçadas com fibras (Fase II)

4.3.2. RESISTÊNCIA À FLEXÃO E COMPRESSÃO

As resistências à flexão e compressão das argamassas reforçadas com fibras analisadas nesta investigação estão exibidas nas Figuras 4.9 e 4.10. A tendência geral que se observou foi que a adição de fibras não alterou significativamente o desempenho mecânico das argamassas, quando comparadas com a argamassa A_20C/75S.

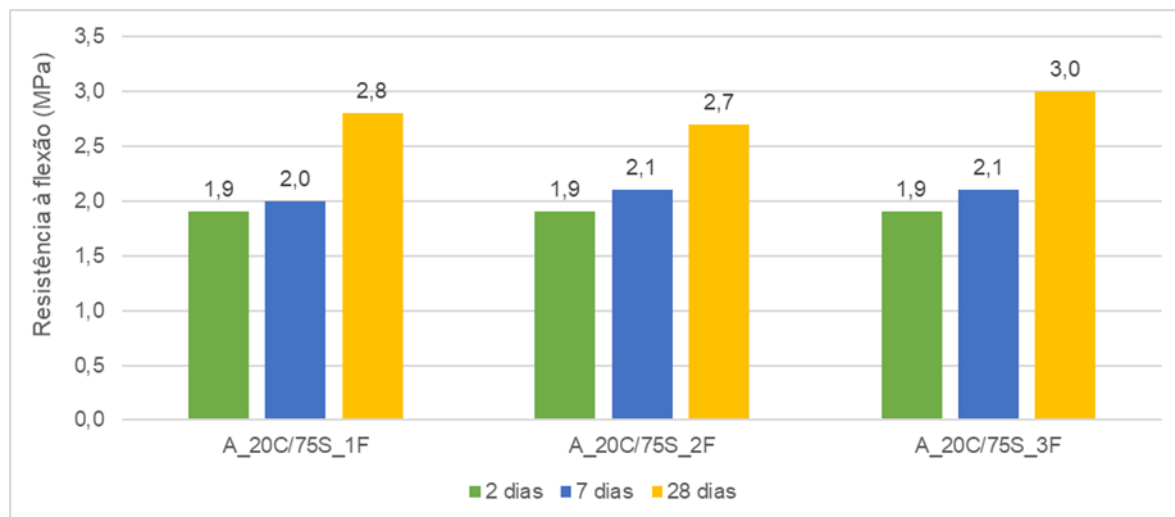


Figura 4.9 – Resultados de ensaios de resistência a compressão de argamassas reforçadas com fibras – Fase II

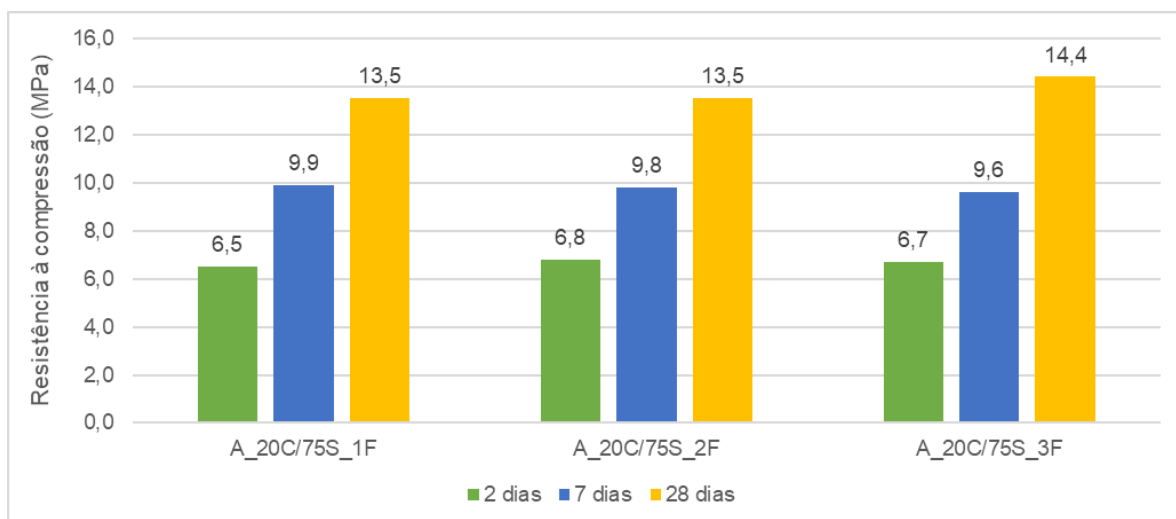


Figura 4.10 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão das argamassas reforçadas com fibras – Fase II.

Um primeiro aspeto a comentar é que as percentagens de adição de fibras em função do ligante utilizadas foram baixas, não sendo uma surpresa a tendência que se mencionou anteriormente. No entanto, importa dizer que a incorporação de fibras pode conduzir à existência de um maior volume de vazios na mistura, logo, a uma matriz menos compacta, originando diminuições, nomeadamente, na resistência à compressão das argamassas. Por outro lado, é também sabido que o fenómeno de fendilhação das argamassas pode ser controlado pela presença de fibras na matriz, o que conduz a melhorias na resistência à compressão. O que os resultados obtidos mostram é que não se observam alterações significativas na resistência à compressão de argamassas reforçadas com um teor de fibras até 3%, usando como ligante um cimento alcalino híbrido à base da escória caracterizada neste trabalho.

Em relação à resistência à flexão das argamassas, o que igualmente se observou foi a inexistência de alterações significativas nos respetivos valores de resistência. Este é um comportamento expectável considerando os baixos teores de fibras adotados. Os resultados poderiam ter sido diferentes no caso de terem sido utilizados teores de fibras mais substanciais. Um dos aspetos que não foi possível observar nestes ensaios é que se espera que a incorporação de fibras tenha melhorado o comportamento pós-pico destas argamassas. A presença de fibras na matriz conduz a uma capacidade superior de absorção de energia das argamassas.

Embora seja provável que os resultados obtidos durante os ensaios de flexão e compressão não seriam muito diferentes daqueles que se observaram, deve referir-se que existiu alguma dificuldade em garantir uma boa dispersão de fibras na matriz, nomeadamente quando a percentagem de incorporação foi de 3%. As fibras que foram utilizadas neste trabalho são agrupadas num formato de pente através de uma cola que se espera que se dissolva na água (Figura 3.14). No caso das argamassas com uma percentagem de incorporação de fibras de 3%, pareceu ser necessário prolongar o período de homogeneização da mistura para que as fibras se desagrupassem e se garantisse uma boa dispersão destes elementos.

Detalhes acerca do comportamento pós-fissuração, que é talvez o aspeto mais influenciado pela presença das fibras, vão ser fornecidos na próxima secção, em que foram realizados ensaios de tração por compressão diametral às composições de argamassas reforçadas com fibras.

4.3.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O primeiro parâmetro avaliado após os ensaios foi a resistência à tração por compressão diametral das argamassas reforçadas com fibras, que é dada por:

$$R_{ti} = \frac{2F}{\pi DT} \quad (3)$$

em que F é a força máxima e D e T são, respectivamente, o diâmetro e a espessura dos provetes. Neste caso, D e T corresponderam a 150 mm e 60 mm, respectivamente.

O que os resultados exibidos na Figura 4.11 demonstram é que as resistências alcançadas aos 28 dias para as diferentes argamassas foram similares (0,50 MPa, 0,57 MPa e 0,46 MPa, respectivamente, para as argamassas A_20C/75S_1F, A_20C/75S_2F e A_20C/75S_3F). Observou-se que o aumento do teor em fibras de 1% para 2% favoreceu o aumento de resistência. Por outro lado, a argamassa reforçada com um teor de fibras de 3% teve uma resistência inferior quando comparada com as resistências das outras duas composições com teores de fibra 1% e 2%. A justificativa para este resultado pode estar relacionada com a circunstância já mencionada anteriormente de ter sido difícil assegurar uma boa dispersão das fibras na argamassa com uma maior percentagem destes elementos. É possível que a compacidade da matriz tenha sido mais afetada no caso em que o teor de fibras foi de 3%. A dificuldade em garantir a dispersão das fibras durante o fabrico das argamassas terá levado à formação de zonas com significativa densidade de fibras, e outras zonas em que essa densidade foi muito pouco relevante, afetando, naturalmente, as resistências obtidas.

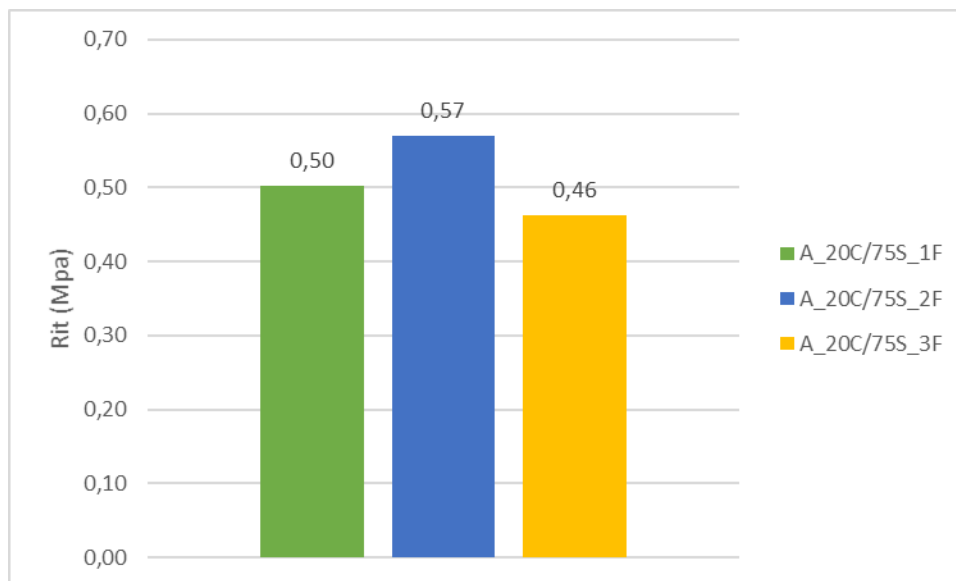


Figura 4.11 – Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral das argamassas reforçadas com fibras.

Na Figura 4.12 são exibidas as curvas médias tensão-abertura de fenda das três argamassas estudadas. Todas as curvas apresentam o mesmo comportamento: após ser alcançada a tensão de pico, momento em que surge a macrofenda, observa-se até ao final dos ensaios uma curva de amolecimento com uma cauda longa. As curvas demonstram que as argamassas reforçadas com fibras têm um aumento da sua ductilidade, não sofrendo uma rotura frágil. Um outro aspeto que as curvas médias demonstram é que

em todos os casos constata-se que a presença das fibras beneficia o aumento da capacidade de absorção de energia das argamassas.

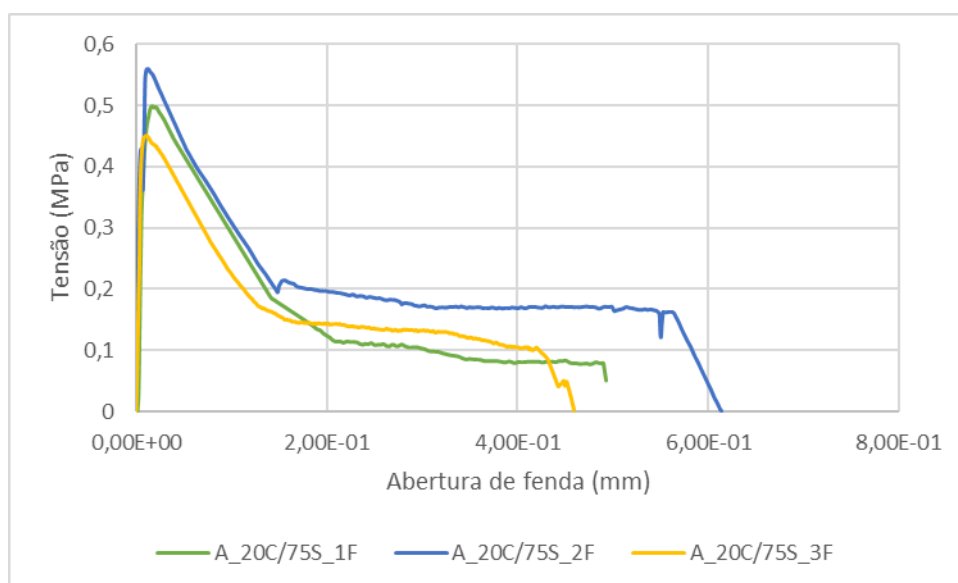


Figura 4.12 – Curvas médias tensão-abertura de fenda das argamassas reforçadas com fibras.

As Figuras 4.13 e 4.14 exibem, respectivamente, as variações das tensões residuais e da energia dissipada de acordo com os teores de fibras usados nas argamassas para aberturas de fenda de 0,2 mm, 0,3 mm e 0,4 mm. A resistência residual é a tensão retida pela argamassa fendilhada e obteve-se para cada um dos casos através da respectiva curva tensão-abertura de fenda. A energia absorvida das argamassas reforçadas com fibras, G , foi obtida através da determinação da área abaixo das anteriormente mencionadas curvas tensão-abertura de fenda.

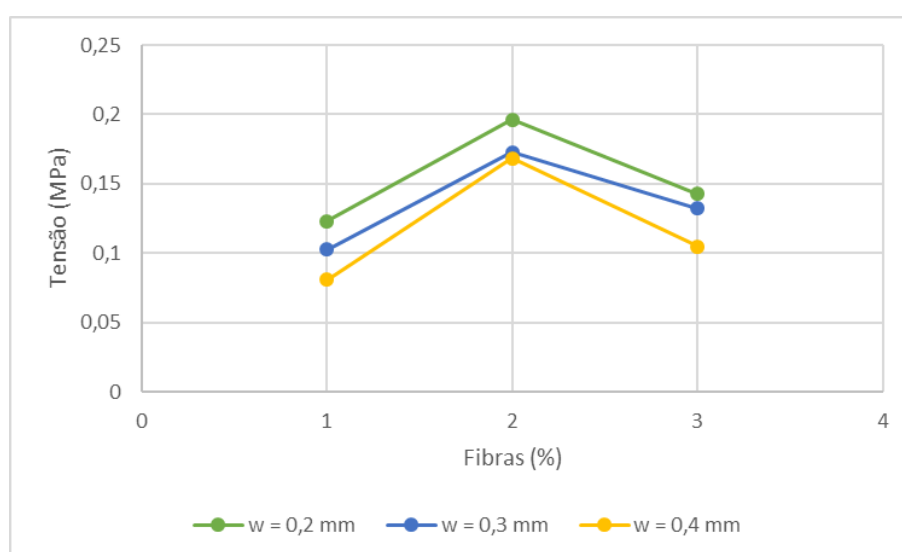


Figura 4.13 – Variação das resistências residuais das argamassas de acordo com o teor de fibras.

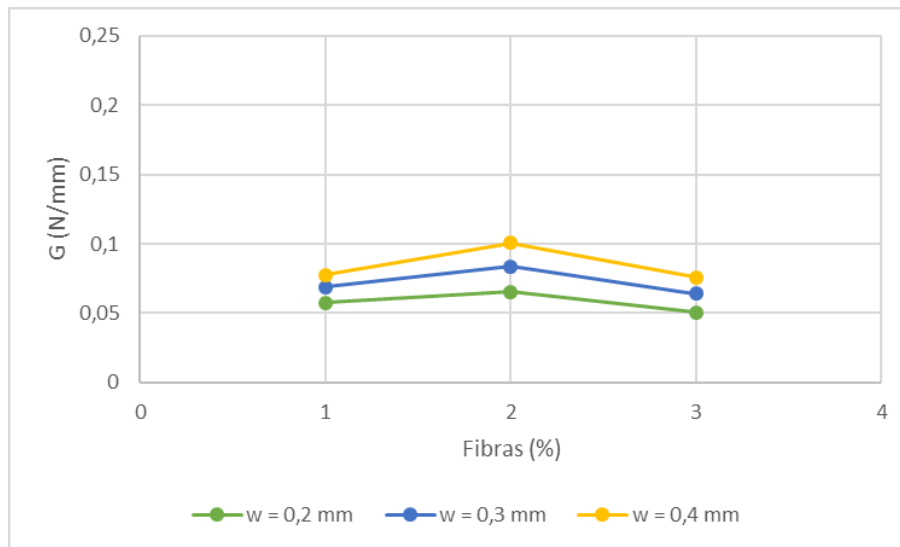


Figura 4.14 – Variação da energia dissipada das argamassas de acordo com o teor de fibras.

As maiores resistências residuais foram alcançadas pela argamassa reforçada com um teor de fibras de 2%. Pode afirmar-se que foi este o caso em que a matriz apresentou uma maior capacidade para reter resistências residuais mais elevadas. Deve destacar-se que esta capacidade se manteve para a mais alta abertura de fenda analisada neste trabalho. Os valores de energia absorvida também foram, naturalmente, mais altos para a argamassa mencionada anteriormente. A análise destes dados indica que a argamassa reforçada com um teor de fibras de 2% apresentou uma maior tenacidade, quando comparada com as outras duas argamassas.

Observou-se, então, que as resistências residuais e a energia dissipada aumentaram com o aumento do teor de fibras de 1% para 2%, independentemente da abertura de fenda. Contrariamente ao que seria expectável, o aumento do teor de fibras para 3% não favoreceu o aumento desses dois parâmetros, um aspeto que terá correspondência com a justificação já explorada anteriormente relacionada com a dispersão das fibras.

Na investigação conduzida neste trabalho observou-se que o teor de fibras de 2% foi aquele que melhor contribuiu para alterar o comportamento pós-fissuração da argamassa incluindo como ligante um cimento alcalino híbrido composto por uma percentagem de substituição de cimento por escória igual a 75%.

4.3.4. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Os resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade estão exibidos nas Tabelas 4.1 a 4.5. Realça-se que C_m e C_{rm} correspondem, respetivamente, aos valores médios dos coeficientes de absorção de água das argamassas que não de reparação e de reparação.

No que diz respeito ao método para avaliação da absorção de água para argamassas que não de reparação, observou-se que os valores dos respetivos coeficientes foram baixos para as argamassas estudadas ($0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$ para a argamassa A_REF/CIM e $0,4 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$ para as restantes

argamassas). Além disso, também se constatou que os coeficientes de absorção de água não foram influenciados pela adição de fibras, quando a comparação foi realizada com a argamassa A_20C/75S.

Tabela 4.1 – Coeficientes de absorção de água da argamassa A_REF/CIM

Parâmetro	Provetes					
	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2
C (kg/(m ² .min ^{0,5}))	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
C_m (kg/(m ² .min ^{0,5}))	0,2					
C_r (kg/m ²)	2,90	2,90	2,80	2,90	2,85	2,80
C_{rm} (kg/m ²)	2,9					

Tabela 4.2 – Coeficientes de absorção de água da argamassa A_20C/75S

Parâmetro	Provetes					
	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2
$C \text{ (kg/(m}^2\cdot\text{min}^{0,5})$	0,45	0,35	0,35	0,40	0,35	0,40
$C_m \text{ (kg/(m}^2\cdot\text{min}^{0,5})$	0,4					
$C_r \text{ (kg/m}^2)$	12,75	12,80	11,75	11,90	13,35	12,95
$C_{rm} \text{ (kg/m}^2)$	12,6					

Tabela 4.3 – Coeficientes de absorção de água da argamassa A_20C/75S_1F

Parâmetro	Provetes					
	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2
$C \text{ (kg/(m}^2\cdot\text{min}^{0,5})$	0,40	0,35	0,35	0,40	0,40	0,40
$C_m \text{ (kg/(m}^2\cdot\text{min}^{0,5})$	0,4					
$C_r \text{ (kg/m}^2)$	13,25	11,05	11,85	12,30	11,75	12,60
$C_{rm} \text{ (kg/m}^2)$	12,1					

Tabela 4.4 – Coeficientes de absorção de água da argamassa A_20C/75S_2F

Parâmetro	Provetes					
	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2
$C \text{ (kg/(m}^2\cdot\text{min}^{0,5})$	0,35	0,40	0,35	0,35	0,35	0,35
$C_m \text{ (kg/(m}^2\cdot\text{min}^{0,5})$	0,4					
$C_r \text{ (kg/m}^2)$	11,60	12,70	10,80	12,05	11,30	12,25
$C_{rm} \text{ (kg/m}^2)$	11,8					

Tabela 4.5 – Coeficientes de absorção de água da argamassa A_20C/75S_3F

Parâmetro	Provetes					
	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2
$C \text{ (kg/(m}^2\cdot\text{min}^{0,5})$	0,40	0,40	0,40	0,40	0,35	0,35
$C_m \text{ (kg/(m}^2\cdot\text{min}^{0,5})$	0,4					
$C_r \text{ (kg/m}^2)$	12,45	12,65	12,25	12,65	10,50	10,50
$C_{rm} \text{ (kg/m}^2)$	11,8					

Resultados diferentes foram observados para os coeficientes de absorção de água segundo o método para argamassas de reparação. Neste caso existiu uma diferença significativa entre o coeficiente da argamassa A_REF/CIM (cujo ligante utilizado foi exclusivamente o cimento Portland), e as restantes argamassas (os valores dos coeficientes das argamassas fabricadas com o cimento híbrido, sem e com o reforço de fibras, foram aproximadamente quatro vezes superiores ao valor do coeficiente da argamassa A_REF/CIM). Importa também realçar que após 24 horas os provetes das argamassas com o cimento híbrido apresentavam água até ao topo, ao contrário da argamassa A_REF/CIM, em que tal desempenho não foi observado.

A avaliação desta propriedade (absorção de água) permite retirar conclusões em relação à porosidade dos materiais. Materiais com uma porosidade mais alta terão uma capacidade maior de absorver água, um aspeto negativo no que diz respeito à durabilidade desses materiais. Considerando os resultados do método relativo às argamassas que não de reparação (talvez o método que tenha mais peso, uma vez que abrange um conjunto mais alargado de argamassas), pode afirmar-se que os resultados obtidos são promissores quando se compara o desempenho da argamassa fabricada com o cimento Portland e a argamassa em que foi utilizado o cimento híbrido, nomeadamente no que diz respeito à substituição do cimento Portland por um ligante mais sustentável. Neste caso, além de o valor do coeficiente da argamassa com o cimento híbrido ter sido baixo, também não divergiu muito do valor do coeficiente da argamassa que incluiu exclusivamente o cimento Portland como ligante. Uma vez mais, deve realçar-se que, para baixos teores de fibra (até 3%), não parecem existir alterações na capacidade de absorção de água de argamassas fabricadas com este tipo de cimento híbrido.

4.3.5. EXPANSÃO

A Figura 4.15 exhibe os resultados dos ensaios de expansibilidade realizados às argamassas até 14 dias após o período de cura. Com base nos resultados alcançados é razoável afirmar-se que não ocorreram fenómenos de retração em qualquer uma das argamassas analisadas. As variações observadas foram inferiores a 0,01%, um valor que deve ser considerado desprezável.

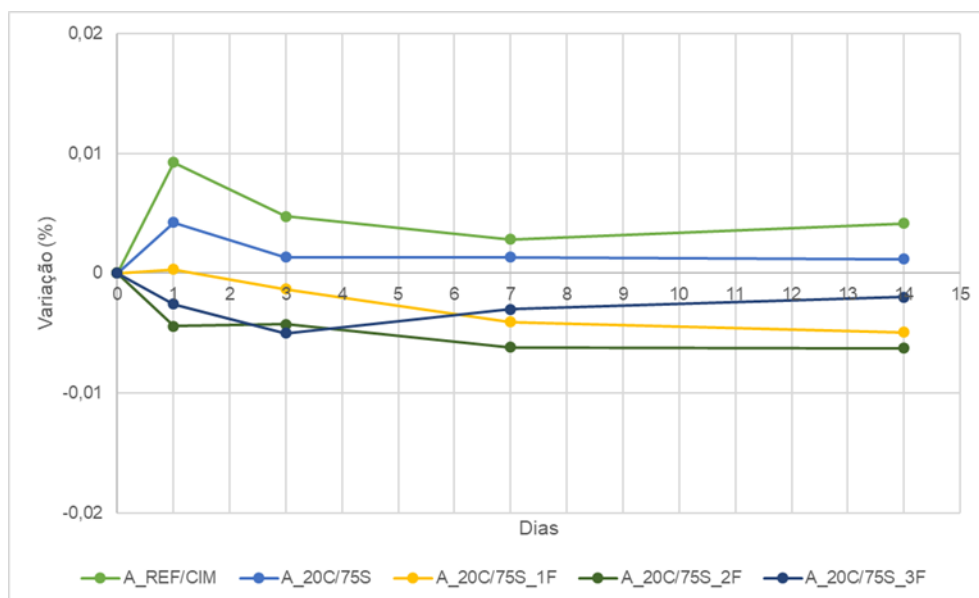


Figura 4.15 – Resultados dos ensaios de expansão das argamassas

Estas variações marginais são uma boa notícia para a matriz cimentícia com escória estudada nestes ensaios (recorda-se que foi o cimento híbrido com a maior percentagem de substituição de cimento Portland por escória (75%) o ligante utilizado no fabrico das argamassas nesta fase da investigação). A expansão é um fenómeno que tem influência na durabilidade das argamassas. No caso em particular das argamassas fabricadas com a escória estudadas neste trabalho, não existiram alterações merecedoras de alarme, pelo menos até ao período de monitorização que foi incluído neste trabalho.

Face às variações marginais observadas neste período de monitorização, não se considera ser razoável comentar o efeito da adição de fibras na expansão das argamassas, o que acaba por ser um aspeto positivo relativamente ao comportamento da argamassa A_20C/75S.

Apesar dos resultados positivos, é relevante mencionar que a monitorização da expansão destas argamassas vai prolongar-se até aos 56 dias, momento em que os dados poderão ser diferentes daqueles que foram observados e comentados anteriormente.

5

CONCLUSÕES

Esforços devem ser conduzidos com o objetivo de alcançar um setor da construção mais circular e mais verde. Um dos passos que concorrerá para esse objetivo é a utilização de cimentos mais sustentáveis. Uma solução neste contexto poderão ser os cimentos alcalinos híbridos, cujas propriedades mecânicas parecem ser aceitáveis para a sua incorporação como ligante no fabrico de argamassas.

O programa experimental que foi preparado teve como objetivos: 1) analisar o comportamento de cimentos alcalinos híbridos utilizando como material cimentício suplementar uma escória gerada no processo de afinação que ocorre na produção de aço numa aciaria elétrica na unidade da MEGASA da Maia; 2) avaliar o desempenho de argamassas fabricadas com esses cimentos alcalinos híbridos; e 3) analisar o efeito da incorporação de fibras metálicas com teores de 1%, 2% e 3% nas propriedades dessas argamassas.

No que às pastas diz respeito, observou-se que quanto maior foi a percentagem de substituição de cimento Portland por escória, maiores foram as perdas de resistência mecânica. Ainda assim, podem considerar-se razoáveis as resistências mecânicas alcançadas pelas pastas fabricadas com os cimentos híbridos estudados para uma idade de cura de 28 dias, perspetivando a sua utilização como ligante em argamassas.

No que diz respeito às argamassas estudadas, observou-se a mesma tendência das pastas: as resistências das argamassas diminuíram com a utilização de cimentos híbridos com uma maior percentagem de substituição de cimento Portland por escória. Considerando que os requisitos mecânicos de uma grande parte das aplicações de argamassas não é um dos aspetos principais, decidiu-se utilizar o cimento alcalino híbrido com uma maior percentagem de substituição de cimento Portland por escória (75%) no estudo das argamassas reforçadas com fibras.

Em relação às argamassas reforçadas com fibras há alguns aspetos importantes a destacar. O primeiro é que a utilização de fibras, independentemente do teor adotado, favoreceu o aumento da capacidade de absorção de energia das argamassas. O segundo aspeto a comentar é que foi um teor de fibras de 2% que melhor contribuiu para alterar o comportamento pós-fissuração. Em relação à absorção de água por capilaridade, uma propriedade associada a questões de durabilidade, observou-se que para baixos teores de fibra (no caso em estudo, até 3%), não pareceram existir alterações na capacidade de absorção de água das argamassas reforçadas com fibras nas quais foi utilizado como ligante o cimento híbrido com uma maior percentagem de substituição de cimento Portland por escória, um resultado que é positivo.

Um outro aspeto positivo a mencionar foram as variações desprezáveis observadas nas argamassas mencionadas anteriormente durante os ensaios de expansão. No entanto, considerando que o período de monitorização incluído neste trabalho foi de 14 dias, é importante ter alguma reserva em relação ao comportamento que as argamassas possam apresentar para idades de cura mais avançadas.

Os resultados obtidos parecem sugerir que é viável a utilização de cimentos alcalinos híbridos no fabrico de argamassas utilizando a escória estudada neste trabalho como material cimentício suplementar. Ainda assim, fica a ideia de que as resistências mecânicas das pastas e, consequentemente, das argamassas analisadas, podem ser mais altas. Para alcançar este objetivo perspetivam-se algumas soluções: 1) a otimização das relações água/cimento; 2) a utilização de um ativador alcalino diferente nos cimentos híbridos; e 3) a alteração da composição química da escória, que pode ser ajustada durante o processo em que ela é gerada. Trabalhos de investigação futuros poderão abordar este tema e também o estudo de composições de betão utilizando como ligante este tipo de cimentos alcalinos híbridos.

Não há dúvidas que a utilização de argamassas incluindo cimentos alcalinos híbridos será uma ajuda para se desenvolver uma construção mais sustentável e circular. Além de se consumirem menos recursos naturais (nomeadamente no fabrico do cimento Portland), também se estará a aumentar de forma significativa as taxas de valorização da escória que é gerada no contexto anteriormente mencionado da indústria de produção do aço. Pode afirmar-se que esta solução, no caso de vir a ser implementada, reduzirá os impactos ambientais provocados pelas atividades conduzidas no setor da construção, um aspeto com especial relevância num momento em que este tipo de esforços relacionados com a proteção do ambiente é considerado fundamental para que o futuro seja mais promissor.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

- [1] APA, *Economia Circular*. 2021 <<https://apambiente.pt/apa/economia-circular>>, 20/06/2023
- [2] E.M. FOUNDATION, *Economia circular*. 2019 <<https://ellenmacarthurfoundation.org/pt/temas/economia-circular-introducao/visao-geral>>, 20/06/2023.
- [3] Barbosa, M.V.C. *O betão: Definição, caracterização e propriedades*, Dissertação de Mestrado, Área Departamental de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013.
- [4] Steven, H B.K., Kosmatka, and William C. Panarese, *Design and Control of Concrete Mixtures*, PCA, Portland Cement Association, 2008.
- [5] Varela, N., Vieira, F.S., *Cimento: Uma matéria-prima essencial no fabrico de argamassas*, 1º Congresso de argamassas de construção, APFAC, Lisboa, 2005
- [6] NP EN 197-1: 2012. *Cimento: Parte 1. composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes*, Portugal. Instituto Português da Qualidade, 2012.
- [7] NP EN 196-2: 2014. *Métodos de ensaio de cimentos: Parte 2. análise química dos cimentos*, Portugal. Instituto Português da Qualidade, 2014.
- [8] Coutinho J.S., *Materiais de Construção 2 - Ligantes e Caldas*, FEUP - Faculdade de Engenharia de Faculdade do Porto, Departamento de Engenharia Civil da FEUP, 2006.
- [9] LNEC E 477:2007. *Guia Para Especificação Do Betão De Ligante Hidraulicos conforme NP EN 206-1*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2007.
- [10] Mineral commodity summaries 2023, *Mineral Commodity Summaries*, US Geological Survey Reston, VA, 210p, 2023.
- [11] IEA, *Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry*, IEA, Paris, 66p, 2018.
- [12] BBC News. *CO₂: os gráficos mostram que mais da metade das emissões ocorreram nos últimos 30 anos*, <https://www.bbc.com/portuguese/geral-59013520>, 14/06/2023.
- [13] Oliveira S.C.G.d., *Desenvolvimento de métodos expeditos de caracterização de argamassas de construção de um fabricante do mercado português*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro Universidade de Aveiro, 2008.
- [14] Palomo, A., Grutzeck, M.W., M. Blanco-Varela. *A Cement for the Future Alkali-Activated Fly Ashes*, Cement and Concrete Research 29, pag.1323-1329, 1999.
- [15] Lodeiro, M.I.G., *Compatibilidad de geles cementantes csh y nash. Estudios en muestras reales y en polvos sintéticos*, Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Madrid, 2008.
- [16] Torres-Carrasco M., Puertas F., *La activación alcalina de diferentes aluminosilicatos como una alternativa al Cemento Portland: cementos activados alcalinamente o geopolímeros*, Revista ingeniería de construcción 32, pag.05-12, 2017.

- [17] Qu, B., Martin, A., Pastor, J.Y., Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., *Characterisation of pre-industrial hybrid cement and effect of pre-curing temperature*, Cement and Concrete Composites: 73 pag.281-288, 2016.
- [18] Fernández-Jiménez, A., Flores, E., O. Maltseva, I. García-Lodeiro, Palomo, A., *Hybrid alkaline cements. part III. Durability and industrial applications*, Revista Romana de Materiale/ Romanian Journal of Materials 43, pag.195-200,2013.
- [19] Lodeiro,I.G., Taboada, V.C., Fernández-Jiménez, A., Palomo, Á., *Recycling Industrial By-Products in Hybrid Cements: Mechanical and Microstructure Characterization*, Waste and Biomass Valorization 8(5), pag.1433-1440, 2017.
- [20] NP EN 196-1: 2017. *Métodos de ensaio de cimentos: Parte 1. Determinação das resistências mecânicas*, Portugal. Instituto Português da Qualidade, 2017.
- [21] Lodeiro, I.G., Carcelen-Taboada V., A. Fernández-Jiménez, Palomo, A., *Manufacture of hybrid cements with fly ash and bottom ash from a municipal solid waste incinerator*, Construction and Building Materials 105, pag.218-226, 2016.
- [22] Fernández-Jiménez, A., Garcia-Lodeiro, I., Maltseva, O., Palomo, A., *Hydration mechanisms of hybrid cements as a function of the way of addition of chemicals*, Journal of the American Ceramic Society 102, pag.1427-436, 2019.
- [23] Gomes. A.R.L., *Ativação de escória metalúrgica pela adição de fontes secundárias de alumina*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica, Universidade de Aveiro, 2018.
- [24] Almeida. J.L.M.S.L., *Argamassas Tradicionais Industriais de Alvenaria Em Edifícios*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.
- [25] NP EN 998-1: 2017 *Especificação de argamassas para alvenarias: Parte 1. Argamassas para rebocos interiores e exteriores* Portugal. Instituto Português da Qualidade, 2017.
- [26] NP EN 13139:2005/AC: 2010 *Agregados para argamassas*: Portugal. Instituto Português da Qualidade, 2010.
- [27] Barros. J.A.O., *Comportamento Do Betão Reforçado Com Fibras*, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1995.
- [28] Gomes J.G., *Influência Das Fibras Metálicas No Comportamento Ao Esforço Transverso De Vigas Sfr*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [29] NP EN 14889-1:2008 *Fibras para betão. Parte 1. fibras de aço. Definições, especificações e conformidade*, Instituto Português da Qualidade, 2008.
- [30] Lima. R.P.A.F.P., *Utilização de Fibras Metálicas com Funções Estruturais em Estruturas de Betão*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.

- [31] Naaman. A., *Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites*, Journal of Advanced Concrete Technology 1, pag.241-252, 2003.
- [32] Barros J.A.O., *Betão reforçado com fibras de aço: Conceitos fundamentais*, Betão, Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto, 2000.
- [33] NP EN 196-6: 2019. *Métodos de ensaio de cimentos: Parte 6. Determinação da finura*, Instituto Português da Qualidade, 2019.
- [34] NP EN 196-3: 2017. *Métodos de ensaio de cimentos: Parte 3. Determinação dos tempos de presa e da expansibilidade*, Instituto Português da Qualidade, 2017.
- [35] Silva. R.C., *Avaliação dos tempos de presa de misturas cimentícias por resistividade elétrica*, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 2020.
- [36] EN 1015-3:1999/A2: 2006. *Methods of test for mortar for masonry: Part 3. determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*, European Committee for Standardization, 2006.
- [37] NP EN 14488-3: 2008, *Ensaio do betão projectado: Parte 3. resistência à flexão (máxima, última e residual) de vigas reforçadas com fibras*, Instituto Português da Qualidade, 2008.
- [38] ASTM C496 / C496M-17, *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, ASTM International, 2017.
- [39] EN 1015-18: 2002. *Methods of test for mortar for masonry: Part 18. determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar*, European Committee for Standardization, 2002.
- [40] EN12617-4:2002, *Test methods: Products and systems for the protection and repair of concrete structures*, European Committee for Standardization, 2002.
- [41] Millán-Corrales. G., González-López. J.R., Palomo. A., Fernandez-Jiménez. A., *Replacing fly ash with limestone dust in hybrid cements*, Construction and Building Materials 243, pag.118-169, 2020.