

Cinza de madeira como adição em betão – resistências mecânicas e durabilidade

BRUNO MIGUEL PINHEIRO SOARES PINTO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM MATERIAIS E PROCESSOS DE CONSTRUÇÃO

Orientadora: Professora Doutora Maria Joana Álvares Ribeiro de Sousa
Coutinho

JULHO DE 2013

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-5081446

✉ miec@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 +351-22-5081440

✉ 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 Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.*

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.

Aos meus Pais e ao meu Irmão

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Professora Doutora Maria Joana Álvares Ribeiro de Sousa Coutinho por todo o apoio, disponibilidade e entusiasmo pelo ensino que me transmitiu e motivou para a realização deste trabalho, um sincero agradecimento.

A todo o pessoal do LEMC e LABEST pela ajuda, bem como à Mafalda e à Telma pelo tempo e ajuda disponibilizados.

À Junglepower por nos ter cedido gentilmente o material a estudar e a constante disponibilidade.

Aos meus amigos que sempre estiveram presentes quando foi preciso, e que me acompanharam nestes anos de curso. Ao André, Filipe e Joca fica o meu agradecimento por todo o apoio e bons momentos passados.

Um especial agradecimento ao André Ferreira, Jorge e Tiago pela sincera e grande amizade que nos une.

Por fim, agradeço à minha família por sempre me ter acompanhado e pelo apoio emocional. Um especial obrigado à minha Mãe, ao meu Pai e ao meu Irmão por nunca terem duvidado de mim. É também por eles que aqui estou.

RESUMO

A construção na maioria dos países do Mundo, incluindo Portugal, recorre essencialmente a estruturas em betão armado. Em termos de sustentabilidade na construção é fundamental, presentemente, ter em conta, por um lado a durabilidade e por outro a ecologia industrial. A ecologia industrial consiste em utilizar resíduos de uma indústria como matéria-prima de outra indústria. Na realidade já se pratica ecologia industrial na indústria da construção, em particular por utilização de adições pozolânicas como as cinzas volantes ou sílica de fumo para substituição parcial do cimento Portland. O fabrico de clínquer Portland é responsável pela libertação de cerca de 5% das emissões de dióxido de carbono antropogénico a nível global. Assim urge estudar outros resíduos industriais e verificar a sua potencial utilização em betão como por exemplo substitutos parciais de cimento Portland.

Este reaproveitamento de resíduos poderá ser encarado com dois objetivos principais: menor necessidade de fabrico de cimento, o qual, aplicado mundialmente, reduziria significativamente a poluição que advém do seu fabrico, e a própria reutilização dos resíduos que, caso contrário, provavelmente seriam depositados em aterro, contribuindo também para a delapidação mundial.

O presente trabalho centra-se na substituição parcial (10% e 20%) de cimento Portland por cinzas de madeira resultantes da combustão de resíduos de madeira provenientes da indústria de pellets.

Os ensaios foram sobretudo realizados em provetes de diferentes tipos de argamassa com 0%, 10% e 20% de substituição de cimento por cinzas. Foram determinadas resistências mecânicas aos 7, 28 e 90 dias, bem como propriedades relacionadas com a durabilidade, incluindo a penetração acelerada de cloretos, carbonatação acelerada, expansão devido à reação álcali-sílica (ASR) e ataque por sulfatos.

As argamassas contendo as cinzas de madeira (WWAj) diminuem ligeiramente a trabalhabilidade e apresentam menores resistências mecânicas do que o controlo para qualquer percentagem de substituição e em qualquer idade, apesar de para 10% de substituição por WWAj a diferença de resistência aos 90 dias ser marginal face à de controlo. Também com esta percentagem de adição se pôde constatar que o WWAj apresentou melhor desempenho à penetração de cloretos. Por outro lado, relativamente à reação álcali-sílica, foi a substituição de 20% que apresentou menor expansão das três argamassas em análise. A carbonatação foi maior nas argamassas com WWAj, como é, em geral, habitual quando são utilizados materiais pozolânicos.

Com os dados que se dispõem presentemente, fruto do trabalho apresentado, as cinzas de resíduos de madeira (WWAj) testadas não apresentam as características necessárias para serem consideradas “pozolana para betão” segundo a normalização em vigor (NP 4220).

PALAVRAS-CHAVE: cinza de madeira, argamassa, durabilidade, adição, sustentabilidade

ABSTRACT

Construction in most countries of the world, including Portugal, relies essentially on reinforced concrete structures. For sustainability in construction, currently, it is fundamental to take into account on one hand, durability and on the other hand, industrial ecology. Industrial ecology consists in use of industrial waste as a raw material in another industry. In fact, industrial ecology is already put into practice in the construction industry. Related examples are the use of pozzolanic additions such as fly ash or silica fume for partial replacement of Portland cement. The manufacture of Portland clinker is responsible for the release of about 5% of the emissions of anthropogenic carbon dioxide, worldwide. So it is urgent to study other industrial wastes and verify their potential use in concrete such as Portland cement replacement materials.

Reuse of waste in this way may be faced with two main objectives: reduction of Portland cement manufacture, which, applied globally, would significantly reduce cement emissions and the actual reuse of waste that otherwise would likely be sent to landfill, thus contributing to further environmental decay.

This work focuses on partial replacement (10%) and 20% of Portland cement with wood ash obtained from combustion of wood waste in a pellet industry.

Tests were performed on specimens of different types of mortar with 0%, 10% and 20% replacement of Portland cement by ash.

Mechanical strength was determined at 7, 28 and 90 days. Durability related properties were also assessed, including accelerated chloride penetration, accelerated carbonation, expansion due to alkali-silica reaction (ASR) and resistance to sulphate attack.

Mortar containing wood ash (WWAj) presents slightly decreased workability and lower mechanical strength for any replacement percentage at any age when compared to control mortar, although for 10% replacement with WWAj, the difference in strength at 90 days is marginal, compared to control. Also for 10% cement replacement with WWAj mortar performed better than control mortar regarding chloride penetration. On the other hand, for alkali-silica reaction the lowest expansion was observed for mortar containing 20% cement replacement with WWAj. Carbonation depth was higher in WWAj mortar for both percentages compared to control mortar, as generally observed for pozzolanic materials.

With the current available results presented in this work, the type of wood waste ash under study (WWAj) did not prove to present the necessary characteristics to be considered "pozzolan for concrete" according to the Portuguese standard (NP 4220).

KEYWORDS: wood ash, mortar, durability, addition, sustainability

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 FABRICO DO BETÃO E POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA	2
1.3 USO DE RESÍDUOS NO FABRICO DO BETÃO	2
1.4 OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DO PLANO DE TRABALHOS.....	4
2 ESTADO DA ARTE	5
2.1 RESÍDUOS DE MADEIRA	5
2.1.1 ORIGEM E QUANTIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS DE MADEIRA	5
2.2 CINZAS DE RESÍDUOS DE MADEIRA COMO ADIÇÃO EM BETÃO.....	6
2.2.1 PROPRIEDADES DAS CINZAS DE RESÍDUOS DE MADEIRA	6
2.2.1.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS CINZAS DE RESÍDUOS DE MADEIRA	6
2.2.1.2 LIXIVIAÇÃO DAS CINZAS DE RESÍDUOS DE MADEIRA	8
2.2.1.3 ATIVIDADE POZOLÂNICA DAS CINZAS DE RESÍDUOS DE MADEIRA	9
2.2.2 TRABALHABILIDADE.....	9
2.2.3 RESISTÊNCIAS MECÂNICAS	10
2.2.3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	10
2.2.3.2 RESISTÊNCIA À FLEXÃO.....	13
2.2.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA	14
2.2.5 REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA (ASR).....	15
2.2.6 PENETRAÇÃO DE CLORETOS	17
2.2.7 RESISTÊNCIA AO ATAQUE CAUSADO POR ÁCIDOS.....	19
2.2.8 CARBONATAÇÃO.....	20
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	23
3.1 INTRODUÇÃO	23

3.2	MATERIAIS UTILIZADOS	23
3.2.1	CIMENTO	23
3.2.2	CINZA DE MADEIRA	24
3.2.3	DETERMINAÇÃO DA MASSA VOLÚMICA	29
3.2.4	AREIA NORMALIZADA.....	30
3.3	ENSAIOS NAS ARGAMASSAS	30
3.3.1	COMPOSIÇÃO E FABRICO DOS PROVETES.....	30
3.3.2	AVALIAÇÃO DA TRABALHABILIDADE	31
3.3.3	DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE PRESA.....	32
3.3.4	EXPANSIBILIDADE	33
3.3.5	RESISTÊNCIAS MECÂNICAS.....	34
3.3.6	CARBONATAÇÃO ACELERADA	36
3.3.7	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS.....	39
3.3.8	REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA (ASR)	42
3.3.9	ATAQUE POR SULFATOS	47
4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	49
4.1	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	49
4.1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	49
4.1.2	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	49
4.1.3	COMPOSIÇÃO E ANÁLISE QUÍMICA	50
4.1.4	PROPRIEDADES FÍSICAS	51
4.1.5	DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE PRESA.....	51
4.1.6	EXPANSIBILIDADE	51
4.1.7	TRABALHABILIDADE	51
4.1.8	RESISTÊNCIAS MECÂNICAS.....	52
4.1.9	CARBONATAÇÃO ACELERADA	54
4.1.10	PENETRAÇÃO ACELERADA DE CLORETOS.....	55
4.1.11	REAÇÃO ALCALI-SÍLICA (ASR)	56
4.1.11.1	OBSERVAÇÃO DOS PROVETES ASR EM MICROSCOPIA ELETRÓNICA DE VARRIMENTO (MEV)	57
4.1.12	ATAQUE POR SULFATOS	59
5	CONCLUSÕES	62

ANEXOS	71
ANEXO A	73
TRABALHABILIDADE DAS ARGAMASSAS REALIZADAS	73
ANEXO B	75
RESISTÊNCIAS MECÂNICAS AOS 7 DIAS.....	75
ANEXO C	77
RESISTÊNCIAS MECÂNICAS AOS 28 DIAS.....	77
ANEXO D	79
RESISTÊNCIAS MECÂNICAS AOS 90 DIAS.....	79
ANEXO F	81
DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO DOS CLORETOS POR ENSAIO DE MIGRAÇÃO EM REGIME NÃO ESTACIONÁRIO.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Previsões para o consumo de cimento Portland, com adições e especiais [8]	3
Figura 2 – Fatores responsáveis pela deterioração de estruturas de betão armado (<i>ICE Manual of Construction Materials</i> , Volume I)	3
Figura 3 - Concentração de metais do WWA em ensaios de lixiviação [17]	8
Figura 4 - Curva granulométrica do WWA e cimento Portland [23]	11
Figura 5 - Relação entre o valor de absorção de água e a percentagem de substituição de cimento [17]	15
Figura 6 - Estrutura de betão afetada pela reação álcali-sílica [9]	16
Figura 7 - Expansão registada pelas argamassas ao fim de 6 meses [35]	17
Figura 8 - Permeabilidade à entrada de cloretos, aos 56 dias de cura [41]	18
Figura 9 - Variação da massa de betão com o tempo de imersão em ácido nítrico [16]	20
Figura 10 - Variação da massa de betão, sem (CTL) e com 10% de cinza de madeira (SWIFA), com o tempo de imersão em ácido sulfúrico [16]	20
Figura 11 - Profundidade média da zona afetada pela carbonatação [23]	21
Figura 12 – Curva granulométrica laser do CEM I 42,5 R	24
Figura 13 - Madeira e produtos da madeira usados na Junglepower	25
Figura 14 - Depósito para recolha de cinzas de madeira	26
Figura 15 - Aterro de cinzas de madeira	26
Figura 16 - Processo de crivagem, combustão e arrefecimento da madeira.	27
Figura 17 - Curva granulométrica laser do WWAj	29
Figura 18 - Voluménometro para determinação da massa volúmica	30
Figura 18 - Compactador do LEMC	31
Figura 19 - Compactação e medição do diâmetro de espalhamento	32
Figura 21 - Determinação do tempo de presa	33
Figura 22 - Ensaio à flexão	35
Figura 23 - Ensaio à compressão	35
Figura 24 - Resistência à flexão nas argamassas aos 7, 28 e 90 dias	36
Figura 25 - Resistência à compressão nas argamassas aos 7, 28 e 90 dias	36
Figura 26 - Carbonatação ao fim de duas semanas na câmara de carbonatação	37
Figura 27 - Carbonatação ao fim de dez semanas na câmara de carbonatação (última medição realizada)	38
Figura 28 - Profundidade de carbonatação média das argamassas	39
Figura 29 - Compactação dos moldes na mesa vibratória	40
Figura 30 - Coeficiente de difusão de cloretos (média de 2 provetes para cada argamassa)	42
Figura 31 - Provetes imersos em água	43
Figura 32 - Medição da expansão de um dos provetes	44
Figura 33 - Expansão devida à reação álcali-sílica (argamassa CTL)	45
Figura 34 - Expansão devida à reação álcali-sílica (argamassa WWA 10%)	45
Figura 35 - Expansão devida à reação álcali-sílica (argamassa WWA 20%)	46
Figura 36 – Expansão devida à reação álcali-sílica dos três tipos de argamassas em estudo	46
Figura 37 - Expansão média devida ao ataque por sulfatos	48
Figura 38 – Poros na matriz cimentícia das argamassas de WWAj 20%	53
Figura 39 – Matriz cimentícia da argamassa de CTL	54
Figura 40 – Amostra CTL coberta do gel após ataque por ASR	58
Figura 41 - Amostra WWAj 20% com gel após ataque por ASR	58

Figura 42 – Expansão devida ao ataque por sulfatos em argamassa de controlo (CTL) e argamassa com 10% de substituição do cimento por sílica de fumo (SF) e pó de resíduos de vidro (WGP) [53] 59

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química de diversas cinzas [21]	7
Tabela 2 - Composição química do WWA obtida por diversos autores	7
Tabela 3 - Valores do ensaio “slump-test” segundo [17].....	10
Tabela 4 - Resistência à compressão segundo [17].....	11
Tabela 5 - Resistência à compressão [23]	12
Tabela 6 - Resistência à flexão segundo [23].....	13
Tabela 7 - Composição química do WWAj e do cimento CEM I (disponibilizado pela Secil) em % ..	28
Tabela 8 - Comparação das dimensões características do cimento e do WWAj.....	29
Tabela 9 - Determinação da massa volúmica.....	30
Tabela 9 – Quantidades dos constituintes das diversas argamassas.....	31
Tabela 10 - Diâmetros de espalhamento médio das argamassas.....	32
Tabela 12 - Tempo de início e fim de presa.....	33
Tabela 13 - Expansibilidade das pastas em milímetros.....	34
Tabela 14 - Profundidade de carbonatação média das argamassas (mm)	38
Tabela 15 - Coeficiente de difusão de cloretos	41
Tabela 16 - Expansão média ao fim de 14 dias.....	47
Tabela 17 – Expansões devidas ao ataque por sulfatos.....	48
Tabela 18 – Requisitos e análise química do WWA, segundo NP 4220.....	50
Tabela 19 - Comparação das dimensões características do cimento usado e do WWAj	51
Tabela 20 – Diâmetros de espalhamento médio das argamassas (mm)	52
Tabela 21 – Resistências à compressão e correspondente desempenho.....	52
Tabela 22 - Resistências à flexão e correspondente desempenho	53
Tabela 23 – Carbonatações médias e correspondente desempenho	54
Tabela 24 - Classe de resistência à penetração de cloretos no betão (<i>Nilsson et al [51]</i>).....	55
Tabela 25 - Coeficientes de penetração de cloretos em regime não estacionário e respetivo desempenho.....	56
Tabela 26 – Expansões ASR e respetivo desempenho.....	57
Tabela 27 - Resultados obtidos e respetivo desempenho	63

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

μm – micra

ASR – Reação álcalis-sílica

ASTM - American Society for Testing and Materials

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ – Hidróxido de cálcio

CEM I 42,5 R – Cimento Portland da classe I 42.5 R

CO_2 – Dióxido de Carbono

CTL – Controlo (0% de substituição, 100% cimento)

Dns – Coeficiente de Difusão Aparente [m^2/s]

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

HR – Humidade relativa (%)

LABEST – Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural

LEMC – Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MPa – Mega Pascal

MEV – Microscópio Eletrónico de Varrimento

N_2O – óxido nitroso

NaCl - Cloreto de sódio

$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ – teor em álcali equivalente

NaOH - Hidróxido de sódio

$^{\circ}\text{C}$ – Graus centígrados

R 7 – Ensaio de resistência mecânica aos 7 dias

R 28 – Ensaio de resistência mecânica aos 28 dias

R 90 – Ensaio de resistência mecânica aos 90 dias

SiO_2 – óxido silício

ton – Toneladas

UE – União Europeia

V – Volts

WWA – cinza de resíduos de madeira (do inglês Wood Waste Ash)

WWAj - cinza de resíduos de madeira provenientes da Junglepower

WWAj 10 – cinza de resíduos de madeira com 10% de substituição na massa do cimento

WWAj 20 – cinza de resíduos de madeira com 20% de substituição na massa do cimento

W/C – Razão água/cimento

1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A problemática a nível da poluição e do gasto excessivo dos recursos naturais em todo o planeta está cada vez mais na ordem do dia, traduzindo-se numa maior consciencialização as suas consequências e efeitos nefastos.

Atualmente, estima-se que a quantidade de colheitas, animais e matérias naturais produzidas que se extraem da terra, ultrapassa em cerca de 20% a capacidade que o planeta consegue repor anualmente, pelo que leva 14,4 meses a refazer aquilo que se consome em 12 meses [1]. Este consumo exacerbado gerará uma insustentabilidade para a nossa geração e especialmente para as gerações futuras.

Relativamente ao aquecimento global, estima-se que a temperatura média global aumente entre 1,4°C a 5,8°C durante os próximos 100 anos, ao passo que a subida registada no século transato foi de apenas 0,6°C, segundo *Malhotra* [2]. Este sobreaquecimento está relacionado com a grande emissão de gases com efeito de estufa (GHG) que atualmente se faz sentir em todo o Mundo, sendo o dióxido de carbono um dos mais importantes, representando cerca de 82% do volume total destes [3].

Este efeito de estufa é ainda devido a gases como o vapor de água, o metano, entre outros, e que sumariamente consiste em reter na atmosfera o calor solar absorvido pela superfície terrestre, evitando portanto que este se dissipe para o espaço. Ao longo dos últimos 150 anos, tem-se vindo a queimar quantidades cada vez maiores de carvão, petróleo e gás natural, libertando portanto grandes quantidades de dióxido de carbono para a atmosfera, causando o aumento gradual do efeito de estufa [4].

Um fator aliado à poluição atmosférica, prende-se com a geração de resíduos, uma vez que o consumo desenfreado das matérias-primas e dos recursos existentes no planeta, geram quantidades avultadas de desperdícios. Atualmente estima-se que só na Europa são gerados 2 000 milhões de toneladas de resíduos, sobre os quais 40 milhões de toneladas são considerados perigosos [5].

Neste sentido, há também uma maior consciencialização e esforço para o reaproveitamento destes resíduos, no entanto, a maior parte destes sofrem outros destinos, geralmente a incineração ou o depósito em aterro.

Nem a incineração nem o depósito em aterro constituem destinos perfeitos, uma vez que ambos podem acarretar consequências graves para a saúde humana ou tornarem-se extremamente nocivos para o ambiente.

A escassez de terras para depósito em aterro, a complexidade de tratamentos que tornem estes resíduos inofensivos para eliminação em aterro, os elevados custos desses tratamentos, do transporte e eliminação levam a que presentemente seja imperativo investir na criação de alternativas tais como a reciclagem. A reciclagem ou valorização tem como vantagens a menor necessidade de recurso a matérias-primas e ainda reduzir o volume total de resíduos a eliminar [5].

1.2 FABRICO DO BETÃO E POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

A seguir à água, o betão é o produto mais consumido no Mundo e portanto é o material de construção mais usado.

A indústria do betão, usa cerca de 1,6 bilhões de toneladas de cimento, 10 bilhões de toneladas de rocha e areia, e 1 bilhão de toneladas de água, todos os anos. Para além disso, a produção de cada tonelada de cimento requer 1,5 toneladas de calcário. O cimento é o componente do betão que mais energia consome e poluição causa no seu fabrico, traduzindo cerca 5% a 8% da quantidade de CO₂ produzidas pelo Homem [6].

No entanto, a redução das emissões de CO₂ geradas no fabrico do cimento podem ser mitigadas da seguinte forma [7]:

- Reduzindo a quantidade de clínquer no fabrico do cimento (substituindo-se parte deste por outros materiais reativos adequados);
- Aumentando a eficiência energética do processo de produção de clínquer (prende-se essencialmente com a tecnologia usada na linha de produção);
- Aumentando a percentagem de energia proveniente de combustíveis alternativos (substituir os combustíveis fósseis uma vez que são uma fonte de energia não renovável por produtos alternativos que sejam renováveis ou subprodutos industriais, como pneus);
- Substituindo combustíveis com fatores de emissão de CO₂ elevados, por outros com fatores de emissão mais reduzidos (por exemplo o uso de pneus triturados ou coque de petróleo em detrimento do carvão).

1.3 USO DE RESÍDUOS NO FABRICO DO BETÃO

As previsões para a evolução do consumo dos cimentos, indicam que de 2005 a 2015, haverá redução do consumo de cimento Portland, Figura 1, de 76% para 70%, mas verificar-se-á um aumento de 20 para 24% dos cimentos contendo adições [8].

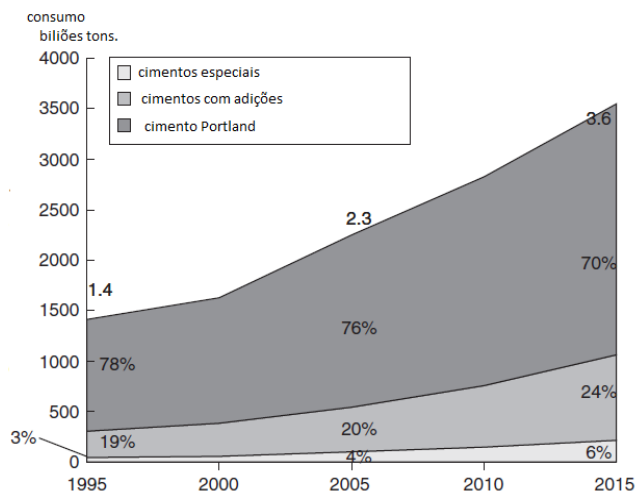


Figura 1 – Previsões para o consumo de cimento Portland, com adições e especiais [8]

Essas adições serão provenientes de resíduos tais como as já mundialmente utilizadas e normalizadas como as cinzas volantes ou escórias de alto-forno.

Em boa verdade, e em virtude dos estudos já realizados, o uso de adições como as descritas anteriormente, minimizam o ataque ou a deterioração de determinadas reações que afetam o betão, incrementando portanto, a sua durabilidade. De facto em estruturas de betão armado ou pré-esforçado, as adições podem conferir maior resistência a certas agressões de natureza química, pois ao hidratarem consomem hidróxido de cálcio diminuindo o risco de formação de etringite e também o risco de ataque dos álcalis à sílica reativa do agregado [9].

A Figura 2 ilustra os ataques mais frequentes às estruturas de betão armado.

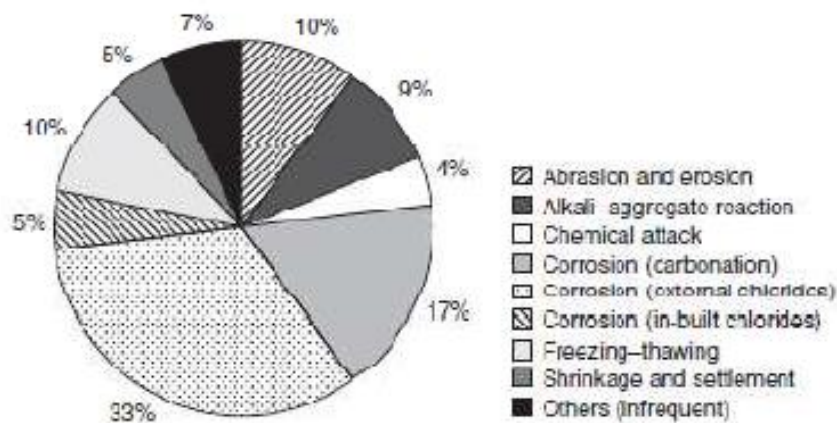


Figura 2 – Fatores responsáveis pela deterioração de estruturas de betão armado (*ICE Manual of Construction Materials, Volume I*)

Como tal, o uso de materiais de substituição adequados (adições) no cimento é conhecido por contribuir significativamente para a durabilidade e muitas vezes em termos de trabalhabilidade. Posto isto, salienta-se que a investigação neste campo é de extrema importância, no sentido que o uso de adições traz vantagens económicas, técnicas e ambientais.

1.4 OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DO PLANO DE TRABALHOS

O presente trabalho está organizado em 4 capítulos.

No capítulo 1 (Introdução), faz-se o enquadramento do tema do trabalho, tecendo considerações acerca do fabrico do cimento e betão e a poluição que daí advém, lançando a temática do uso de adições.

No capítulo 2 (Estado da Arte), são apresentadas as investigações realizadas por outros autores que serviram como base de conhecimento para este trabalho, bem como ensaios e resultados que sirvam para compreender a sua aplicabilidade como adição.

No capítulo 3 (Procedimento Experimental), é feita a caracterização dos materiais usados, bem como dos ensaios realizados e consequentes resultados experimentais. Foram produzidos 3 tipos de argamassa, uma de controlo (CTL) com 100% de cimento e duas contendo cinza de resíduos de madeira em substituição parcial do cimento em 10% (WWAj 10%) e 20% (WWAj 20%).

No capítulo 4 (Discussão dos Resultados), é feita uma análise do desempenho do WWAj em termos de argamassas por comparação dos resultados de cada propriedade analisada nas argamassas WWAj 10% e WWAj 20% com os resultados da argamassa CTL. Perante os resultados obtidos foi também possível proceder à discussão dos mesmos com os resultados obtidos por diversos autores em estudos semelhantes.

No capítulo 5 (Conclusão), é apresentado, em suma, as conclusões gerais deste relatório e sugestões de desenvolvimentos futuros para o uso do WWAj como substituto parcial do cimento em betão.

2

ESTADO DA ARTE

2.1 RESÍDUOS DE MADEIRA

2.1.1 Origem e quantificação dos resíduos de madeira

Em todo o Mundo estão a ser conduzidas investigações e desenvolvimentos no sentido de utilizar, ou reutilizar, resíduos de diversos materiais nas mais diversas vertentes tecnológicas. De entre os muitos resíduos, surgem os resíduos de madeira. Atualmente, as indústrias que laboram com matéria-prima de base florestal têm geralmente baixo rendimento e geram grandes quantidades de resíduos no processo produtivo, principalmente as indústrias de transformação primária.

O aumento progressivo da utilização da madeira nas mais diversas indústrias, tem revelado problemas como o crescimento do consumo desta matéria-prima, num momento em que o mercado apresenta uma diminuição da oferta da mesma. Este fator aliado ao baixo rendimento na sua transformação por parte da indústria, gera outro problema, os resíduos de madeira, que muitas vezes não têm utilização por parte da indústria onde são gerados. Posto isto, sem um destino adequado dos mesmos resíduos, são gerados problemas ambientais graves como o assoreamento e poluição dos rios, poluição do ar devido à queima descontrolada para eliminação destes e utilização de grandes áreas de depósito deste material que poderiam ter outra utilização, para além do aumento do risco de incêndios [10].

Segundo *INETI* [11], a origem dos resíduos de madeira provenientes da indústria de transformação madeireira, disponibilizam anualmente cerca de 361.964 toneladas de madeira. Só o subsector da serração contribui com 27,7% do volume total de resíduos de madeira, seguindo-se os subsectores da carpintaria e painéis e folheados com 24,9% e 18,8% respetivamente. Os subsectores do mobiliário e parquearia, representam 16,1% e 12,2% do volume de resíduos do mesmo género. Por outro lado, estima-se que a produção anual de resíduos de madeira resultantes da biomassa florestal, ascendem a 1.749.000 ton/ano [12].

Em Portugal, foram construídas duas unidades produtoras de eletricidade, cuja alimentação é feita através da biomassa, a fim de complementar a demanda de energia elétrica existente, com outras unidades que geram energia elétrica, mas com recurso a combustíveis fósseis. Esta biomassa florestal usada em ambas as instalações, produzem energia térmica para operar em turbinas a vapor, para posterior produção de energia elétrica [13]. Além disso, tem sido uma prática comum na indústria de transformação da madeira, o desenvolvimento de caldeiras de pequena escala que utilizam os próprios resíduos de madeira como fonte principal de alimentação, e cuja função é a de gerar energia térmica para usar no processo laboral, nomeadamente na secagem dos produtos de madeira. Estes resíduos de

madeira são o combustível preferível para estas caldeiras de biomassa, pelo facto de produzirem menos cinzas volantes e de fundo comparando com, nomeadamente, a biomassa de natureza herbácea ou de resíduos agrícolas [14].

Como se sabe, o cimento, principal constituinte do betão, exige um grande recurso de matérias-primas bem como de energia, enquanto que ao mesmo tempo, liberta quantidades elevadas de dióxido de carbono para a atmosfera. Estima-se que, para a produção de 600 kg de cimento, são libertados cerca de 400 kg deste mesmo gás para a atmosfera.

Udoeyo e Dashibil, Elinwa e Ejeh, Udoeyo et al e Naik et al [15-18] estudaram a viabilidade de utilizar resíduos de cinzas de madeira como material de substituição do cimento no fabrico do betão. Os testes realizados demonstraram resultados promissores em que as cinzas de resíduos de madeira podem adequadamente ser usadas como material constituinte de betão estrutural, apresentando propriedades mecânicas e de durabilidade aceitáveis. Estes resultados fornecem uma solução para os problemas de gestão de resíduos da cinza de madeira, contribui para a minimização do consumo de energia e redução de emissões de CO₂ ligado ao fabrico do cimento, produzindo desta forma um betão mais sustentável em termos ambientais. A utilização dos resíduos da cinza de madeira permite ainda uma redução do custo de fabrico do betão, uma vez que incorpora um aproveitamento de um resíduo que, possivelmente, seria lançado em aterro.

2.2 CINZAS DE RESÍDUOS DE MADEIRA COMO ADIÇÃO EM BETÃO

2.2.1 Propriedades das cinzas de resíduos de madeira

2.2.1.1 Composição química das cinzas de resíduos de madeira

As cinzas de biomassa, incluindo de madeira têm sido estudadas por vários autores. Segundo *Udoeyo et al* [17], a difração por raio-X, demonstrou que as cinzas de resíduos de madeira têm essencialmente na sua composição os seguintes óxidos: CaO, SiO₂, Al₂O₃, K₂O, Fe₂O₃, MgO, SO₃, TiO₂ e P₂O₅. Por sua vez, a análise química revelou que as cinzas possuem sílica (SiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃) e óxido de ferro (Fe₂O₃), cuja combinação das percentagens mássicas destes três óxidos é de 37.8%, sendo inferior aos 70% especificados na norma ASTM C 618 (ASTM 1971) como valor limite para material pozolânico. Por outro lado, *Elinwa e Mahmood* [19] numa investigação sobre o mesmo material, obteve um valor significativamente superior para esta combinação de óxidos, contabilizando 73.55%.

No entanto, *Tarun et al* [20] apontam intervalos de valores entre os quais podem variar alguns dos componentes químicos das cinzas, sendo: SiO₂ (4 a 60%), Al₂O₃ (5 a 20%), Fe₂O₃ (10 a 90%), CaO (2 a 37%), MgO (0.7 a 5%), TiO₂ (0 a 1.5%), K₂O (0.4 a 14%), SO₃ (0.1 a 15%). A Tabela 1 indica a composição química das cinzas de várias espécies de madeira, segundo *Vassilev et al* [21]. A Tabela 2 indica a composição química do WWA obtida por diversos autores.

Tabela 1 - Composição química de diversas cinzas [21]

Grupo, sub-grupo e variedade de biomassa	SiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	TiO ₂
Serrim de amieiro	37.49	26.41	6.1	2.02	12.23	4.04	8.09	1.81	0.98
Casca de bálsamo	26.06	45.76	10.7	4.87	1.91	2.33	2.65	2.65	0.21
Resíduos florestais	20.65	47.55	10.23	5.05	2.99	7.2	1.42	1.6	0.4
Madeira de desmatamento	65.82	5.79	2.19	0.66	14.85	1.81	1.81	2.7	0.55
Serrim de carvalho	29.93	15.56	31.99	1.9	4.27	5.92	4.2	2	0.39
Madeira de carvalho	48.95	17.48	9.49	1.8	9.49	1.1	8.49	0.5	0.1
Madeira de pinho	68.18	7.89	4.51	1.56	7.04	2.43	5.45	1.2	0.55
Serrim	26.17	44.11	10.83	2.27	4.53	5.34	1.82	2.48	0.4
Espruce	49.3	17.2	9.6	1.9	9.4	1.1	8.3	0.5	0.1
Madeira	23.15	37.35	11.59	2.9	5.75	7.26	3.27	2.57	1.2
Resíduo de madeira	53.15	11.66	4.85	1.37	12.64	3.06	6.24	4.47	0.57

Tabela 2 - Composição química do WWA obtida por diversos autores

Compostos químicos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
[1]	67.20	4.09	2.26	9.98	5.8	-	-	0.08	0.48
[2]	78.92	0.89	0.85	0.58	0.96	-	-	0.43	-
[3]	67.20	4.09	2.26	9.98	5.80	-	-	0.08	0.48
[4]	31.80	28.00	2.34	10.53	9.32	-	10.38	6.50	-
[5]	28	4.1	2.5	39	10	-	7.4	1	3.9

[1] – *Elinwa e Mahmood* [19]

[2] – *Udoeyo e Dashibil* [15]

[3] – *Elinwa e Ejeh* [16]

[4] - *Abdullahi* [22]

[5] – *Cheah e Ramli* [23]

Um fator conhecido das cinzas de madeira, é que o rendimento do teor de cinzas diminui com o aumento da temperatura de combustão. Também para temperaturas de combustão elevadas, neste caso superiores a 1000°C, é verificada uma redução do teor em carbonatos, devido à decomposição química

do referido composto químico [24]. A diferença na composição total destes óxidos em comparação com valores obtidos em pesquisas anteriores, mostra a variabilidade com que o material está sujeito, sugerindo-se portanto, uma análise química antes da sua utilização como material pozolânico [25].

Tarun *et al* [20] testaram várias cinzas de resíduos de madeira oriundas dos Estados Unidos da América e do Canadá, obtendo uma massa volúmica que varia entre 1.6 e 2.8 g/cm³. Já Udoeyo *et al* [17], obtiveram para o seu estudo um valor de 2.43 g/cm³ e um pH de 10.48. Cheah e Ramli [14] referem que esta massa volúmica, sendo inferior à do cimento, resulta numa diminuição do peso efetivo do betão, quando se aplica a substituição parcial do cimento por cinza de resíduos de madeira, podendo conduzir a estruturas em betão mais leve.

Como síntese, apresenta-se a seguir um intervalo de valores de todos os compostos químicos e de todos os autores enunciados anteriormente: SiO₂ (4 a 79%), Al₂O₃ (0,89 a 28%), Fe₂O₃ (0,85 a 90%), CaO (0,58 a 39%), MgO (0,7 a 10%), TiO₂ (0 a 1,5%), K₂O (0,4 a 14%), SO₃ (0,1 a 15%), Na₂O (0,4 a 14%) e P₂O₅ (0,48 a 3,9%).

2.2.1.2 Lixiviação Das Cinzas De Resíduos De Madeira

Para materiais não convencionais como as cinzas de resíduos de madeira, não existem especificações ambientais adequadas para a sua utilização enquanto material de construção. Como tal, os auditores da regulamentação tendem a usar os níveis de contaminação da lixiviação na sua apreciação acerca da utilização ou não destes resíduos como material de construção [14].

Udoeyo *et al* [17] estudaram o conteúdo químico, especialmente o teor de metais pesados, resultantes da lixiviação das cinzas de resíduos de madeira, usando água destilada e acidificada com ácido nítrico para ajustar o pH entre 4 e 5, tendo a análise acusado a presença de metais pesados como o crómio, ferro, zinco e arsénio. Os autores referem ainda que o arsénico foi detetado em altas concentrações na lixiviação, ao contrário do ferro em que foram detetados apenas vestígios, como ilustra a Figura 3.

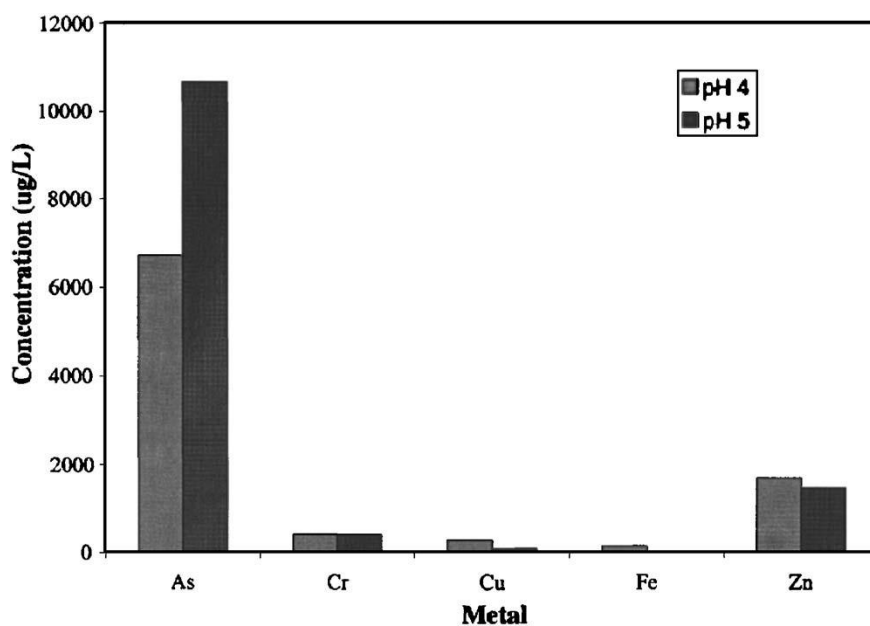


Figura 3 - Concentração de metais do WWA em ensaios de lixiviação [17]

No entanto, estas concentrações de metais pesados parecem também estar associadas ao grau de acidez do agente de lixiviação do próprio ensaio e/ou com origem nos tipos de conservantes usados na madeira [26], [27] e [17]. *Udoye et al* [17] sugere ainda um processo de seleção das cinzas de madeira antes do seu emprego no betão.

2.2.1.3 Atividade Pozolânica Das Cinzas De Resíduos De Madeira

Abdullahi [22] estudou a capacidade das cinzas de resíduos de madeira atuarem como pozolanas. Como especificado na Tabela 2, o autor obteve um total de 62.14% de composição percentual total de Fe_2O_3 , Al_2O_3 e SiO_2 . Como este valor é inferior aos 70% indicados na norma americana ASTM C 618-03, o autor refere que este facto reduz o efeito pozolânico das cinzas de madeira. O mesmo se passa com a perda ao fogo, onde o autor obteve o valor de 27%, valor substancialmente superior aos 12% especificados como valor máximo em ASTM C 618-03. Isto indica que existe uma grande quantidade de carbono não queimado, reduzindo portanto o mesmo efeito pozolânico, mas cuja presença serve como material de enchimento na mistura.

Para o conteúdo em álcalis o valor obtido foi de 6.5%, expressos em percentagem de Na_2O , ultrapassando o limite de 1.5% expressos como valor máximo, não sendo portanto viável a utilização de cinzas de madeira como adição quando se utilizam agregados reativos [22].

Sousa Coutinho e Garcia [28] estudaram a viabilidade de utilização de cinzas de fundo de resíduos de madeira como adição em argamassa. No estudo relativo à caracterização destas cinzas, as autoras compararam propriedades daquelas cinzas com requisitos expressos na NP EN 450-1 para cinzas volantes, com a NP EN 15167-1 para escórias, com a NP 4220 [29] para pozolanas e com a NP EN 12620 para fíler. Este estudo permitiu concluir que, para aquelas cinzas de fundo de resíduos florestais aplicadas como substituição parcial de cimento em argamassa, conduziu a perdas marginais em termos de durabilidade a partir de 3 meses de cura, e com ganhos de resistência, ao fim de 1 ano. Embora não pozolânico, este resíduo poderá ser utilizado como fíler.

O volume total dos óxidos Fe_2O_3 , Al_2O_3 e SiO_2 das cinzas de madeira analisadas, está acima do limite mínimo requerido para cinzas volantes, estando os restantes valores de acordo com os requisitos. Os cloretos estão bem abaixo do limite máximo especificado, e a perda ao fogo recai sobre os limites para cinzas volantes de classe A.

O valor da soma dos óxidos CaO , MgO e SiO_2 excedem igualmente o mínimo exigido na norma relativa às escórias, apesar de que a soma do volume de CaO e MgO deve exceder o volume de SiO_2 .

O valor obtido para a perda ao fogo, na análise da norma relativa à classificação da cinza de madeira como escória, também excede o máximo requerido pela norma. Como tal, a cinza de madeira também não pode ser classificada como escória, tal como *Naik et al* [30] já haviam demonstrado na análise de uma cinza de fundo de madeira.

2.2.2 Trabalhabilidade

Relativamente à trabalhabilidade do betão e argamassas com recurso à adição de cinzas de madeira, refere-se em seguida a experiência relatada em dois programas de investigação. *Elinwa e Mahmood* [19] reportaram que a utilização de cinzas de resíduos de madeira na substituição de cimento no fabrico de betão, provocou uma maior necessidade de água para que a mistura obtivesse a trabalhabilidade alcançada pelo betão sem adição de cinza de madeira. Neste ensaio, apesar de ter sido mantida a razão água/ligante a 0.565, o aumento de substituição com esta cinza de 5 a 30%, com

incrementos de 5%, resultaram numa diminuição gradual do valor do “slump-test” de 5 a 40 mm em comparação com o betão de controlo.

Por outro lado, *Udoeyo et al* [17] realizaram o “slump-test” em betão com WWA e em betão de controlo (CTL). A tabela abaixo refere-se aos valores obtidos pelo mesmo autor, onde é evidente a diminuição da trabalhabilidade com o aumento do teor em WWA. Ainda relevante, o autor salienta o facto de que para valores mais altos de substituição do cimento em WWA, nomeadamente para 20, 25 e 30%, o valor do abaixamento é 0.

Tabela 3 - Valores do ensaio “slump-test” segundo [17]

Conteúdo em WWA (%)	Slump (mm)
0	62.0
5	8.0
10	5.0
15	2.5
20	0.0
25	0.0
30	0.0

2.2.3 Resistências Mecânicas

2.2.3.1 Resistência à compressão

Diversos autores ([19], [15], [16] e [22]) mostram que o uso de cinzas de resíduos de madeira como substituição do cimento no fabrico de betão, em percentagens dos 5% aos 30%, reduz o valor da resistência à compressão do betão relativamente ao controlo, em todos os períodos de cura analisados. *Udoeyo et al* [17] justificam que esta tendência de redução da resistência à compressão se deve ao facto das partículas das cinzas de resíduos de madeira atuarem essencialmente como material de enchimento e não como material ligante na matriz cimentícia. Contudo, *Elinwa e Mahmood* [19] observaram apenas uma diferença marginal entre a resistência à compressão obtida pelo betão de controlo comparativamente com o betão com adição de cinzas de madeira. Esta diferença ainda tende a diminuir para períodos de cura mais longos, nomeadamente para períodos superiores a 28 dias.

Por outro lado, *Udoeyo et al* [17] determinou igualmente a resistência à compressão de betão com substituições de cinza de resíduos de madeira com as percentagens de 0, 10, 15, 20, 25 e 30%. Os resultados demonstram que houve uma melhoria significativa na resistência à compressão para períodos de cura mais longos das amostras a ensaiar. Na tabela seguinte estão registados os resultados dos autores.

Tabela 4 - Resistência à compressão segundo [17]

WWA (%)	Resistência à compressão (MPa)				
	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias	90 dias
0	16.24±0.10	16.85±0.05	23.40±0.46	28.35±2.64	31.48±0.50
5	14.23±1.04	15.31±0.87	18.32±0.67	24.61±0.51	28.66±0.70
10	14.01±0.86	15.31±0.37	16.82±0.75	21.86±1.11	27.54±0.34
15	13.75±0.62	14.18±0.26	15.78±0.68	21.73±0.84	23.70±0.81
20	13.25±0.47	14.10±0.39	15.78±0.68	20.55±0.79	22.68±0.81
25	13.17±0.36	14.05±0.58	15.03±0.88	20.35±1.16	19.62±0.56
30	12.83±0.30	13.88±0.76	14.85±0.25	19.52±0.57	19.52±0.57

Naik et al [31] estudaram a resistência à compressão em betão com substituições de 0, 5, 8 e 12%, até aos 365 dias de idade de cura. Com base nesses resultados, os autores concluíram o seguinte:

- i. A mistura de controlo (com 0% de substituição) registou o valor de 34 MPa aos 28 dias, e 44 MPa aos 365 dias;
- ii. A mistura com substituições de cinza de madeira registara o valor máximo de 33 MPa aos 28 dias, e o valor de 46 MPa para os 365 dias;
- iii. A inclusão de cinzas de madeira contribuiu para o desenvolvimento da resistência à compressão das misturas de betão, mesmo tendo diminuído em cerca de 12% o teor em cimento. Isto indica a contribuição das cinzas de madeira como material pozolânico.

Cheah e Ramli [23] estudaram igualmente a resistência do material em causa na substituição do cimento. Na Figura 4, está representada a curva granulométrica que os autores apresentam para as cinzas de resíduos de madeira e para o cimento Portland usado.

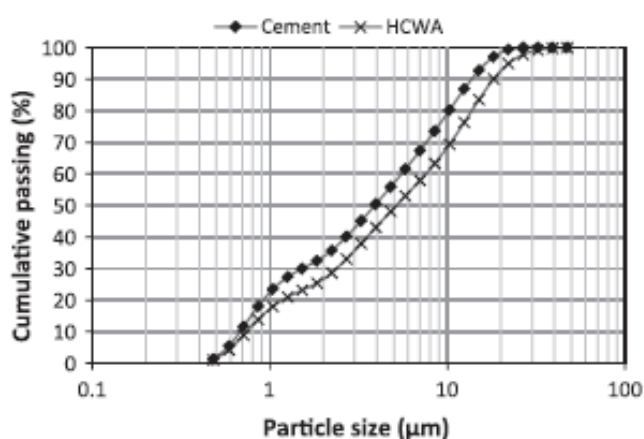


Figura 4 - Curva granulométrica do WWA e cimento Portland [23]

A dimensão média das partículas do WWA é de 5.16 μm e apresenta uma superfície específica de 1087.1 m^2/kg . No entanto, apesar do WWA ter uma dimensão média das partículas superior ao cimento (3.9 μm), a superfície específica do primeiro é também superior à do segundo (1042.3 m^2/kg), sendo este facto justificado pela natureza porosa do material de substituição, indicada na análise através da microscopia eletrónica realizada pelos autores. Esta justificação é também validada por *Udoeyo et al* [17] e *Wang et al* [32].

Os autores referem que o alvo dos 40 MPa de resistência à compressão para os 28 dias foi alcançado para substituições até 20%. Geralmente, até esta mesma data de cura, observou-se que o aumento dos níveis de substituição de cimento a partir de 0 até 25%, em incrementos escalonados de 5 em 5%, resultou numa diminuição gradual da resistência à compressão, como expresso na tabela de resistências obtidas pelo autor.

Tabela 5 - Resistência à compressão [23]

WWA (%)	Resistência à compressão (MPa)			
	3 dias	7 dias	28 dias	90 dias
0	34.89±0.41	38.15±2.15	44.90±1.37	48.25±3.40
5	31.89±1.99	37.04±2.08	44.39±3.54	46.81±1.84
10	31.61±1.62	36.54±0.81	42.98±4.16	47.26±5.25
15	27.01±1.28	31.85±1.19	41.77±2.69	49.55±4.81
20	27.03±1.71	33.61±3.52	40.06±0.71	44.64±4.59
25	26.52±1.07	33.34±2.15	38.99±2.92	43.77±2.40

Como se pode constatar pela análise da Tabela 5, o autor conclui que a resistência à compressão para substituições até 10% de ligante total, não foi significativamente inferior à obtida pelo controle (0% de substituição) para um tempo de cura de 3 dias.

Por outro lado, substituições de 15, 20 e 25% para o mesmo tempo de cura, já apresentaram um valor da resistência mais baixo. O autor aponta como possível razão o efeito dominante da diluição do cimento quando a substituição é feita com percentagens mais altas. Tal tendência já foi corroborada por outros investigadores [19], [17], [15] e [32].

No entanto, *Cheah e Ramli* [23] afirmam ainda que com o aumento do tempo de cura para valores superiores a 28 dias, existe uma convergência nos resultados obtidos entre as argamassas de substituição e a argamassa controle. O mesmo se verifica quando se eleva o tempo de cura para 90 dias e substituições até 25%.

Os grandes ganhos de resistência à compressão para tempos de cura que vão desde os 7 aos 90 dias que contribuíram para a convergência de valores referidos acima entre as argamassas de substituição e a argamassa controle, é, muito provavelmente, devido à presença de reação pozolânica. Esta reação ocorre entre a portlandite produzida pela hidratação do cimento Portland, e a sílica amorfa contida nas cinzas de resíduos de madeira.

Após 90 dias de cura, o valor obtido da resistência relativa à argamassa com 15% de substituição até supera a obtida pela argamassa controle, em cerca de 2.7%, enquanto as restantes mantêm apenas uma

diferença marginal para o controle. De notar ainda que foi nas argamassas de substituição que o ganho de resistência ao longo do tempo foi mais significativo, com exceção da argamassa com adição a 5%.

Elinwa et al [33] tentaram melhorar a resistência à compressão, com a adição de um metacaulino na mistura de cinzas de resíduos de madeira com cimento Portland no fabrico de betão. Os autores indicam que inicialmente tinham como objetivo, atingir os 20 MPa de resistência aos 28 dias. Como tal, na mistura por eles estudada, variaram a percentagem de substituição de cinzas de resíduos de madeira entre os 0 (CTL) e os 40%, com incrementos de 5%. A adição de metacaulino foi realizada com uma percentagem fixa de 3% da quantidade total de ligante. Esta inclusão, ainda que feita com percentagens baixas de metacaulino, permitiu obter ganhos de resistência iniciais do betão com cinzas de resíduos de madeira. A adição com 10% de cinzas de resíduos de madeira e 3% de metacaulino, permitiu um ganho de resistência à compressão e módulo de elasticidade de 37% e 7%, respetivamente, em comparação com o CTL. Os autores conseguiram atingir os 20 MPa de resistência à compressão das adições a 5, 10, 15 e 20%, com 3% de metacaulino, ao fim dos 28 dias de cura.

Sousa Coutinho e Garcia [28] estudaram a substituição parcial de cimento com cinza de fundo de resíduos de madeira, cujas dimensões características das partículas, $d(0.1)$, $d(0.5)$ e $d(0.9)$ são 1,1, 6,7 e 27,5 respetivamente. As autoras concluíram que a resistência à compressão para as argamassas de cinza de madeira diminui à medida que aumenta a percentagem de substituição até aos 28 dias e aumenta dos 90 dias aos 365 dias. Como tal, findos os 365 dias, os provetes com argamassa de substituição de 5% obtiveram um desempenho 17% superior ao CTL, enquanto os de 10% se ficaram pelos 8%.

Assim, segundo os vários autores parece que se o material apresentar propriedades adequadas tais como a finura e se o betão for suficientemente curado não se verifica perda de resistência significativa até cerca de 15% de substituição do cimento.

2.2.3.2 Resistência à flexão

Uma vez mais, *Cheah e Ramli* [23] estudaram a substituição de WWA em cimento relativamente à resistência à flexão, obtendo os resultados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resistência à flexão segundo [23]

WWA (%)	Resistência à flexão (MPa)			
	3 dias	7 dias	28 dias	90 dias
0	5.71±0.34	7.34±0.57	8.79±0.73	9.52±0.59
5	6.18±0.23	7.65±0.41	8.90±0.40	9.59±0.63
10	5.54±0.16	6.44±0.37	7.85±0.42	9.73±0.55
15	5.63±0.14	6.27±0.09	7.85±0.72	9.01±0.91
20	5.54±0.07	6.07±0.27	8.26±0.24	8.62±0.66
25	5.46±0.21	6.06±0.24	6.86±0.77	7.69±0.50

Como tal, para uma idade ainda precoce de cura, apenas 3 dias, a argamassa com substituição de 5% apresentou uma resistência mais elevada que as restantes, enquanto as restantes argamassas com substituição até 25%, apresentaram uma resistência bastante semelhante ao CTL. Esta observação é explicada pelo autor como sendo, provavelmente, devido às partículas finas das cinzas de madeira que funcionaram como enchimento dos espaços vazios entre as partículas de cimento e na interface entre agregado-cimento. Este efeito de micropartículas no preenchimento dos espaços vazios, permite obter uma matriz mais densa do que a que se obtém sem qualquer tipo de substituição, permitindo assim, maior resistência à flexão e à compressão do que as obtidas pelas argamassas contendo apenas cimento Portland, contribuindo também para uma maior durabilidade.

Para um período de cura de 7 dias, como a taxa de hidratação do cimento Portland é mais elevada quando comparada com a das cinzas, houve uma compensação do efeito de micropartículas, resultando assim numa maior diferença entre as resistências à flexão das argamassas com teor em WWA, relativamente à argamassa controle. Aos 28 dias de idade, observou-se uma convergência dos valores das resistências para as argamassas com substituições de 10, 15 e 20%, comparativamente ao controle. Esta convergência é justificada pelo autor como sendo devida a uma reação pozolânica mais intensa. A mesma tendência é verificada para a cura até aos 90 dias.

Pela análise da Tabela 6, a melhor opção para uma maior resistência à flexão para idades superiores às estudadas usando cinza de madeira, é a substituição a 10%.

Rajamma et al [13] analisaram igualmente o comportamento de argamassas com substituição parcial de cimento por cinzas de madeira após um período de cura de 28 dias. Para tal, fabricaram provetes com os seguintes níveis de substituição: 0% (CTL), 10%, 20% e 30%. Os autores concluíram que quanto maior o incremento de cinzas de madeira como substituição do cimento nas percentagens indicadas, mais baixos eram os valores de resistência à flexão obtidos. Como tal, para as substituições de 10%, 20% e 30%, os resultados mostraram um decréscimo da resistência para cerca de 60.6-71%, 59.6-61.7% e 45-48.6%, respetivamente, em relação à resistência à flexão alcançada pelo CTL. Posto isto, estes investigadores concluíram que as cinzas de resíduos de madeira podiam ser aplicadas como substituição do cimento em argamassas para valores máximos até 20% sem comprometer em demasia a resistência em estudo e também que esta mesma resistência à flexão decresce rapidamente para substituições acima de 20%.

2.2.4 Absorção de água

Por forma a avaliar a durabilidade do betão com recurso a adições na substituição do cimento, importa perceber a maior ou menor facilidade com que a água penetra nos seus poros e fendas, uma vez que esta é o principal meio de transporte de substâncias nocivas para o betão, que nela estão dissolvidos, ou a sua própria ação que está associada ao fenómeno de corrosão.

Udoeyo et al [17] testaram o betão, com substituição parcial do cimento por resíduos de cinza de madeira, para a absorção de água, por imersão dos provetes. Para levar a cabo este ensaio, foi determinada a diferença percentual entre o peso do betão antes e depois da imersão em água, em relação ao peso do betão antes da imersão, expresso na equação (1).

$$Wa = \frac{M2-M1}{M1} * 100 \quad (1)$$

Em que:

- Wa - absorção de água;
- M1 - massa do betão antes da imersão;
- M2 - massa do betão após imersão.

A figura abaixo representada, ilustra a relação existente entre o valor da absorção de água, comparativamente com a percentagem de substituição do cimento em WWA.

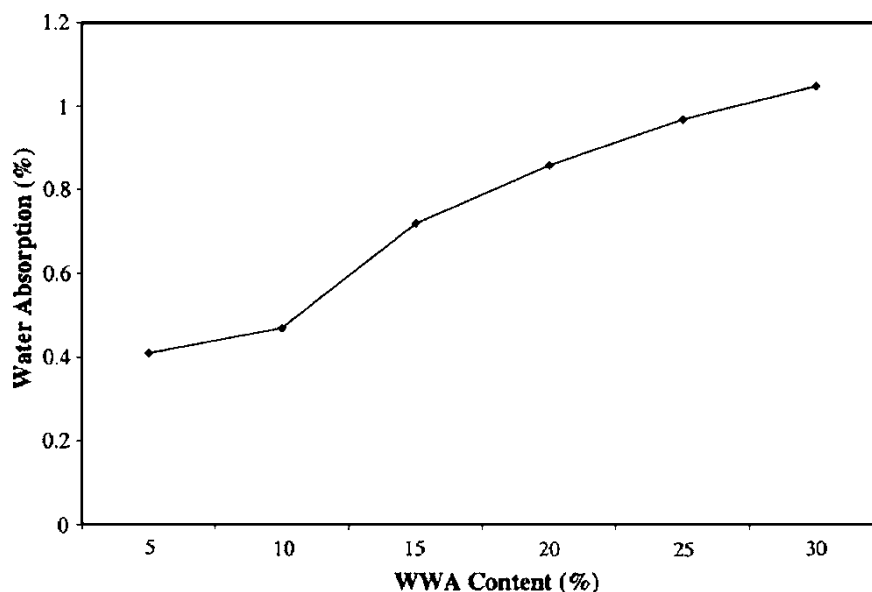


Figura 5 - Relação entre o valor de absorção de água e a percentagem de substituição de cimento [17]

Analisando a figura anterior, podemos observar que quanto maior o conteúdo de WWA na amostra, maior a absorção de água. Por exemplo, para 5% de substituição, a absorção de água situa-se nos 0.14%, mas para 30% de substituição, este valor já ascende a 1.05%. De notar que estes valores são inferiores a 10%, que é um valor aceitável para a maioria dos materiais de construção [17].

Por outro lado, *Elinwa e Mahmood* [19] estudaram igualmente a absorção de água, desta vez em argamassas, sendo uma de controlo (sem adição de cinzas de resíduos de madeira) e outra com 15% de substituição com o mesmo material e com o traço 1:3:0.6 (ligante, areia e relação água/ligante, respetivamente). Neste estudo os autores concluem que a inclusão de cinzas de resíduos de madeira como material de substituição com 15% do peso total de ligante, contribuiu para uma diminuição da absorção de água. Em termos numéricos, a argamassa com substituição registou o valor de 0.8%, enquanto a argamassa de controlo registou o valor de 1,25%.

2.2.5 Reação Álcali-silica (ASR)

[9] refere que este ataque recai apenas sobre algumas substâncias do betão, mais concretamente sobre os agregados, quando estes contêm sílica reativa.

No entanto, para que esta reação ocorra, é imperativo que se verifiquem, simultaneamente, as seguintes condições:

- Humidade suficiente;
- Fluido que circula nos poros com iões cálcio e álcalis (Na e K) suficientes;
- Quantidade mínima de sílica reativa.

Por outro lado, esta reação pode ser combatida se [9]:

- Cimentos com teor de álcalis, expresso em óxido de sódio, inferior a 0,6% em relação à massa total de cimento;
- Não utilizar agregados com sílica reativa;
- Limitar tanto quanto possível a entrada de alcalis vindas do exterior;
- Utilizar baixas razões água/ligante;
- Evitar humidade no betão, uma vez que é fundamental para que a reação ocorra.

A reação álcali-sílica provoca expansões e a consequente deterioração do betão. Esta expansão é provocada por um gel formado através da reação entre os álcalis do cimento e os constituintes do betão que são reativos. Este gel, ao absorver a água, vai exercendo pressões hidráulicas cada vez maiores, causando as referidas expansões, seguidas de fissurações que com o avançar do tempo deterioram as estruturas de betão, pondo em causa, em casos extremos, a durabilidade das mesmas.

Esta reação é muito lenta, e muitas vezes as consequências advindas desta manifestam-se apenas ao fim de muitos anos [34]. A Figura 6 apresenta uma estrutura de betão deteriorada por esta.



Figura 6 - Estrutura de betão afetada pela reação álcali-sílica [9]

[35] investigaram a expansão causada pela reação álcali-sílica (ASR) em diferentes argamassas com adição de três diferentes tipos de cinzas de madeira volantes, utilizando sempre um agregado reativo e cimento com alto teor em álcalis, as quais compararam com uma argamassa de controlo (CTL). A substituição foi feita a 35% da massa total de ligante.

Os três tipos de cinza usados foram C, SAW e 10P. Estas foram obtidas a partir da combustão de carvão, da combustão de carvão com cinza de madeira (com razão mássica de 80% de carvão e 20% de cinza de madeira) e da combustão de carvão com material herbáceo (com razão mássica de 90% de carvão e 10% de material herbáceo), respetivamente.

A expansão foi medida nas diversas argamassas para os períodos de 1 dia, 14 dias, 1,2,3,4,6,9 e 12 meses. A figura seguinte ilustra os resultados obtidos pelos autores até aos 6 meses de medição.

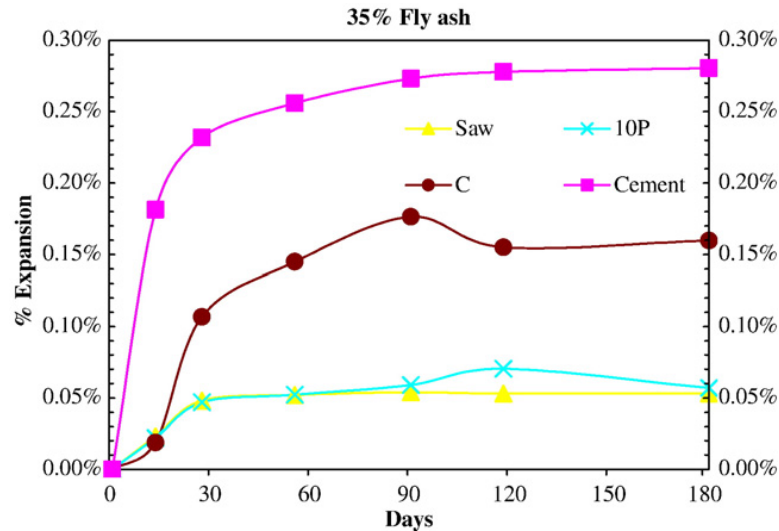


Figura 7 - Expansão registada pelas argamassas ao fim de 6 meses [35]

De seguida apresenta-se a legenda de cada uma das argamassas da Figura 7:

- Cement – argamassa com 0% de adição (CTL)
- SAW – cinza que resulta da combustão de carvão com cinza de madeira
- 10P – cinza que resulta da combustão de carvão com material herbáceo
- C – cinza que resulta da combustão de carvão

Note-se que este ensaio preconizado na ASTM C 227 corresponde a um ensaio em barra de argamassa, mas sem aceleração da reatividade aos alcalis por introdução dos provetes em solução alcalina e por isso muito demorado e não comparável, pelo menos quantitativamente, com o ensaio preconizado na ASTM 1260 [36] e ASTM 1567.

Findo os 6 meses, os investigadores concluíram que apesar das argamassas SAW e 10P conterem muito maior teor em álcalis do que C, aqueles apresentaram melhor desempenho à reação álcali-sílica, portanto menor expansão, do que este. A adição de carvão e cinza de madeira ou cinza de material herbáceo na argamassa, permitiu baixar a expansão registada pelo CTL de 0.28% ao fim de 6 meses, para valores inferiores a 0.1%. Este último é o valor máximo de expansão especificado pela norma americana ASTM C33, utilizado pelos investigadores naquele estudo, mas também um dos limites para a expansão considerando a legislação atual em Portugal (E-461 [37] e ASTM 1260) e ainda a ASTM 1567.

2.2.6 Penetração de Cloretos

A penetração de cloretos é a principal causa da corrosão localizada em betão armado. Este fenómeno ocorre por ação dos iões cloreto, que quando penetram no betão e atingem junto da armadura, uma

concentração superior ao teor crítico em cloretos, provocam uma dissolução localizada da película passiva e, se houver humidade e oxigénio suficiente, originam corrosão nas mesmas.

Os cloretos alteram ainda o tempo de presa do cimento e a sua velocidade de endurecimento, mas não são perigosos para o betão simples, uma vez que não formam compostos indesejáveis [9]. Esta reação de penetração de cloretos, depende em grande escala da razão água/ligante, das condições de cura e ainda do tempo de cura decorrido até realização do ensaio [38], [39] e [40].

Wang *et al* [32] investigaram a resistência à penetração de cloretos em betão com substituição de cimento por diversas cinzas de resíduos de madeira, nomeadamente duas cinzas resultantes da queima de biomassa com carvão, sendo elas:

- CLASSE C e CLASSE F (CLASSE C possui menos quantidade de carbono do que a de CLASSE F);
- Duas cinzas volantes resultantes da queima de carvão e biomassa, designadas por SW1 e SW2 (sobre as quais SW1 possui cerca de 80% de carvão e SW2 possui 90%);
- Cinza volante resultante da queima de madeira (designada por WOOD);
- Duas cinzas resultantes da mistura de cinza volante de madeira e cinza volante de carvão, WOOD C e WOOD F (WOOD C possui cerca de 20% de cinza de madeira e WOOD F cerca de 80%).

Em todas as misturas de betão com as referidas cinzas, os autores ensaiaram a resistência à penetração de cloretos após um tempo de cura de 56 dias em câmara húmida. O mesmo ensaio foi realizado de acordo com a norma americana ASTM C1201-91, isto é, determinando a carga passada em Coulombs, ao fim de 6 horas de ensaio, impondo uma diferença de potencial de 60 V.

Com base nos resultados obtidos, os investigadores concluíram que a cinza WOOD apresenta sensivelmente a mesma permeabilidade aos cloretos que o betão de controlo (CTL). De seguida, surgem as cinzas C (CLASSE C e WOOD C) com uma permeabilidade semelhante entre si, mas mais baixas que WOOD e CTL. Por último surgem as cinzas F (WOOD F e CLASSE F), e a SW1 e SW2, apresentado estas a permeabilidade mais baixa de todas as cinzas analisadas, como ilustra a figura seguinte.

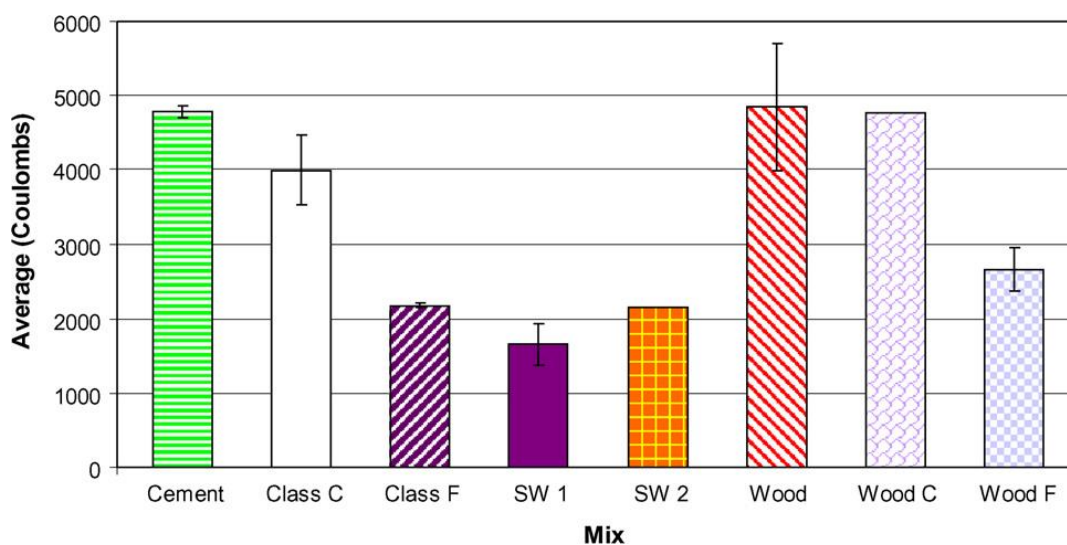


Figura 8 - Permeabilidade à entrada de cloretos, aos 56 dias de cura [41]

No entanto, os autores deste estudo apontam possíveis explicações para estas diferenças na permeabilidade aos cloretos. Estes referem que as mesmas diferenças se podem dever à dimensão elevada das partículas das cinzas volantes e que diferem entre si nos materiais de substituição estudados, à modificação da distribuição dos poros devida à reação pozolânica e, por último, associam também às mudanças na composição química nos poros. Note-se que WOOD tem uma granulometria muito mais grosseira do que nomeadamente CLASSE C, CLASSE F, SW1 e SW2, e que CLASSE C, CLASSE F e WOOD têm semelhante atividade pozolânica, como indicado pelo consumo de cal hidratada ao fim de dois meses [42].

Garcia e Sousa Coutinho [28] também realizaram ensaios de penetração de cloretos em argamassas com substituição de 5 % e 10% de cimento por cinzas de resíduos de floresta um pouco mais finas que o cimento usado, tendo-se verificado que a resistência aos cloretos é ligeiramente inferior à da argamassa de controlo.

2.2.7 Resistência Ao Ataque Causado Por Ácidos

Udoeyo e Dashibil [15] investigaram a resistência do betão ao ataque causado por ácidos, contendo cinzas de madeira como adição. Para tal, estes procederam ao fabrico de dois lotes de betão, contendo ambas as mesmas proporções: 1 de ligante, 2 de areia, 4 de cascalho e um rácio água/ligante de 0.65. Nestes dois lotes de betão, um continha 0% de adição (CTL), e o outro com substituição de 15% da massa total de ligante, por cinzas de madeira.

Os cubos de betão produzidos foram imersos numa solução de ácido nítrico, com uma concentração de 20%. As medições da perda de massa causada pelo ácido, foi registada em ambos os lotes aos 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56, 63 e 70 dias.

Os autores repararam que até às 9 semanas de imersão em ácido, houve um aumento contínuo de massa, justificado pela absorção de água dos cubos. No entanto, a partir da décima semana, já se verificou o contrário, isto é, verificou-se um decréscimo de massa dos cubos, em ambos os lotes.

A título conclusivo deste ensaio, os autores referem que a perda mássica verificada foi menos acentuada no betão que continha substituição de cimento por cinzas de madeira, do que o betão de controlo (CTL).

Elinwa e Ejeh [16] analisaram esta mesma resistência à ação corrosiva dos ácidos em betão, com incorporação de cinzas de madeira. Dois tipos de corrosão foram analisados por estes autores, uma devida ao efeito provocado por ácido nítrico e outra por ácido sulfúrico, ambos com uma concentração de 20%.

Para levar a cabo este ensaio, foram produzidos dois lotes de betão para imersão em cada um dos dois tipos de ácido. Um dos lotes consistia num betão com cimento substituído a 10% da massa total de ligante e um betão de controlo (CTL). Ambas as amostras foram mergulhadas em cada um dos ácidos mencionados anteriormente.

Os investigadores verificaram que houve uma perda de massa em todos os lotes de betão imersos em ácido até às 5 semanas. Os mesmos verificam ainda que a resistência ao ácido nítrico foi superior no betão contendo cinza de madeira relativamente ao CTL, uma vez que a perda de massa daquele foi inferior à deste, como se pode corroborar pela Figura 9.

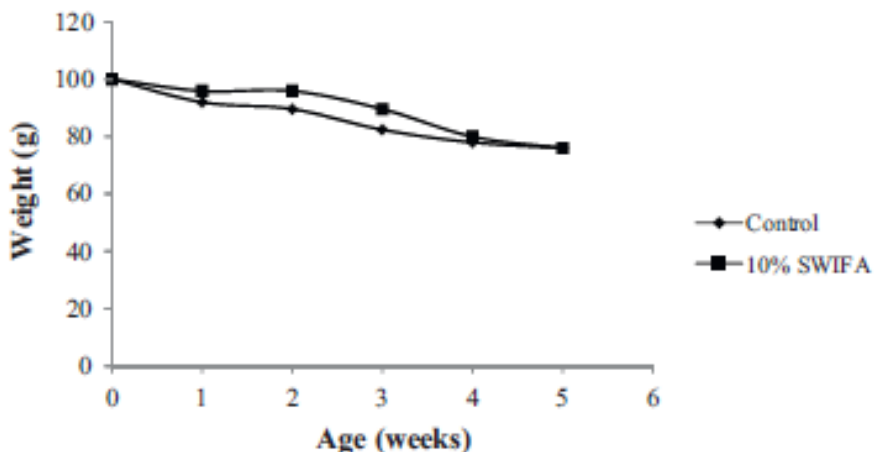


Figura 9 - Variação da massa de betão com o tempo de imersão em ácido nítrico [16]

Contudo, na análise à resistência dos lotes de betão imersos em ácido sulfúrico, os autores concluíram que o betão com adição de cinzas de madeira apresenta menor tolerância ao mesmo, comparativamente com o CTL e para a mesma duração de imersão. Isto porque a perda mássica do primeiro foi superior à do segundo, como se pode comprovar pela Figura 10.

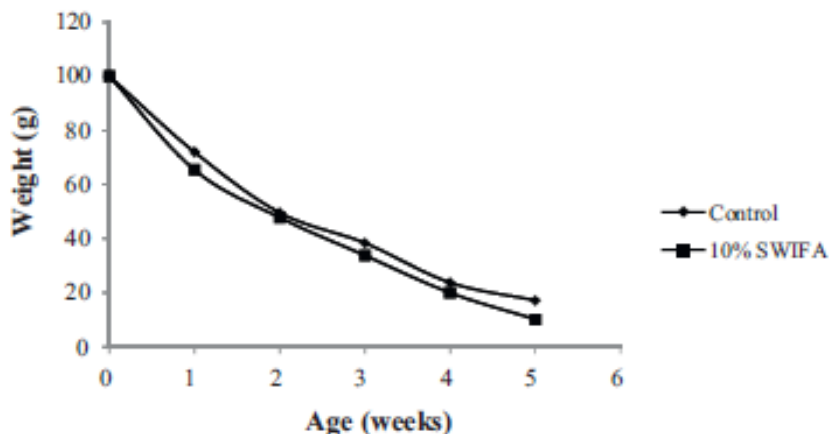


Figura 10 - Variação da massa de betão, sem (CTL) e com 10% de cinza de madeira (SWIFA), com o tempo de imersão em ácido sulfúrico [16]

2.2.8 Carbonatação

Uma das reações químicas no betão que afetam a durabilidade pondo em risco as armaduras é a carbonatação.

A carbonatação consiste na reação entre os compostos de cálcio do betão com o dióxido de carbono, cuja consequência é a diminuição da alcalinidade do betão. O pH do betão são de cerca de 12-13, valor devido, sobretudo, à forte alcalinidade do hidróxido de cálcio, mas quando se dá a carbonatação o valor do pH pode ser inferior a 9.

A progressão da carbonatação pode atingir o betão que envolve as armaduras, abrindo a possibilidade à corrosão das armaduras, que conduzirá à redução da secção do aço, à fissuração e mesmo ao destacamento do betão de recobrimento.

Cheah e Ramli[23] estudaram a profundidade de carbonatação em argamassas de cimento com substituição parcial do mesmo por cinzas de resíduos de madeira. O resultado deste teste de carbonatação, permitiu aos investigadores concluir que a inclusão de cinzas de madeira até 5% da massa total de ligante, permitiu diminuir a profundidade média carbonatada nos provetes de argamassa ensaiados, em comparação com a argamassa de controlo (CTL). A Figura 11 ilustra os resultados obtidos por estes.

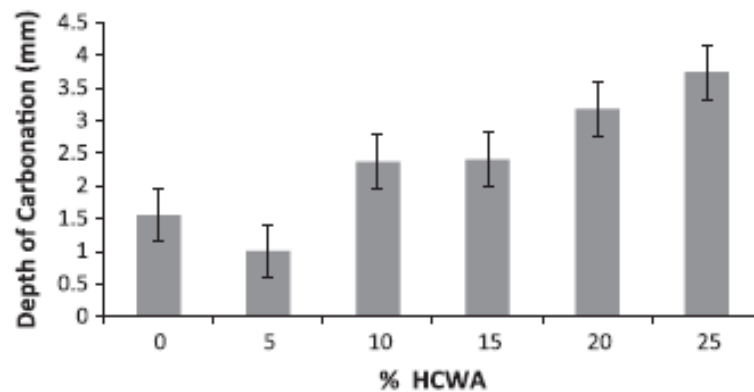


Figura 11 - Profundidade média da zona afetada pela carbonatação [23]

Os autores referem ainda que, para níveis de substituição de 10% a 25%, o aumento da frente carbonatada parece ser proporcional ao aumento de substituição de cimento por cinzas de madeira. Esta tendência de proporcionalidade entre a frente de carbonatação e o aumento do nível de substituição, parece ser consistente com os resultados obtidos por outros autores [43].

Garcia e Sousa Coutinho [28] obtiveram resultados semelhantes em que para argamassas com 0%, 5% e 10% de substituição por cinza de resíduos florestais mais fina que o cimento, obtiveram respetivamente profundidades de carbonatação de 7,0 mm, 4,3 mm e 8,3 mm, isto é, um mínimo de profundidade para a argamassa de 5% de substituição.

A título de conclusão geral deste capítulo, considerando o exposto anteriormente e devido ao facto das cinzas de madeira possuírem uma composição química variável, fruto das diferentes espécies genéticas da madeira original, assim como do processo de combustão, arrefecimento e moagem, este resíduo terá que ser sempre amplamente estudado e caracterizado de forma a conhecer bem as suas propriedades para aplicação como potencial material de substituição parcial do cimento em betão.

3

PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 INTRODUÇÃO

Por forma a determinar a viabilidade da substituição parcial do cimento no betão por WWAj, considerou-se inicialmente esta mesma substituição apenas em argamassa, como é usual neste tipo de estudo. Como tal, foram realizados dois tipos de substituição em massa: a primeira com 10% e a segunda com 20%, sendo, portanto, WWAj 10% e WWAj 20%, respetivamente. Para que o estudo realizado seja comparável, foi usada uma argamassa de controlo, sem substituição portanto, denominado, CTL.

Os constituintes das argamassas em estudo foram:

- Cimento Portland CEM I 42,5 R;
- Areia normalizada CEN;
- Cinzas de restos de madeira cedidos pela Junglepower LDA (WWAj);
- Água destilada.

Para o estudo da viabilidade de substituição parcial do cimento pelo WWAj, foram realizados os seguintes ensaios:

- Avaliação da trabalhabilidade (ASTM C 109/90 [44] e ASTM 230 [45]);
- Ensaio das resistências mecânicas – compressão e flexão (NP EN 196-1[46]);
- Ensaio de carbonatação acelerada (E-391 [47]);
- Ensaio de penetração acelerada de cloretos (E-463 [48]);
- Ensaio da barra de argamassas – ASR – reação álcali-sílica (ASTM C 1260-94);
- Ensaio ao ataque por sulfatos (E-462 [49]).

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

3.2.1 Cimento

O cimento usado, como referido, foi o CEM I 42,5 R, uma vez que dos tipos de cimento comercializados, é o que menor valor de adições possui na sua composição, o qual possui pelo menos 95% de clínquer de cimento Portland, sendo portanto o mais indicado para este tipo de estudo com

substituições parciais. A composição química do cimento encontra-se na Tabela 7 e a curva granulométrica na Figura 12.

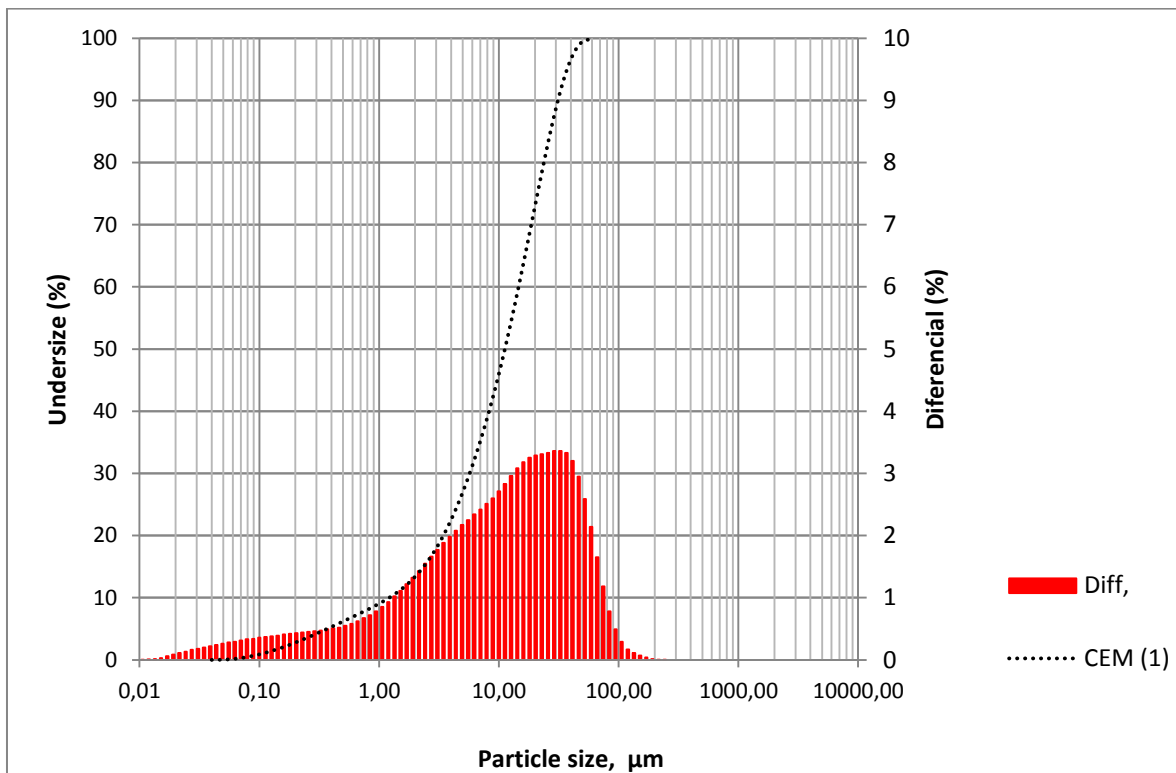


Figura 12 – Curva granulométrica laser do CEM I 42,5 R

3.2.2 Cinza De Madeira

As cinzas de madeira para este caso em estudo, tiveram origem numa empresa portuguesa denominada Junglepower LDA, situada em Lousada. Estas cinzas resultam da combustão dos resíduos de madeira provenientes da indústria de pellets. A obtenção das cinzas de resíduos de madeira resulta da combustão de madeira, nomeadamente casca de pinho, pinheiro, subprodutos madeireiros resultantes do desmatamento, mas também produtos menos nobres da madeira tais como resíduos, como ilustra a Figura 13. A incineração destes dois últimos têm como função principal fornecer o poder calorífico às fornalhas e não propriamente o seu aproveitamento para o fabrico de pellets. As cinzas provenientes da incineração destes materiais lenho celulósicos rejeitados no fabrico de pellets, constituem o material “cinzas de madeira, WWAj” utilizado no trabalho presente.



Figura 13 - Madeira e produtos da madeira usados na Junglepower

Após recolha e acondicionamento, toda esta madeira é submetida a um processo de crivagem, com vários diâmetros de abertura, com o principal intuito de retirar pedras, areias e todo o material que não contribua de certa forma para a produção de pellets ou combustão nas fornalhas. Com este processo, pretende-se ainda reduzir os produtos menos nobres da madeira, por forma a otimizar a combustão da madeira de melhor qualidade.

Concluído este processo de crivagem, a madeira segue para a fornalha onde é queimada. As fornalhas encontram-se programadas para atuar à temperatura de 700°C no Verão, e entre 800°C e 900°C no Inverno.

Finda esta combustão, as cinzas volantes e as cinzas de fundo resultantes deste processo, são recolhidas através de um depósito (Figura 14) e levadas para aterro (Figura 15). Esta mistura de cinzas são as utilizadas no presente trabalho para substituição parcial de cimento no fabrico de argamassas, o WWAj.



Figura 14 - Depósito para recolha de cinzas de madeira



Figura 15 - Aterro de cinzas de madeira

A Figura 16 ilustra todo o processo de crivagem, combustão e arrefecimento da madeira.

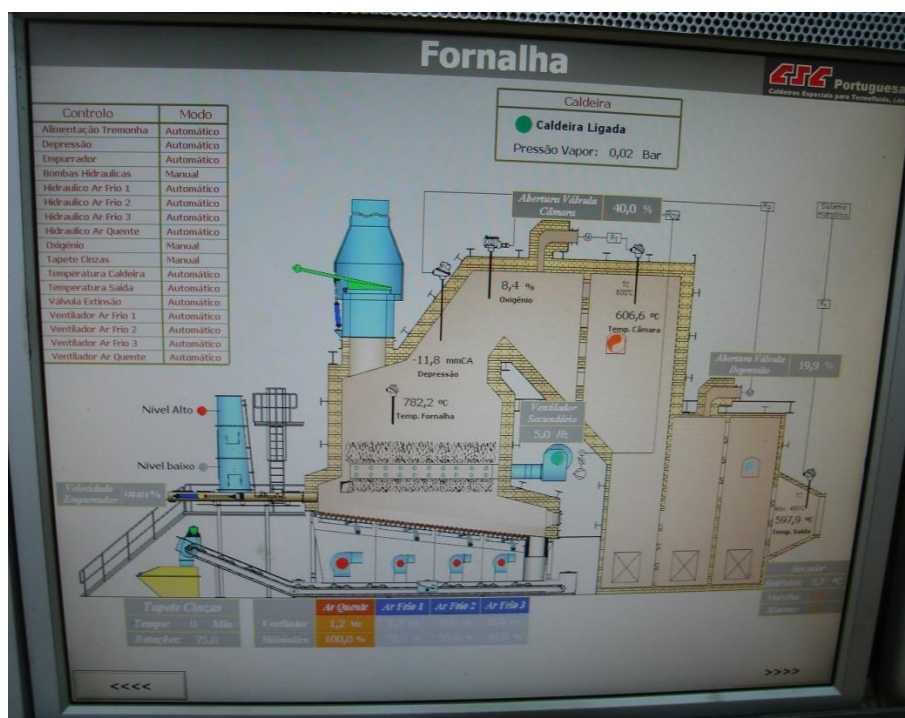


Figura 16 - Processo de crivagem, combustão e arrefecimento da madeira.

O processo segue para o fabrico dos pellets propriamente dito.

Relativamente à composição química obtida do WWAj, depois de devidamente moído e analisado, obtiveram-se as percentagens expressas na Tabela 7 onde se apresenta também a composição química do cimento utilizado. Verifica-se portanto, que o material é essencialmente constituído por SiO_2 (59,3%), seguindo-se do Al_2O_3 (10,05%) e do CaO (5,54%).

Tabela 7 - Composição química do WWAj e do cimento CEM I (disponibilizado pela Secil) em %

Elementos Químicos	CEM I 42.5R	WWAj
SiO ₂	20,36	59,23
Al ₂ O ₃	5,1	10,05
Fe total (Fe ₂ O ₃)	3,12	4,83
MnO	-	0,15
CaO	62,72	5,54
MgO	1,81	1,33
Na ₂ O	-	1,14
K ₂ O	-	3,89
TiO ₂	-	3,23
P ₂ O ₅	-	0,62
SO ₃	3,44	0,3
Cl	0,012	0,015
Cal livre	1,62	-
P. Rubro	2,61	9,81

A Figura 17 ilustra o resultado da análise granulométrica por difratometria laser efetuada ao WWAj no granulómetro laser do Departamento de Engenharia Química da Feup.

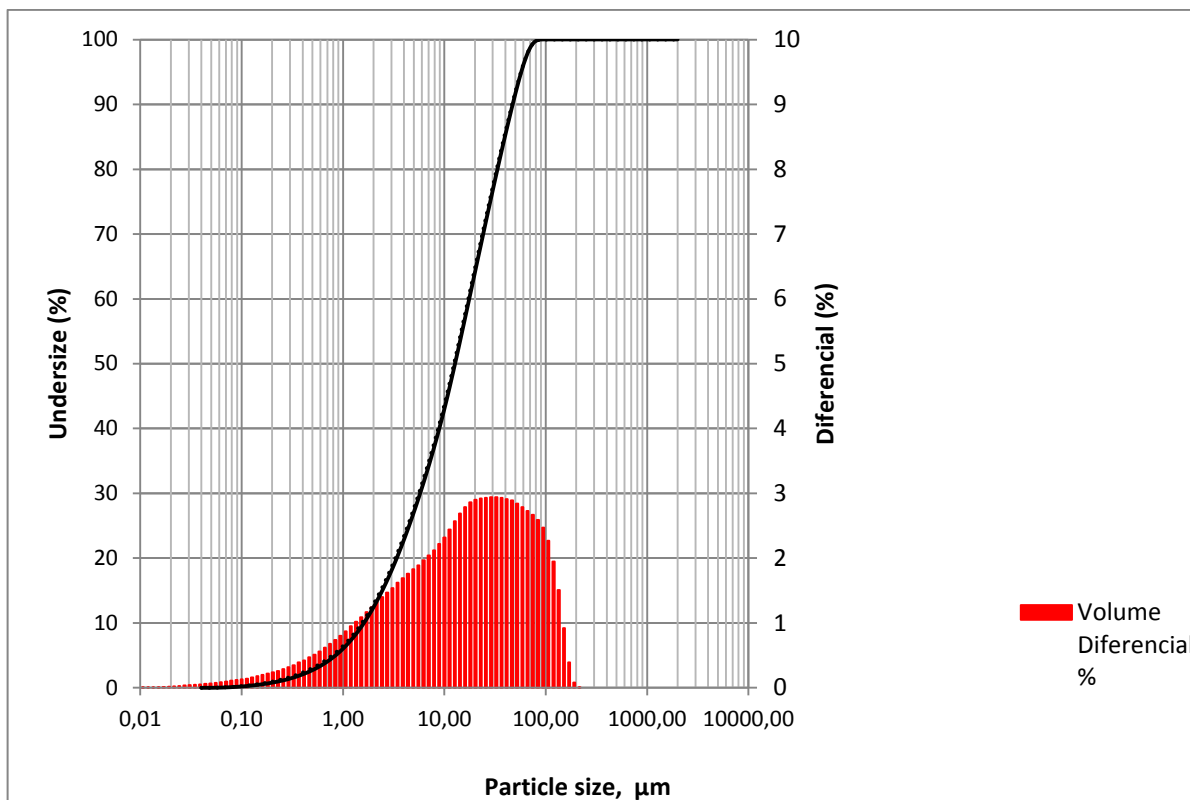


Figura 17 - Curva granulométrica laser do WWAj

Tabela 8 - Comparação das dimensões características do cimento e do WWAj

	d(0.1) (µm)	d(0.5) (µm)	d(0.9) (µm)
CEM I 42.5R	0,976	10,14	32,53
WWAj	1,891	8,715	30,33

3.2.3 Determinação da Massa Volúmica

O cálculo da massa volúmica torna-se necessário quando se pretende calcular a composição do betão, determinar a superfície específica de um cimento e, por vezes, para verificar se o cimento está já parcialmente hidratado (caso do CEM I).

A massa volúmica é determinada pela maneira usual para qualquer sólido, conhecendo a massa e medindo o seu volume a partir do deslocamento de um líquido num voluménometro apropriado, designado incorretamente por “densímetro” de Le Châtelier [50].

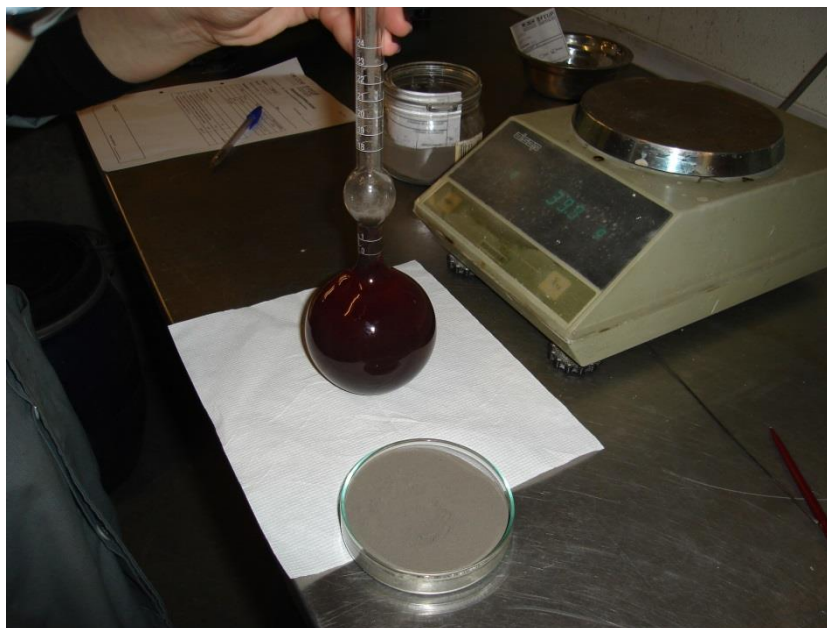


Figura 18 - Volumenómetro para determinação da massa volúmica

Atualmente a recomendação é no sentido de que a massa volúmica deva ser determinada segundo a Especificação E-64 do LNEC, especificação esta que está de acordo com a NP EN 196-6. Como tal, pesaram-se 100 gramas de cimento e de WWAj, e colocaram-se na estufa a cerca de 105°C até massa constante, sendo no entanto, usadas apenas 65 gramas. Contudo, para o WWAj, tal não foi possível, sendo que só se usaram 55,1 gramas, uma vez que a massa volúmica deste material é mais baixa. A determinação da massa volúmica neste trabalho incidiu-se sobre o WWAj e o cimento, tendo sido obtidos os valores expressos na Tabela 9.

Tabela 9 - Determinação da massa volúmica

Material	Massa (g)	V1 (cm3)	V2 (cm3)	Massa volúmica (g/cm3)
CEM I 42.5R	65,00	0,70	21,20	3,17
WWAj	55,10	0,50	21,70	2,60

3.2.4 Areia Normalizada

A areia normalizada CEN usada na produção da argamassa, de acordo com a norma NP EN 196-1 (1996), consiste numa areia natural, com grãos em forma arredondada e elevado teor em sílica. Sabe-se ainda que o lote usado é uma areia reativa, do ponto de vista da reação álcali-sílica.

3.3 ENSAIOS NAS ARGAMASSAS

3.3.1 Composição e Fabrico dos Provetes

Como referido anteriormente, o presente trabalho centrou-se no ensaio de três tipos de argamassas: CTL, WWAj 10% e WWAj 20%. Para tal, calcularam-se as composições de água, areia e cimento

para um traço de 1:3:0,5, obtendo-se assim as quantidades de materiais necessários para cada amassadura expressas na tabela seguinte:

Tabela 10 – Quantidades dos constituintes das diversas argamassas

Material:	CTL	WWAj 10%	WWAj 20%
Cimento (g)	450	405	360
WWA (g)	-	45	90
Areia (g)	1350	1350	1350
Água (ml)	225	225	225
Razão água/ligante	0.5	0.5	0.5

O procedimento para fabrico dos provetes seguiu a norma NP EN 196-1. A amassadura foi realizada pelo misturador disponível no LEMC, com as dimensões, características e tempos especificados na mesma norma.

A compactação dos moldes foi feita no compactador do LEMC, como ilustra a figura 4, exceto para o ensaio de penetração acelerada de cloretos, que, para garantir uma melhor compactação foi realizada na mesa vibratória, durante cerca de 1 minuto, devido às dimensões e peso do molde em causa.



Figura 19 - Compactador do LEMC

Depois de moldar os respetivos moldes, estes permaneceram cerca de 24 ± 2 horas, de acordo com a norma NP EN 196-1, nos mesmos. Findo este tempo, os provetes foram, em geral, desmoldados e colocados na câmara de cura à temperatura de $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, mergulhados em água.

3.3.2 Avaliação da trabalhabilidade

O conceito de trabalhabilidade prende-se com a maior ou menor facilidade de execução do betão (transporte, colocação, compactação e acabamento) e a maior ou menor facilidade de segregação durante essas operações [9].

Esta avaliação da trabalhabilidade, seguiu o procedimento descrito nas normas ASTM C 190/90 e ASTM 230. O ensaio em causa consiste na colocação da argamassa normalizada num molde troncocónico em duas camadas, sendo cada uma delas compactada com um pilão normalizado, com 20 pancadas. De seguida, e após retirado molde troncocónico, submeteu-se a superfície com a argamassa a uma nova compactação, desta vez com 25 pancadas em 15 segundos. Posto isto, foram medidos 3 diâmetros de espalhamento, em 3 direções diferentes. A média aritmética destas 3 medições designa-se por diâmetro de espalhamento.

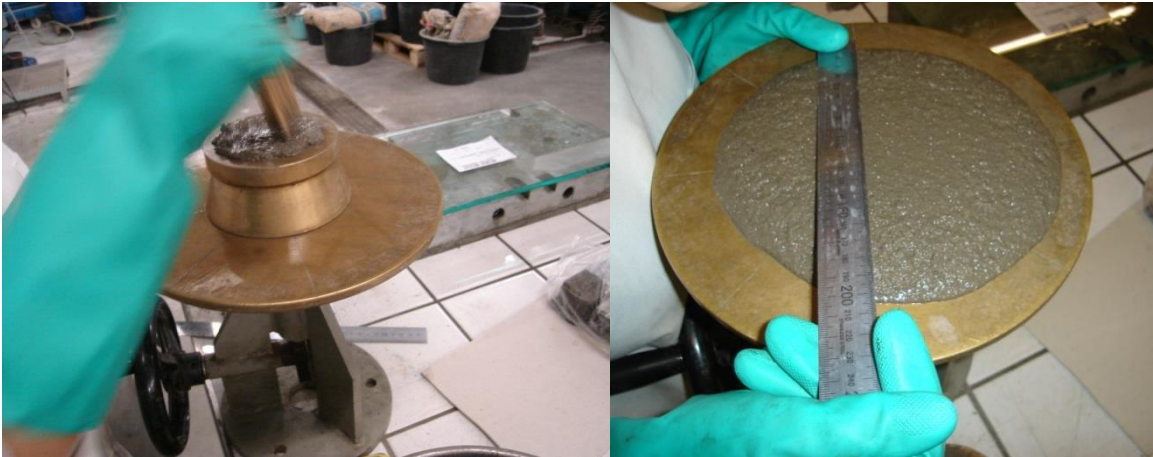


Figura 20 - Compactação e medição do diâmetro de espalhamento

Para avaliar o diâmetro de espalhamento nas argamassas de substituição, foi medida inicialmente na argamassa CTL para obter um valor padrão, considerando-se que as argamassas com substituição não podem diferir mais do que 10mm desse mesmo valor. Se tal acontecesse, seria necessário adicionar, por exemplo, superplastificante para assim controlar o diâmetro de espalhamento e mantê-lo dentro do intervalo de valores admissíveis. Para o caso em estudo e para as argamassas feitas, tal não aconteceu, uma vez que as argamassas de substituição se mantiveram dentro desse mesmo intervalo, considerando-se com trabalhabilidade semelhante à de CTL.

A Tabela 11 representa os diâmetros de espalhamento médio de todas as argamassas realizadas.

Tabela 11 - Diâmetros de espalhamento médio das argamassas

Argamassas	Diâmetros de espalhamento médio (mm)	Desvio padrão
CTL	202	2,55
WWAj 10%	200	4,99
WWAj 20%	197	3,02

3.3.3 Determinação do Tempo de Presa

O fenómeno de presa pode ser entendido como a rigidificação da pasta do cimento. Porém, o instante em que tal ocorre é difícil de determinar, uma vez que esta sofre diversas gradações até atingir o

estado sólido. Como tal, distinguem-se em geral dois períodos para o tempo de presa: início e fim. O primeiro é o tempo decorrido entre a amassadura e a perda da plasticidade, e o fim de presa é o tempo necessário para que a pasta adquira a firmeza suficiente para resistir a uma certa pressão [9].

Após a amassadura de água e cimento, existe um período inicial designado por período dormente ou de indução, em que a fluidez ou consistência da pasta se mantém mais ou menos constante e embora se verifique a perda gradual de fluidez, é possível recuperá-la se se reamassar a pasta.

No entanto, o período relativo ao início de presa é considerado em geral 2 a 4 horas depois da amassadura, a temperaturas normais, onde a mistura começa a ganhar rigidez muito rapidamente. Note-se que a resistência é ainda muito baixa e a rigidificação só começa após o fim de presa, que ocorre umas horas depois.

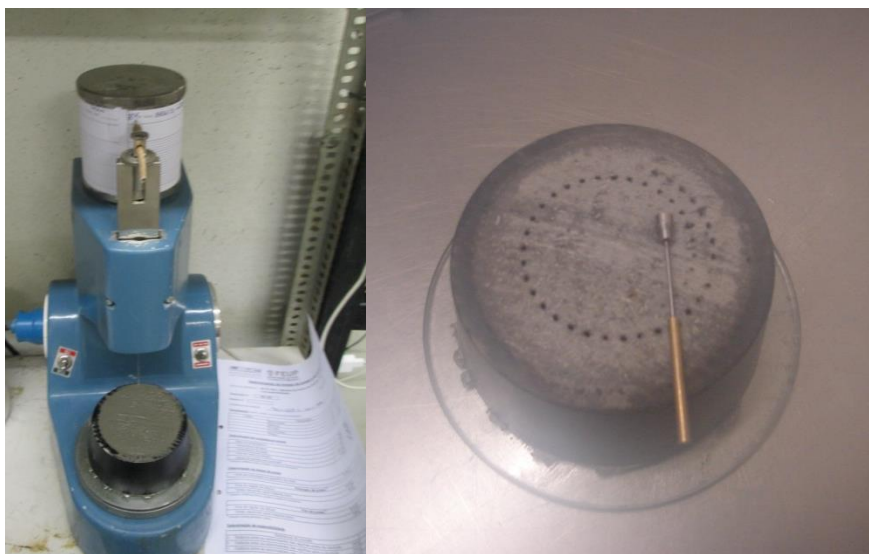


Figura 21 - Determinação do tempo de presa

A Tabela 12 ilustra os tempos de presa obtidos para o cimento usado no fabrico das argamassas para o presente estudo, e para o WWAj com 10% de substituição.

Tabela 12 - Tempo de início e fim de presa

Pastas	W/C	Consistência normal (mm)	Tempo de início de presa	Tempo de fim de presa
CTL	0.28	6	3h08min	4h23min
WWA 10%	0.28	4	3h29min	5h49min

3.3.4 Expansibilidade

A pasta de cimento, após a presa, não deve sofrer grandes variações de volume, principalmente expansões, uma vez que estas, se impedidas, podem causar a destruição do material. Este tipo de

expansões pode ser causado por hidratação retardada ou lenta (ou outras reações) de alguns compostos presentes na pasta como óxido de cálcio livre, óxido de magnésio e sulfato de cálcio [9]. O ensaio realizado permite detetar a expansibilidade do óxido de cálcio livre.

Os resultados obtidos para a expansibilidade encontram-se expressos na Tabela 13. Como se pode verificar, todos eles se encontram abaixo do recomendado pela normalização para ligantes (NP EN 197-1) de 10mm.

Tabela 13 - Expansibilidade das pastas em milímetros

Pastas	A	B	C	C-A
CTL	13	13	14	1
WWA 10%	13	14	14.5	1.5

As medidas A, B e C correspondem à distância entre as extremidades das agulhas do molde, cuja precisão exigida na sua medição é de 0,5mm. Neste caso a medição foi realizada com uma craveira, pelo que esta exigência foi cumprida.

3.3.5 Resistências Mecânicas

Os ensaios de resistências mecânicas são importantes para a caracterização do material do ponto de vista estrutural. As resistências mecânicas à flexão e compressão foram determinadas de acordo com a norma NP EN 196-1 (Instituto Português da Qualidade, 1996), tendo-se fabricado para o efeito três provetes de forma prismática, com as dimensões 40mm x 40mm x 160mm, para cada idade de ensaio: 7, 28, 90 e 180 dias (de referir que o ensaio aos 180 dias apenas será feito posteriormente ao término deste trabalho, uma vez que este tempo de cura é demasiado longo em comparação com o prazo de entrega do mesmo).

Os provetes são inicialmente ensaiados à flexão de modo a obter-se os meios prismas, seguindo-se o ensaio à compressão, como ilustra a Figura 22 e a Figura 23, respetivamente.



Figura 22 - Ensaio à flexão



Figura 23 - Ensaio à compressão

O resultado da resistência à compressão para cada grupo de argamassa obteve-se fazendo a média aritmética de seis resultados individuais, obtidos a partir das seis determinações, efetuadas numa série de três prismas. Para o resultado do ensaio de resistência à flexão calculou-se a média aritmética de três resultados individuais correspondentes aos três prismas.

O resultado obtido para este ensaio encontra-se na Figura 24 e Figura 25, para a resistência à flexão e à compressão, respetivamente. Todos os resultados numéricos para obtenção destes valores podem ser consultados no Anexo.

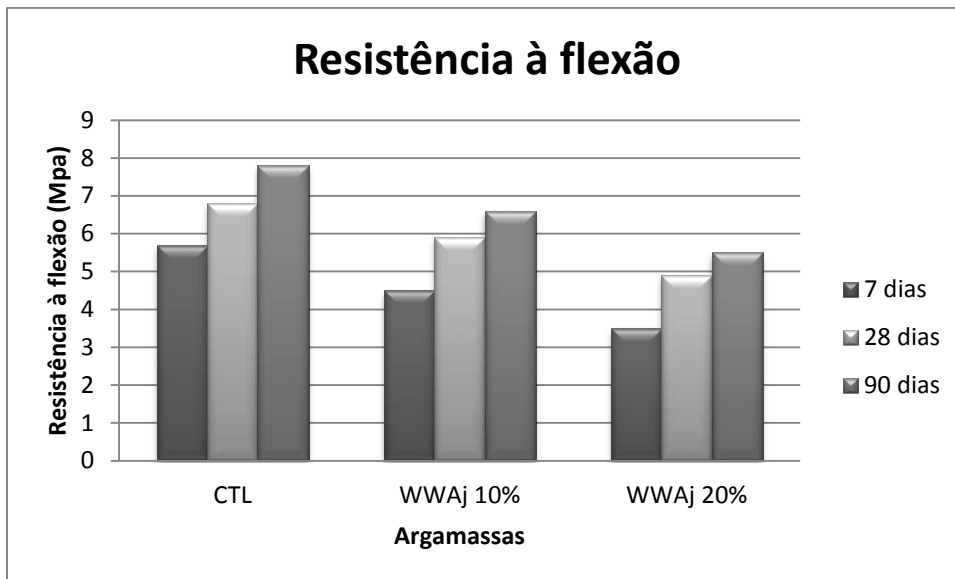


Figura 24 - Resistência à flexão nas argamassas aos 7, 28 e 90 dias

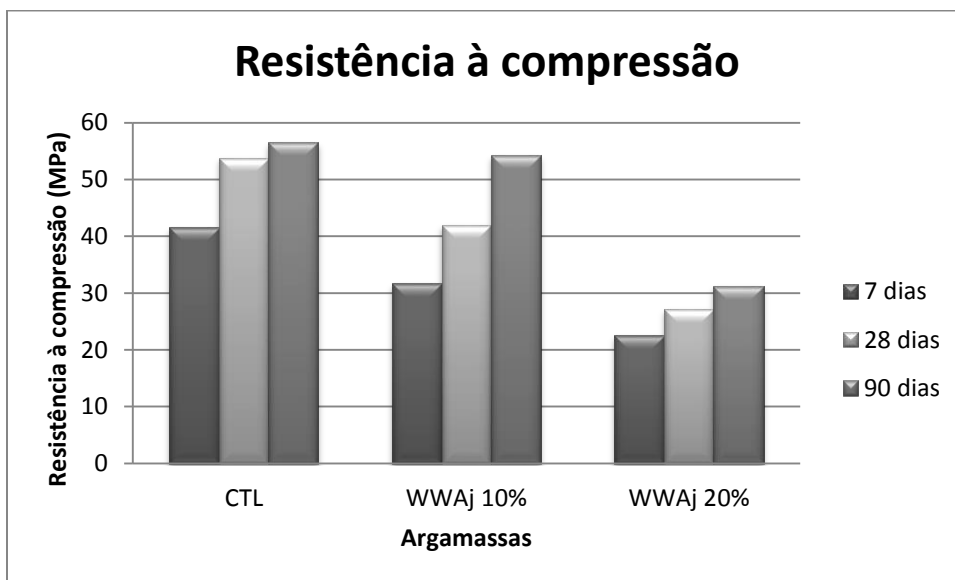


Figura 25 - Resistência à compressão nas argamassas aos 7, 28 e 90 dias

Como se pode verificar, a resistência à flexão é superior nas argamassas CTL em qualquer das idades de realização do ensaio, seguindo-se as argamassas WWAj 10% e por fim WWAj 20%.

No que diz respeito à resistência à compressão, as argamassas CTL são quem lidera, ainda que por uma margem curta aos 90 dias relativamente ao WWAj 10%. De notar que é nesta argamassa que se verifica o maior ganho de resistência, no período dos 28 aos 90 dias. As argamassas WWAj 20% são quem apresenta menores resistências para qualquer idade de realização do ensaio.

3.3.6 Carbonatação Acelerada

A determinação da resistência à carbonatação foi baseada na norma E-391. Foram analisados 3 provetes com dimensões 40x40x160mm de cada argamassa, à exceção do WWAj 20% em que apenas

foram analisados 2 provetes. A câmara apresenta uma humidade relativa (HR) de 65%, sendo a temperatura aproximadamente 20°C, com uma concentração de CO₂ de 5%, sendo estes parâmetros controlados por sensores localizados no interior da mesma. As amostras permaneceram em cura húmida cerca de 14 dias. Findo este tempo, os provetes foram colocados na câmara de fluência, com humidade relativa de 50% e temperatura de 20°C±2°C até aos 28 dias de idade. Após este período, os provetes foram armazenados na câmara de carbonatação acelerada com uma das faces 40x40mm assentes na base da câmara, faces estas que foram identificadas. Com o objetivo de avaliar a evolução da carbonatação foi-se medindo ao longo do tempo a profundidade carbonatada, usando o indicador de fenolftaleína. Para tal, e mediante o tempo previsto inicialmente para a realização de cada ensaio, cortou-se em cada provete, uma fatia de cerca de 1 cm de espessura, cuja face cortada foi borrifada com fenolftaleína. A aplicação da fenolftaleína conduz à apresentação cor rosa forte nas zonas isentas de carbonatação (pH elevado) mantendo-se incolor nas zonas que foram afetadas por esta (pH baixo).

Então, para levar a cabo este ensaio, e para uma melhor comparação numérica dos resultados da profundidade carbonatada, foi medida em todas as arestas de cada provete em três pontos distintos com a ajuda de uma craveira, seguindo-se o cálculo da média dessas profundidades para cada uma das argamassas. Este procedimento foi realizado primeiramente duas semanas após a sua colocação na câmara de carbonatação, e posteriormente todas as semanas.

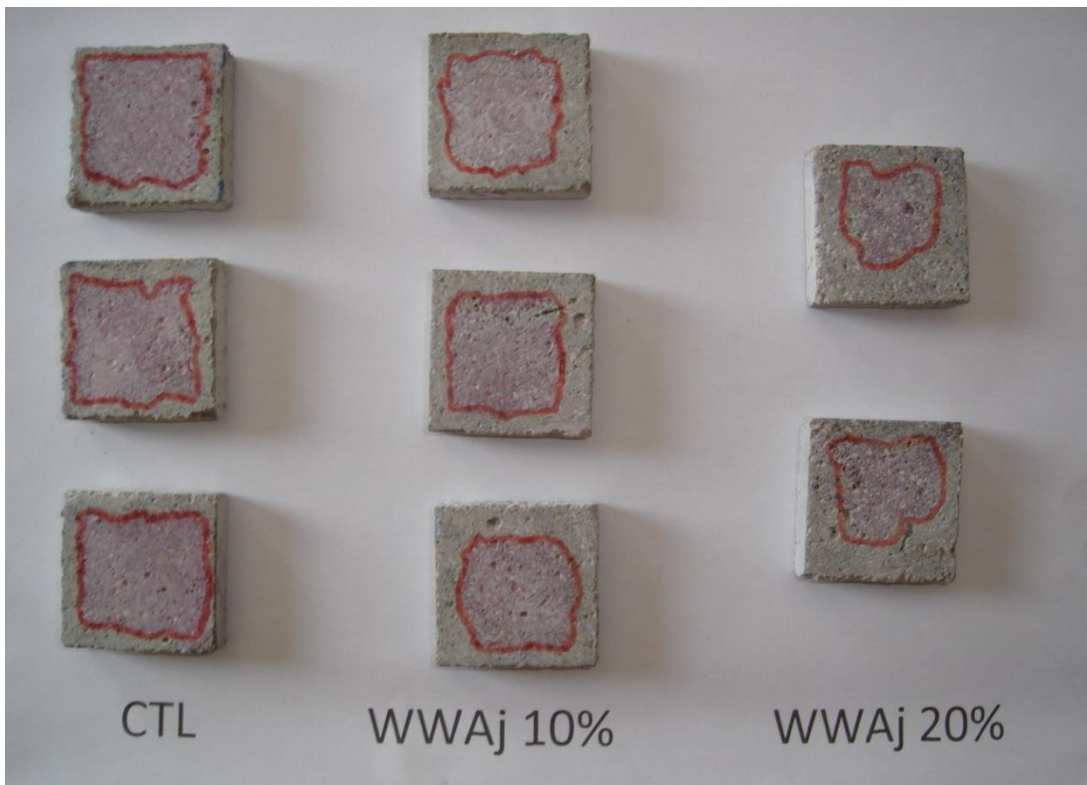


Figura 26 - Carbonatação ao fim de duas semanas na câmara de carbonatação

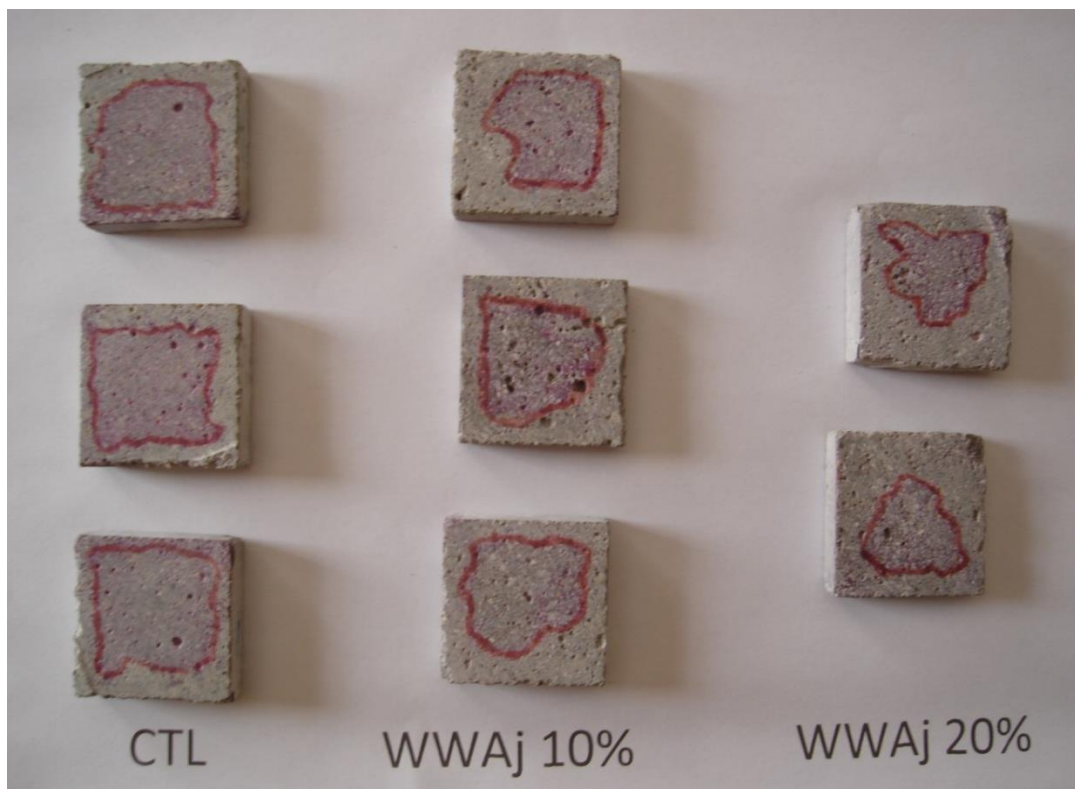


Figura 27 - Carbonatação ao fim de dez semanas na câmara de carbonatação (última medição realizada)

A Tabela 14 traduz os resultados das profundidades de carbonatação média das argamassas.

Tabela 14 - Profundidade de carbonatação média das argamassas (mm)

Semanas	CTL	WWA 10%	WWA 20%
2	2,24	4,01	5,93
3	2,39	4,15	6,25
4	2,75	4,29	6,59
5	3,04	4,44	6,97
6	3,25	4,69	7,41
7	3,55	5,01	7,94
8	3,79	5,39	8,49
9	3,88	5,67	8,86
10	4,04	5,95	9,12

A Figura 28 traduz a evolução da profundidade de carbonatação ao longo das 10 semanas, tendo como base os resultados da Tabela 14.

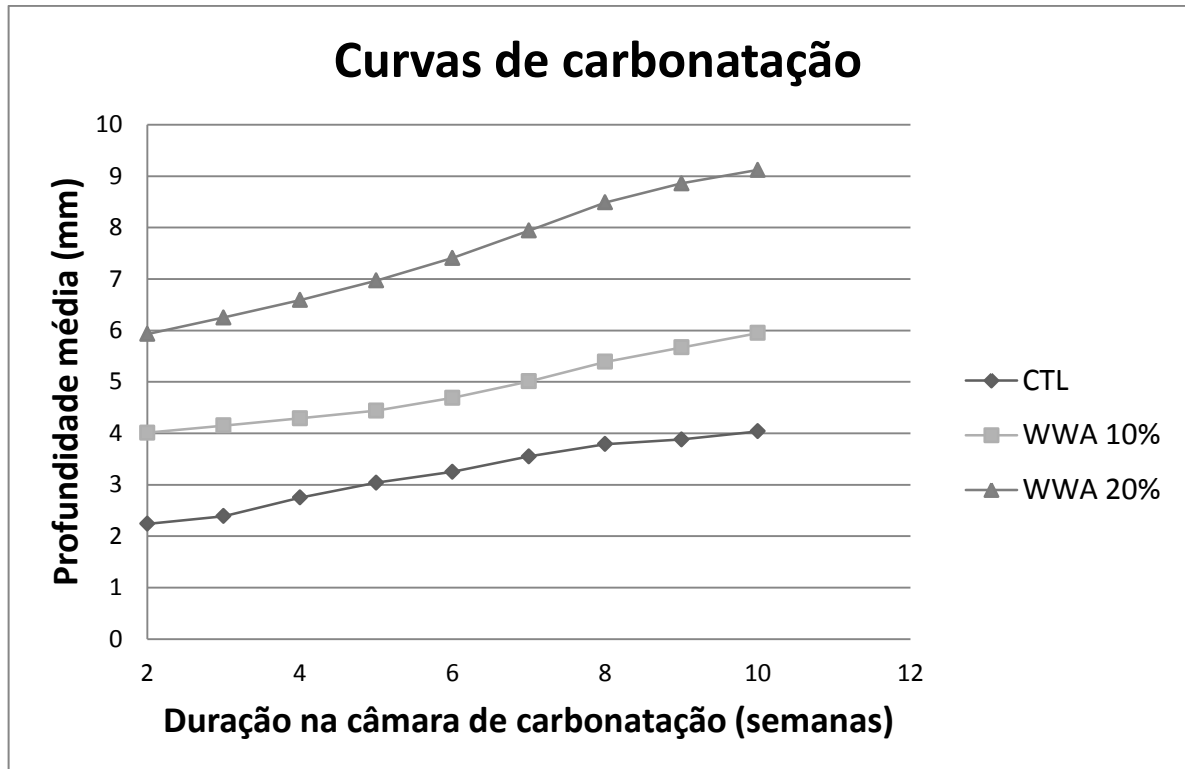


Figura 28 - Profundidade de carbonatação média das argamassas

3.3.7 Ensaios de Resistência à penetração de Cloretos

Para determinar a resistência à penetração de cloretos em argamassa com substituição parcial de cimento por WWAj, seguiu-se a especificação do LNEC E-463 para avaliar a penetração (acelerada) destes. Utilizaram-se 9 provetes cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 50 mm de altura: três provetes relativos a cada argamassa, CTL, WWAj 10% e WWAj 20% que foram moldados, de acordo com a norma NP EN 196-1, mas em moldes cilíndricos.

Os moldes foram previamente oleados apenas lateralmente na superfície. A compactação foi realizada pela mesa vibratória, com duração de um minuto. Decorridas 24 horas os provetes foram desmoldados e colocados em água na câmara húmida do LEMC até à realização do ensaio. A Figura 29 ilustra a compactação destes moldes.



Figura 29 - Compactação dos moldes na mesa vibratória

Conforme o preconizado na norma E-463, submeteu-se cada provete, entre as faces circulares (direção pela qual se dá a penetração dos cloretos) a um potencial elétrico externo, o que faz com que os iões cloreto externos (provenientes de uma solução de NaCl), inicialmente apenas em contacto com a superfície do provete, migrem para o interior do provete.

Na véspera da realização do ensaio os provetes foram retirados do seu local de acondicionamento, limpou-se o excesso de água e colocaram-se na câmara de vácuo a uma pressão de acordo com a especificação do LNEC durante três horas. Com a bomba de vácuo em funcionamento, procedeu-se ao enchimento do recipiente com uma solução saturada de hidróxido de cálcio, ficando todos os provetes imersos, permanecendo mais uma hora em vácuo. Terminado o tempo, desligou-se a bomba e os provetes ficaram imersos na mesma solução cerca de $18h \pm 2$ horas.

Findo este período, aplicou-se, com NaCl em contacto com uma das faces do provete, e uma solução de NaOH em contacto com a outra face do provete, um potencial elétrico, que forçou por migração, o transporte dos iões cloreto para o interior da argamassa. No caso corrente a voltagem aplicada foi de 20V e o tempo de ensaio foi de 24 horas para as argamassas de CTL e WWA 10%, e 25V com duração de 24 horas para a argamassa de WWA 20%, valores de acordo com as intensidades de corrente lidas inicialmente e segundo a especificação do LNEC.

Finalizado o processo de migração, os provetes foram abertos axialmente por compressão linear e pulverizaram-se as zonas de corte com uma solução de nitrato de prata para que se pudessem visualizar e medir as profundidades de penetração. Após ser perfeitamente visível esta profundidade, procedeu-se à sua medição de 10mm em 10mm, segundo o diâmetro do provete, deixando uma folga de 10mm em cada extremidade do provete., obtendo portanto sete medições para a profundidade.

No entanto, por razões apontadas ao deficiente funcionamento de uma das células que contém as soluções NaCl e NaOH, apenas dois dos provetes se puderam ensaiar e assim obter os devidos resultados. A comparação será feita, portanto, apenas entre dois provetes de cada uma das três argamassas, CTL, WWAj 10% e WWAj 20%.

O coeficiente de difusão em regime não estacionário é calculado com base na equação 2 (LNEC E-463):

$$D = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t} \left(x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(237+T)Lx_d}{U-2}} \right) \quad (2)$$

Na qual:

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

U é o valor absoluto da voltagem aplicada, em V;

T é o valor médio das temperaturas inicial e final na solução anódica, em °C;

L é a espessura do provete, em mm;

x_d é o valor médio da profundidade de penetração, em mm;

t é a duração do ensaio, em horas.

Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 15 e na Figura 30. Os coeficientes de difusão de cloretos não diferem muito entre si, no entanto, o WWAj 10% é o que assume menor valor.

Tabela 15 - Coeficiente de difusão de cloretos

Provete	Dns ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	Dns _{médio} ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	Desvio padrão
CTL - 1	16,24	15,13	1,576
CTL - 2	14,01		
WWAj 10% - 1	14,47	14,82	0,503
WWAj 10% - 2	15,18		
WWAj 20% - 1	14,82	15,96	1,624
WWAj 20% - 2	17,11		

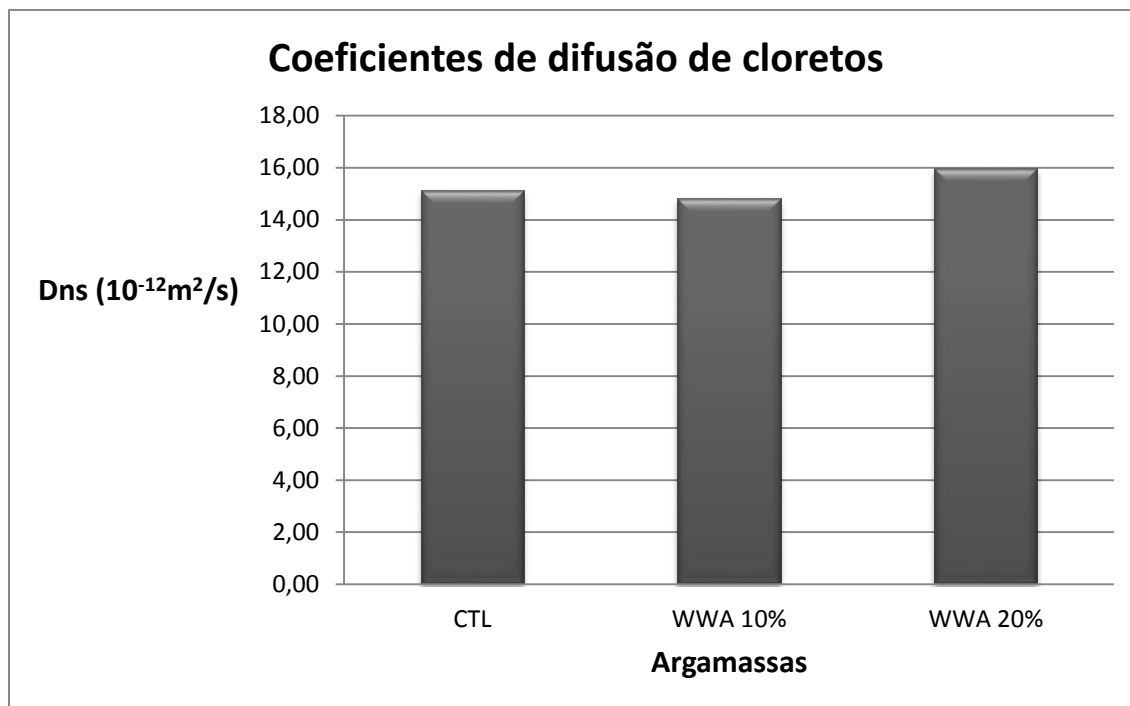


Figura 30 - Coeficiente de difusão de cloretos (média de 2 provetes para cada argamassa)

3.3.8 Reação Álcali-Sílica (ASR)

Por forma a avaliar a reação álcali-sílica da substituição de cimento por cinzas de resíduos de madeira, seguiu-se o descrito na norma americana ASTM 1567, porém com algumas alterações, nomeadamente na proporção de materiais a usar na amassadura. Para tal, em vez das proporções serem de 2,25 de areia e 0,47 de água em relação ao cimento, usaram-se as proporções descritas na NP EN 196-3, isto é, 3 e 0,5, respetivamente. Por outro lado, a areia usada também foi diferente, em termos granulométricos, da preconizada na mesma norma americana. Contudo, mesmo com as referidas alterações, as diferenças nos resultados deste ensaio, por si só, não serão significativas (segundo um especialista do LNEC) e na realidade o que se pretende é comparar os resultados entre si.

A amassadura dos provetes baseou-se na norma NP EN 196-1. Seguiu-se o procedimento de medição da trabalhabilidade e moldagem dos provetes. Os moldes dos provetes foram previamente untados com óleo descofrante, ainda sem os pernos metálicos, por forma a evitar a contaminação destes. Os moldes foram preenchidos por argamassa em duas camadas sucessivas. A compactação foi realizada manualmente com o pilão normalizado após preenchimento de cada camada, com cuidado especial nos cantos do mesmo, e também na zona periférica dos pernos metálicos, para que estes ficassem bem envolvidos e com uma camada o mais homogénea possível de argamassa. Após rasar os provetes, estes ficaram na câmara de cura durante 24 ± 2 horas.

Findo este tempo, os provetes foram desmoldados, mas em cada um dos três moldes (CTL, WWAj 10% e WWAj 20%), um dos provetes partiu-se, o que poderá ser justificado pela falta de óleo descofrante nos moldes, e que devido à esbelteza destes provetes, foi propícia a sua fratura. Assim, no dia seguinte, procedeu-se ao fabrico de novas amassaduras e moldagem dos provetes. O procedimento de cura e desmoldagem foi em tudo semelhante aos anteriores, sendo que no final, ficaram para realização do ensaio em causa, 3 provetes para cada amostra, em que do primeiro para os restantes dois provetes, há um desfasamento de 1 dia de idade.

De referir ainda que, após desmoldagem dos provetes, estes foram imediatamente identificados e numeradas as suas faces, para que a medição da expansão em cada uma das 4 faces fosse realizada sempre na mesma posição e sequência.

Colocaram-se os provetes de cada amostra na respetiva caixa com água suficiente para que ficassem imersos, como ilustrado na Figura 31. Fecharam-se devidamente as caixas e colocaram-se em estufa a $80\pm 2.0^{\circ}\text{C}$, durante 24 horas.



Figura 31 - Provetes imersos em água

Findo este período, os provetes foram retirados da água, e secaram-se as suas faces com um pano húmido e com particular atenção aos pernos metálicos para que estivessem bem secos por forma a não interferir com nenhuma das medições. O processo de secagem e leitura dos provetes era feito o mais rapidamente possível, para que os provetes estivessem o menos tempo possível emersos. Depois da leitura, o provete medido ficava em espera na mesma toalha enquanto se faziam as leituras dos restantes. Esta foi, portanto, a leitura zero (L_0) de cada um dos provetes. Findo este processo, os provetes foram colocados numa solução de hidróxido de sódio durante os 28 dias seguintes e armazenados em estufa a $80\pm 2.0^{\circ}\text{C}$. As leituras posteriores foram feitas de 2 em 2 dias (excetuando aos fins-de-semana) até aos 14 dias, prolongando-se até aos 28 dias.

No processo inicial de cada leitura em cada um dos provetes, a leitura era zerada após a leitura inicial através de uma barra invar. Este processo repetiu-se para cada amostra e para cada dia de medição da expansão. A Figura 32 ilustra um exemplo da medição da expansão do ensaio em causa.



Figura 32 - Medição da expansão de um dos provetes

Os resultados do ensaio foram obtidos da seguinte forma:

- Efetuaram-se as medições das leituras em cada uma das faces do provete, depois de zerar o valor da medição face ao valor da barra invar – L_i ;
- Calculou-se a média aritmética do comprimento real em cada dia de medição e de cada provete.

$$Lx = \frac{\sum_{i=1}^4 L_i}{4} \quad (3)$$

- A expansão é a diferença entre o comprimento médio em cada dia de medição e a leitura inicial, L_0 , em percentagem

$$e = \frac{Lx - L_0}{250} * 100\% \quad (4)$$

As expansões obtidas ao longo do tempo encontram-se representadas graficamente nas figuras seguintes e os valores médios das expansões dos provetes de cada argamassa aos 14 dias encontram-se na Tabela 16.

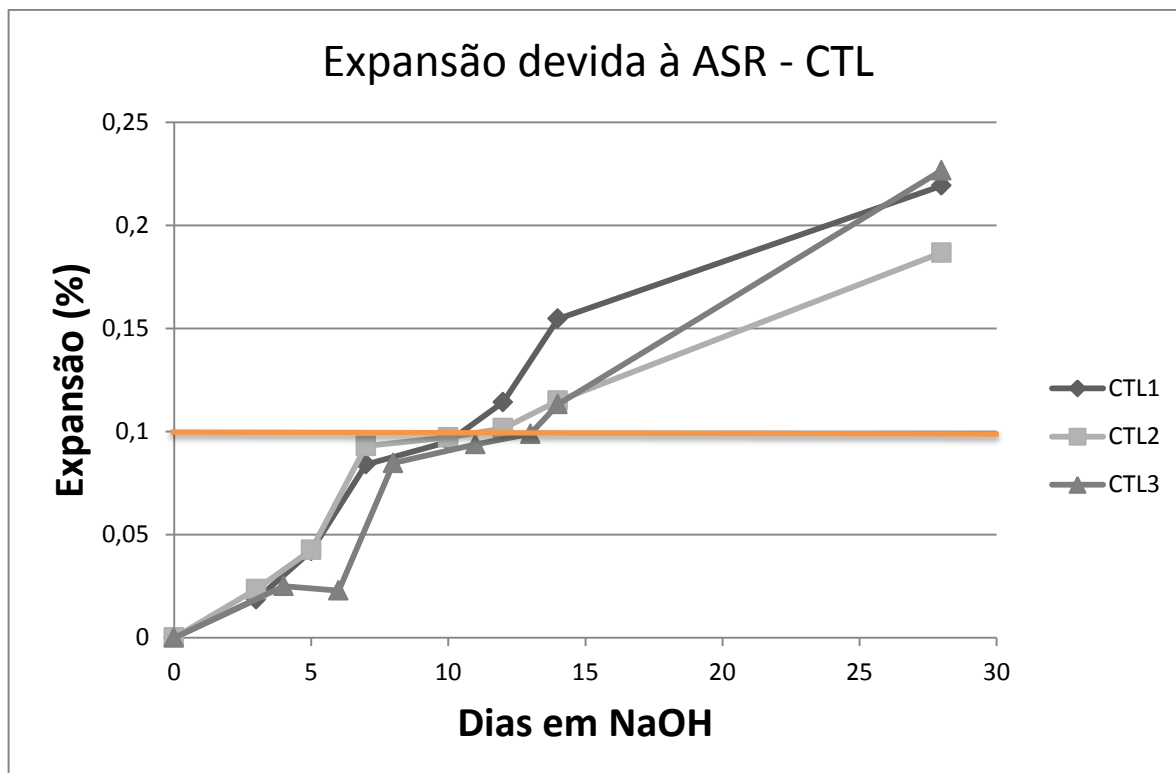


Figura 33 - Expansão devida à reação álcali-silica (argamassa CTL)

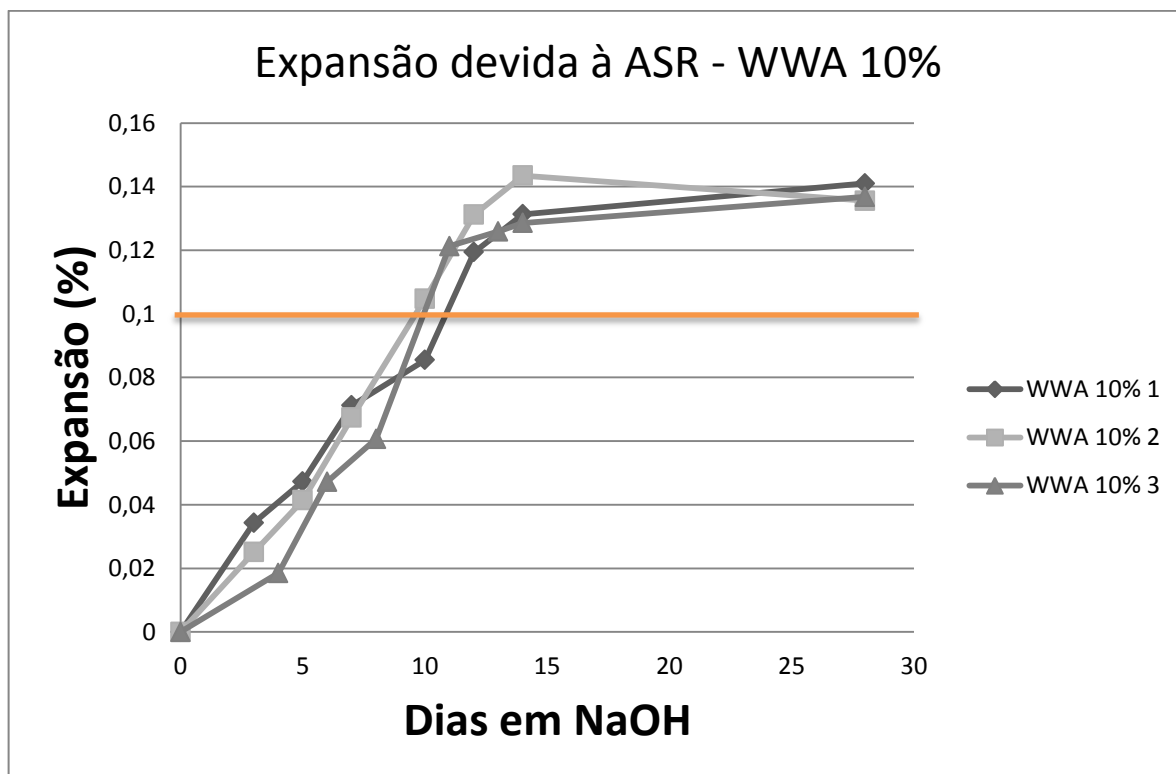


Figura 34 - Expansão devida à reação álcali-silica (argamassa WWA 10%)

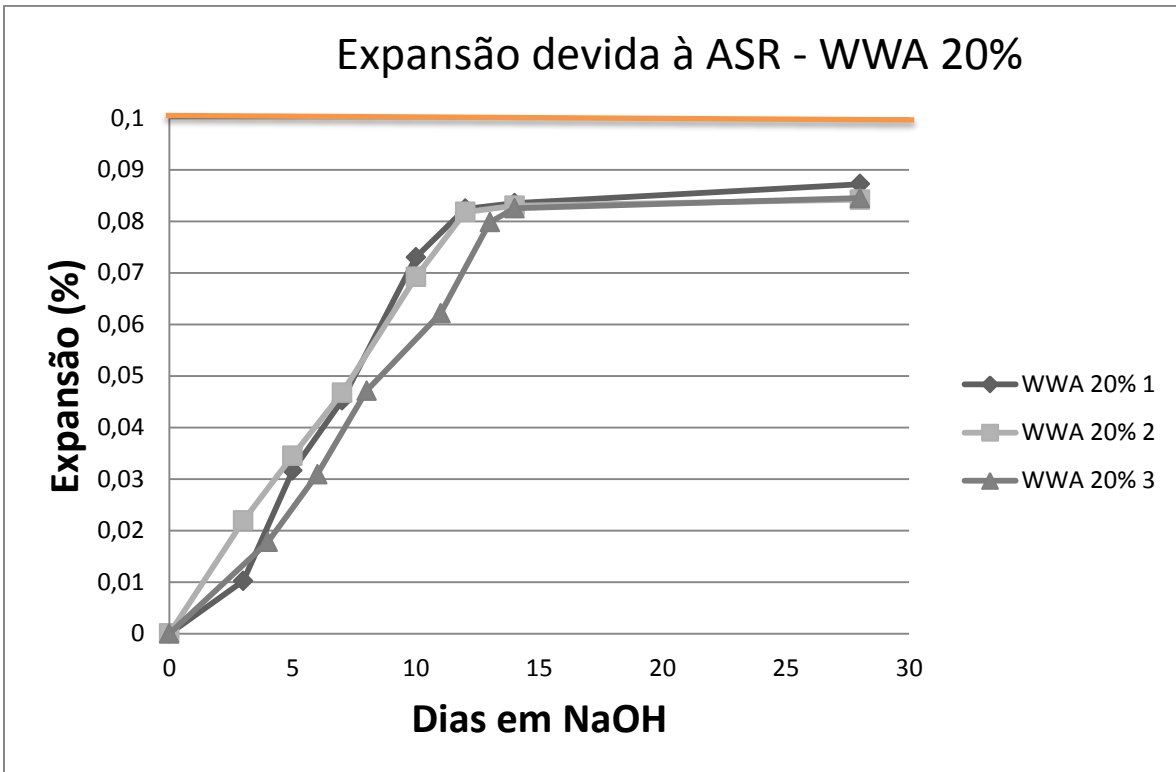


Figura 35 - Expansão devida à reação álcali-silica (argamassa WWA 20%)

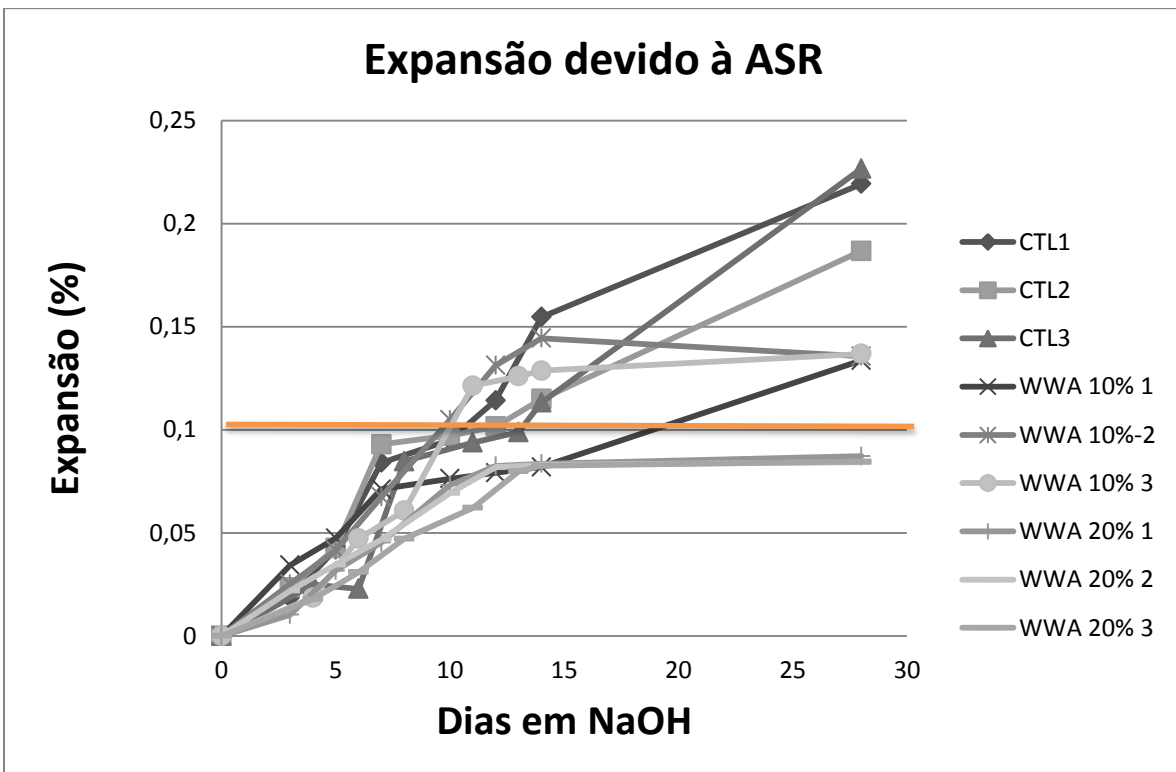


Figura 36 – Expansão devida à reação álcali-silica dos três tipos de argamassas em estudo (CTL, WWAj 10% e WWAj 20%)

Tabela 16 - Expansão média ao fim de 14 dias

Provetes	E _{14DIAS} (%)	E _{MÉDIA} (%)	DESVIO PADRÃO
CTL - 1	0,16		
CTL - 2	0,12	0,13	0,03
CTL - 3	0,11		
WWA 10% - 1	0,13		
WWA 10% - 2	0,14	0,13	0,01
WWA 10% - 3	0,13		
WWA 20% - 1	0,08		
WWA 20% - 2	0,08	0,08	0,00
WWA 20% - 3	0,08		

3.3.9 Ataque Por Sulfatos

Por forma a avaliar as consequências causadas por ataque por sulfatos em argamassas com adição de cinzas de resíduos de madeira, seguiu-se o preconizado pela especificação do LNEC E-462.

Como tal, realizaram-se 3 argamassas (CTL, WWAj 10% e WWAj 20%), seguindo a norma NP EN 196-1. Posto isto, seguiu-se a habitual medição da trabalhabilidade e moldagem dos provetes.

Para a compactação destes provetes, como indicado na especificação do LNEC, utilizou-se o pilão normalizado em 10 pancadas distribuídas por cada provete, garantindo a compactação dos mesmos, com especial atenção na zona dos pernos metálicos para que estes ficassem completamente envolvidos por argamassa, sob pena de se soltarem dos provetes ou de certa forma interferirem com a medição das expansões.

Os moldes a serem utilizados neste ensaio, tal como no ensaio anterior, foram previamente untados com óleo descofrante, e só depois colocados os pernos, por forma a evitar a contaminação destes com o mesmo óleo.

Os provetes ficaram nos moldes durante um período de 24 ± 1 h. Findo este período, os provetes foram desmoldados e como em cada um dos moldes existiam 6 provetes, numeraram-se os mesmos de 1 a 6, bem como cada uma das faces para que a medição fosse realizada sempre na mesma posição e sequência, sendo colocados de seguida numa solução de hidróxido de cálcio durante 28 dias.

Após este período, foi retirado um provete de cada vez da solução para medição da correspondente expansão, depois de limpar devidamente os pernos metálicos com um pano húmido por forma a não interferir, de alguma forma, com as medições. De seguida, os provetes 1, 3 e 5 foram colocados de novo na solução de hidróxido de cálcio, e os provetes 2,4 e 6 foram mudados para uma solução de sulfato de sódio.

As medições seguintes efetuaram-se de duas em duas semanas até perfazerem 8 semanas. De referir ainda que sempre que se efetuavam medições nos provetes de número par, portanto os colocados em solução de sulfato de sódio, esta foi renovada, como estabelece a especificação.

A figura seguinte ilustra a evolução da expansão devida ao ataque por sulfatos. Esta expansão resulta da diferença entre as expansões médias dos provetes pares e ímpares de cada argamassa, isto é, dos provetes que estiveram imersos em sulfato de sódio e hidróxido de cálcio, respetivamente.

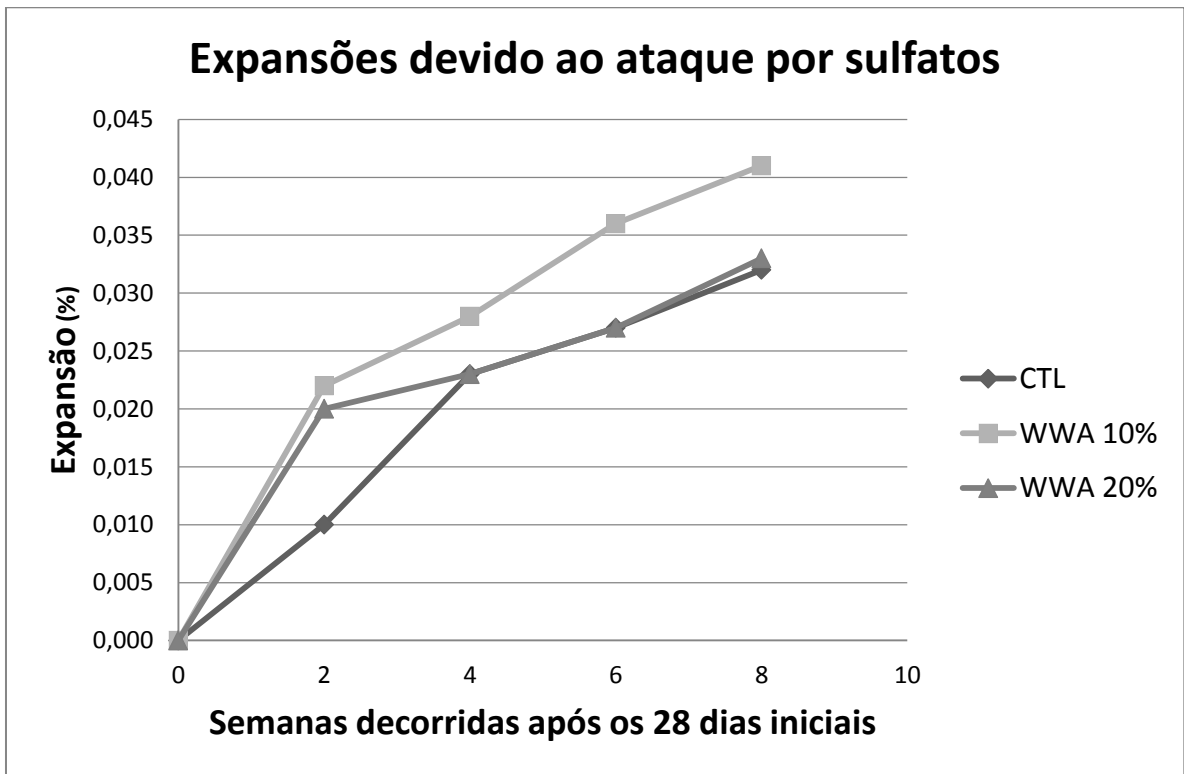


Figura 37 - Expansão média devida ao ataque por sulfatos

Na Tabela 17 estão representados os valores das expansões que serviram como base a elaboração da sua evolução ao longo do tempo em que foram estudados. Apenas foi possível avaliar a expansão causada por sulfatos nas primeiras 8 semanas, sendo que o ensaio só é dado como terminado às 26 semanas.

Tabela 17 – Expansões devidas ao ataque por sulfatos

Semanas	CTL	WWAj 10%	WWAj 20%
0	0,000	0,000	0,000
2	0,010	0,022	0,020
4	0,023	0,028	0,023
6	0,027	0,036	0,027
8	0,032	0,041	0,033

4

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1.1 Considerações Gerais

No capítulo anterior procurou-se estudar a viabilidade da substituição parcial de cimento por cinzas de resíduos de madeira na produção de argamassas em termos de durabilidade e resistências mecânicas, com o objetivo de prever o seu comportamento em betão. Para tal, realizaram-se ensaios e obtiveram-se resultados que serão neste capítulo alvo de análise e discussão.

Por forma a melhor compreender a maior ou menor viabilidade da utilização destas cinzas, para cada análise aqui discutida, serão comparados os resultados obtidos para o WWAj, 10% e 20%, com os obtidos para o CTL.

Além disso os resultados também serão, se possível comparados e enquadrados com os resultados obtidos por outros investigadores em estudos cujo objetivo seja semelhante ao objetivo do presente trabalho. Obviamente ressalva-se que esta comparação e enquadramento estão só por si limitados, uma vez que os materiais, ensaios e mesmo algumas normas usadas, variam de trabalho para trabalho.

4.1.2 Avaliação de Desempenho

Para os diferentes tipos de argamassa WWAj, foi calculado o desempenho de cada uma das propriedades estudadas em relação aos provetes CTL, tendo-se utilizado para tal a seguinte equação:

$$Desempenho = \left[\frac{X_{wwa} - X}{X} \right] * 100\% \quad (4)$$

Em que:

X_{wwa} – Resultado da propriedade X para a argamassa com substituição de cimento por WWAj;

X – Resultado da propriedade X para a argamassa de controlo (CTL) ou resultado da propriedade X no caso em que o desempenho do WWAj é feito em comparação com valores máximos normativos.

Um sinal negativo ou positivo foi atribuído a cada valor de desempenho, conforme este mostrou ter melhor ou pior desempenho que a propriedade X, respetivamente.

4.1.3 Composição e análise Química

As análises químicas realizadas permitem saber se estas obedecem aos requisitos químicos constantes na norma NP 4220, para se poder utilizar o WWAj como pozolana em betões. Estes resultados e requisitos estão expressos na Tabela 18.

Tabela 18 – Requisitos e análise química do WWA, segundo NP 4220

Propriedades	Análise química do WWAj	Requisitos segundo NP 4220
Perda ao fogo (%)	-9,81	≤ 9
Cloretos (%)	+0,015	≤ 0,10
SO ₃ (%)	+0,3	≤ 3,0
Álcalis (NaOeq) (%)	+3,70	≤ 5
CaO total (%) ⁽¹⁾	+5,54	≤ 10
Pozolanidade	(à espera do resultado)	Satisfaz ensaio

⁽¹⁾ A norma NP 4220 prevê que se o teor de óxido de cálcio total for inferior a 10%, considera-se satisfeito o teor de óxido de cálcio reativo.

No subcapítulo 2.2.1.1 referente à composição química do WWAj, foi sugerida uma gama de valores em que os compostos químicos obtidos por diversos investigadores se inserem. Tendo como base essa gama de valores e os valores da composição química obtidos neste trabalho, expressos em 3.2.2, Tabela 7, podemos concluir que estes se enquadram naqueles, com exceção do composto TiO₂, que difere ligeiramente.

Obviamente neste campo convém salvaguardar que esta gama de valores é muito vasta em termos de resultados, isto é, apresenta intervalos muito grandes de valores possíveis em termos de composição química.

Tendo como base a Tabela 1 de *Vassilev et al* [21], não faz sentido enquadrar o WWAj num ou vários tipos de cinzas de biomassa, uma vez que o material de estudo neste trabalho, resulta do aproveitamento de material madeireiro muito vasto, nomeadamente de desmatamento e produtos de baixa qualidade, que abarcam um significativo número de tipos de madeira, sendo apenas referidos a casca de pinho e pinheiro uma vez que a madeira destas árvores é considerada a de melhor qualidade para a produção de pellets.

O valor obtido da perda ao rubro, 9,81, revela ainda que existe uma grande quantidade de carbono por queimar. Isto poderá indicar insuficiência no tempo de queima, ou ainda deficiente rendimento nas fornalhas usadas para a produção do WWAj. Note-se que o processo de queima tem como objetivo maximizar a produção de energia a partir de um resíduo e não, pelo menos presentemente, também produzir cinza com propriedades para substituir parcialmente cimento em betão.

4.1.4 Propriedades físicas

Apresentam-se na Tabela 19 (repetição da tabela 8) algumas propriedades físicas do WWAj e do cimento CEM I que foi usado no fabrico das argamassas para o presente trabalho.

Tabela 19 - Comparação das dimensões características do cimento usado e do WWAj

Amostra	d(0.1) (µm)	d(0.5) (µm)	d(0.9) (µm)
CEM I 42.5R	0,976	10,14	32,53
WWAj	1,891	8,715	30,33

Pela análise das curvas granulométricas das amostras e dimensões características, podemos afirmar que estas são semelhantes em termos de dimensões.

4.1.5 Determinação do Tempo de Presa

A determinação do tempo de presa foi apenas realizada para o WWAj 10% e CTL, como já foi referido em 3.3.3. No entanto, os tempos de início e fim de presa foram consideravelmente diferentes nas duas argamassas. A norma NP 4220, relativamente a cimentos pozolânicos, estabelece apenas um valor mínimo para o tempo de início de presa, sendo que este não deve exceder 120 min após o início de presa de um cimento sem adições. Assim sendo, o WWAj 10% cumpre este requisito, uma vez que difere em 21 minutos (3 horas e 29 min) do valor obtido para CTL (3 horas e 08 minutos).

4.1.6 Expansibilidade

Relativamente à expansibilidade, o WWA j10% provou ser da ordem de grandeza da amostra de CTL analisada. Contudo, e referindo o especificado na norma NP 4220 cuja expansibilidade limite é de 10mm quer para cimentos sem adições, quer para cimentos pozolânicos, ambos situam as suas expansibilidades bem abaixo deste valor máximo.

4.1.7 Trabalhabilidade

O uso de WWAj como adição em cimento no fabrico de argamassas mostrou interferir. Pela análise da Tabela 20, podemos verificar que o WWAj diminui a trabalhabilidade das argamassas. Esta tendência aumenta quando aumenta a percentagem de substituição. Na mesma tabela estão representadas as médias de todos os diâmetros de espalhamento medidos em todas as argamassas realizadas para o presente trabalho.

Tabela 20 – Diâmetros de espalhamento médio das argamassas (mm)

Argamassas	Diâmetros de espalhamento médio (mm)	Desvio padrão	Desempenho (%)
CTL	202	2,55	-
WWAj 10%	200	4,99	-1
WWAj 20%	197	3,02	-3

4.1.8 Resistências Mecânicas

Na análise à resistência à compressão, as argamassas com substituição, a 10% e 20%, não atingiram os valores do CTL. No entanto, a argamassa com WWAj 10% obteve um crescimento acentuado de resistência entre os 28 e os 90 dias. A Tabela 21 ilustra o desempenho e os valores das resistências à compressão dos três tipos de argamassas.

Tabela 21 – Resistências à compressão e correspondente desempenho

Idade do ensaio/Desempenho	CTL	WWAj 10%	WWAj 20%
R7	41,6	31,7	22,5
Desempenho	-	-24%	-46%
R28	53,8	42,0	27,2
Desempenho	-	-22%	-49%
R90	56,5	54,3	31,2
Desempenho	-	-4%	-45%

Por outro lado, na resistência à flexão, a tendência manteve-se. O CTL obteve os maiores valores de resistência para qualquer das idades de ensaio, apesar de esta diferença diminuir com o tempo para o WWAj 10%, como ilustra a Tabela 22.

Tabela 22 - Resistências à flexão e correspondente desempenho

Idade do ensaio/Desempenho	CTL	WWAj 10%	WWAj 20%
R7	5,7	4,5	3,5
Desempenho	-	-21%	-39%
R28	6,8	5,9	4,9
Desempenho	-	-13%	-28%
R90	7,8	6,6	5,5
Desempenho	-	-15%	-30%

Em termos gerais para os valores obtidos da resistência à compressão neste trabalho, estes estão de acordo com o referido por *Elinwa e Mahmood* [19], *Udoeyo e Dashibil* [15] e *Elinwa e Ekeh* [16] onde referem que a incorporação do WWA como adição provou diminuir a resistência à compressão das argamassas. No caso do presente trabalho, ao substituir cimento por WWAj e perante a observação feita no MEV das matrizes cimentícias das três amostras em estudo (Figura 38 e Figura 39) é visível, especialmente para a substituição a 20%, a formação de poros no interior da mesma matriz. Esta poderá ser uma característica que também justifica os baixos resultados da resistência mecânica obtida.

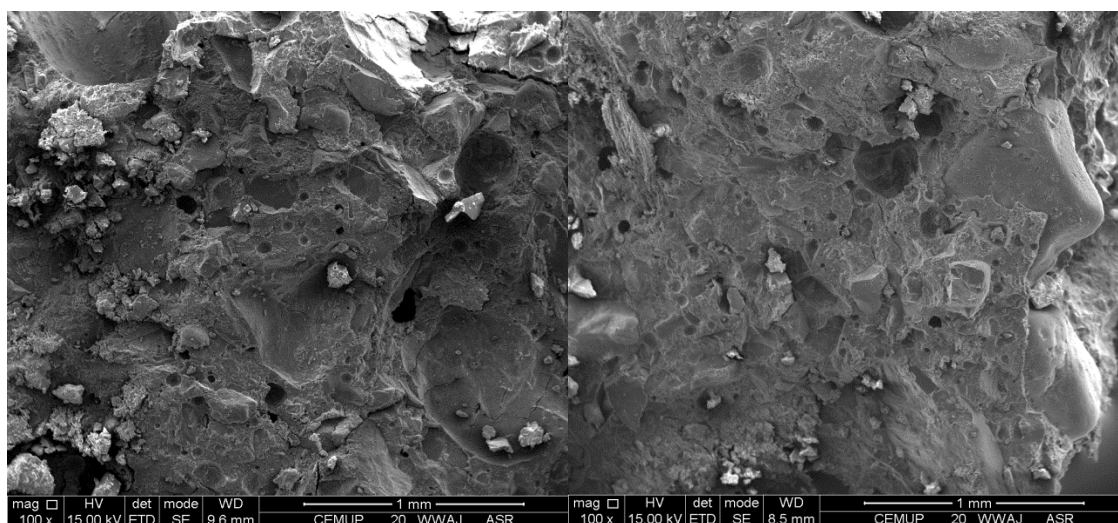


Figura 38 – Poros na matriz cimentícia das argamassas de WWAj 20%

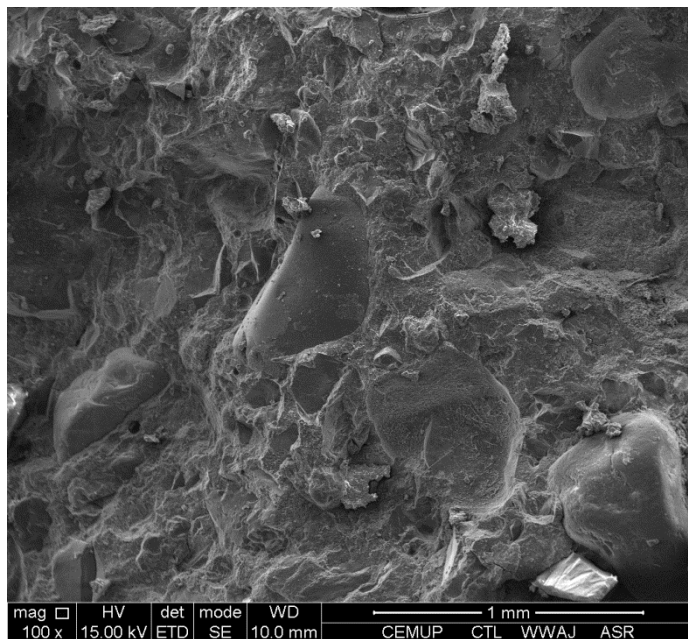


Figura 39 – Matriz cimentícia da argamassa de CTL

No entanto, pela análise do desempenho neste ensaio (Tabela 21), para a percentagem de 10% e para períodos de cura superiores a 28 dias, permite afirmar que quanto maior o tempo de cura, há um grande ganho de resistência do WWAj 10% face ao CTL. Será portanto do maior interesse ensaiar os provetes em períodos de cura mais elevado, como 180 dias e 365 dias, por exemplo, por forma a comprovar esta tendência.

Assim sendo e com o referido anteriormente, poderá ser verificado o que os autores *Cheah e Ramli* [23] concluíram: a incorporação de WWAj como adição, para períodos de cura mais longos, tende a uma convergência dos valores de resistência à compressão entre o CTL e as argamassas de substituição até 15% da massa total de ligante.

4.1.9 Carbonatação Acelerada

O efeito da carbonatação nos provetes com argamassa contendo WWAj foi notório. A Figura 26 e a Figura 27 ilustram claramente esse avanço da frente carbonatada, especialmente na substituição a 20%, bem como os resultados e respetivo desempenho expressos na tabela seguinte.

Tabela 23 – Carbonatações médias e correspondente desempenho

Idade do ensaio/Desempenho	CTL	WWAj 10%	WWAj 20%
Semana 5	3,04	4,44	6,97
Desempenho	-	-46%	-129%
Semana 10	4,04	5,95	9,12
Desempenho	-	-47%	-126%

A Tabela 23 foi desenvolvida considerando apenas estas duas semanas como referência, isto é, a semana intermédia e a semana final (5 e 10, respetivamente). Observa-se que o desempenho se manteve da 5ª para a 10ª semana sendo que WWAj 20% apresentou sempre uma carbonatação muito mais elevada que WWAj 10%.

Assim estes resultados estão de acordo com os alcançados por *Sousa Coutinho e Garcia*[28] e *Cheah e Ramli* [23] que confirmam estas conclusões, embora os tempos de permanência na câmara de carbonatação sejam diferentes, isto é, 5 meses e 3 meses, respetivamente.

Cheah e Ramli [23] confirmam que as argamassas que contêm WWAj elevam as profundidades médias de carbonatação, face ao CTL.

Na realidade verifica-se que os resultados encontrados para as cinzas de madeira no trabalho presente, à semelhança de outros estudos com pozolanas e com resíduos semelhantes não pozolânicos, são sempre piores do que para as argamassas de controlo. De maneira geral e para os resíduos com características pozolânicas é de prever o aumento da carbonatação pois se a permeabilidade da rede porosa for semelhante na situação em que está presente a pozolana comparando com argamassa de controlo, sem pozolana, esta terá consumido hidróxido de cálcio e portanto reduzido o seu teor para se combinar com o CO₂ penetrante, permitindo o avanço da frente de carbonatação. Evidentemente que quando a pozolana é muito fina, os produtos de hidratação são capazes de preencher uma grande quantidade de poros, comparando com a argamassa de controlo sem pozolana e o efeito “fíler” pode-se sobrepor, dificultando o avanço da frente de carbonatação mesmo com um reduzido teor de hidróxido de cálcio para reagir.

4.1.10 Penetração Acelerada de Cloretos

Para o ensaio da penetração acelerada de cloretos, e por forma a ter um meio de classificação relativamente à resistência que as argamassas em estudo apresentaram, utilizou-se a classificação sugerida por *Nilsson et al* [51] para betões, baseada no resultado do coeficiente de difusão de cloretos em regime não estacionário (segundo a especificação LNEC E-463) como ilustra a tabela seguinte.

Tabela 24 - Classe de resistência à penetração de cloretos no betão (*Nilsson et al* [51])

Coeficiente de difusão em estado não estacionário, Dns	Classe de resistência à penetração de cloretos
$Dns \geq 15 \cdot 10^{-12} m^2/s$	Baixa
$10 \cdot 10^{-12} < Dns < 15 \cdot 10^{-12} m^2/s$	Moderada
$5 \cdot 10^{-12} < Dns < 10 \cdot 10^{-12} m^2/s$	Elevada
$2,5 \cdot 10^{-12} < Dns < 5 \cdot 10^{-12} m^2/s$	Muito elevada
$Dns \leq 2,5 \cdot 10^{-12} m^2/s$	Extremamente elevada

Note-se que esta classificação é para betões. Utilizando os resultados das argamassas, em princípio estar-se-á do lado da “segurança” uma vez que desprezando o efeito interface argamassa/agregado, os valores dos coeficientes de difusão em betões correspondentes aquelas argamassas, apresentarão

valores menores, e isto porque os agregados, se bem graduados, constituirão obstáculos no meio da argamassa para a progressão dos cloretos.

Os resultados encontram-se na tabela seguinte, e indicam que o WWAj 20% foi de facto o mais sensível ao ataque, ainda que por uma pequena margem face ao CTL. No ensaio, o resultado mais favorável foi o do WWAj 10%, resultado este que permitiu classificar esta argamassa como de moderada relativamente à resistência à penetração de cloretos, com as reservas apresentadas.

Tabela 25 - Coeficientes de penetração de cloretos em regime não estacionário e respetivo desempenho

Provete	$Dns_{\text{médio}} (10^{-12} \text{m}^2/\text{s})$	Desempenho	Classe de resistência à penetração
CTL	15,13	-	Baixa
WWAj 10%	14,82	+2%	Moderada
WWAj 20%	15,96	-6%	Baixa

Os resultados da resistência à penetração dos cloretos demonstram que os valores dos coeficientes de difusão de cloretos não diferem entre o CTL e WWAj. Esta conclusão está portanto de acordo com o alcançado por *Sousa Coutinho e Garcia* [28] no estudo levado a cabo com a substituição de cinzas de madeira em argamassa, realizada pelas autoras. *Wang et al* [41] obtiveram também uma tendência semelhante na investigação realizada, e a qual pode ser confirmada pelo Figura 8, nos valores alcançados por WOOD e WOOD C (sendo estas as cinzas que mais se assemelham ao WWjA do presente trabalho) em comparação com o CTL dos autores.

Contudo, é o WWAj 10% que apresenta melhor resultado, ainda que com pouca diferença face ao CTL, mas que é o suficiente para elevar a classe de resistência à penetração dos cloretos como ilustram os resultados da Tabela 25 e o quadro de classificação representado Tabela 24, que como referido diz respeito a betão. Como tal, e apesar deste resultado do WWAj 10%, podemos concluir que a inclusão de cinza de madeira não altera significativamente a resistência aos cloretos.

4.1.11 Reação Alkali-Sílica (ASR)

No estudo da resistência à reação álcali-sílica, o uso de WWAj como substituição parcial de cimento em argamassas revelou que este é favorável, diminuindo a expansão. Mais do que isso, se a substituição se realizar a 20%, é ainda capaz de manter a expansão abaixo dos 0,10% aos 14 dias, limite máximo para classificar agregados de classe I (agregado não reativo) na norma E-461-3 do LNEC. A mesma define ainda que para valores de expansão entre 0,10% e 0,20% os agregados definem-se de classe II (agregado potencialmente reativo) e superior a 0,20% de classe III (agregado potencialmente reativo), sendo que estes são mais reativos que aqueles.

Evidentemente que neste caso o interesse não é propriamente classificar o agregado (areia CEN), que já se sabia ser reativo, mas sim observar o efeito do uso de WWAj.

Tabela 26 – Expansões ASR e respetivo desempenho

Argamassa	$E_{\text{médio}}$ (%)	Desempenho
CTL	0,128	-
WWAj 10%	0,134	-5%
WWAj 20%	0,083	+35%

Os resultados obtidos para o ASR são algo contraditórios. Isto porque as expansões obtidas no WWAj 10% e no CTL levariam a crer que a substituição de cimento por WWA não surtiria nenhum efeito na mitigação da reação pois os resultados são muito semelhantes.

No entanto, para o WWAj 20%, a adição de cinzas de resíduos de madeira poderá de facto ter um efeito benéfico na redução das expansões provocadas pela reação em estudo. Além deste facto, constata-se também que o valor da expansão para esta combinação agregado e WWAj 20% se situa abaixo do limite 0,10%.

As conclusões referidas para os 20% de substituição estão de acordo com as obtidas por *Wang e Baxter* [35]. Os autores referem que a inclusão de cinzas de madeira tem de facto benefícios na reação álcali-sílica, uma vez que reduz as expansões provocadas pela mesma. As conclusões obtidas pelos autores referem-se a 6 meses de duração do ensaio realizado com os provetes numa solução alcalina mas não acelerado por temperatura a 80°C. A expansão correspondente à combinação agregado reativo e cinza de madeira (25% de substituição do cimento) situou-se abaixo dos 0,10% ao fim dos 6 meses.

Coutinho et al [52](artigo submetido para publicação) avaliaram igualmente a reação álcali-sílica com a inclusão de cinzas de resíduos de madeira, que resultou também numa diminuição das expansões causadas pelo ASR, bem como uma expansão abaixo do limite de 0,10%. Em boa verdade, as autoras referem ainda que a inclusão de 10% de cinzas de madeira reduziu até 18% de expansão, enquanto que os 20% de inclusão de cinzas reduziram cerca de 60% de expansão, em comparação com o CTL.

De forma geral, podemos afirmar que o WWAj conduz a uma redução da expansão causada pelo ASR, pelo menos para maiores percentagens de substituição, no entanto há que prosseguir com os estudos no sentido de apurar a influência do teor de substituição.

4.1.11.1 Observação dos provetes ASR em microscopia eletrónica de varrimento (MEV)

A observação no MEV dos provetes que haviam sido submetidos ao ensaio do ASR leva a crer que de facto o WWAj para 20% conduz a uma redução da expansão causada por esta reação. Na observação, era notória a diferença de formação do gel sílico alcalino no CTL e nas amostras de WWAj com 20% (Figura 40 e Figura 41). De salientar que nestas figuras é possível observar que as camadas de gel em ambas as amostras são muito diferentes, sendo que no CTL a camada é mais espessa do que a camada de gel no WWAj 20%. Ainda referindo o gel sílico alcalino após ataque pelo ASR, durante toda a sessão de visualização das amostras no MEV, foi mais difícil encontrar a formação deste nas amostras com adição de WWAj, do que na amostra CTL.

Para além disso, era também notória a diferença na forma que os agregados apresentavam após sofrerem o ataque, uma vez que as superfícies dos agregados nas amostras de CTL são mais decalcadas e irregulares do que as amostras das argamassas que continham WWAj, sugerindo assim

que o ataque teria sido mais severo naquele do que neste e portanto de acordo com os resultados da expansão.

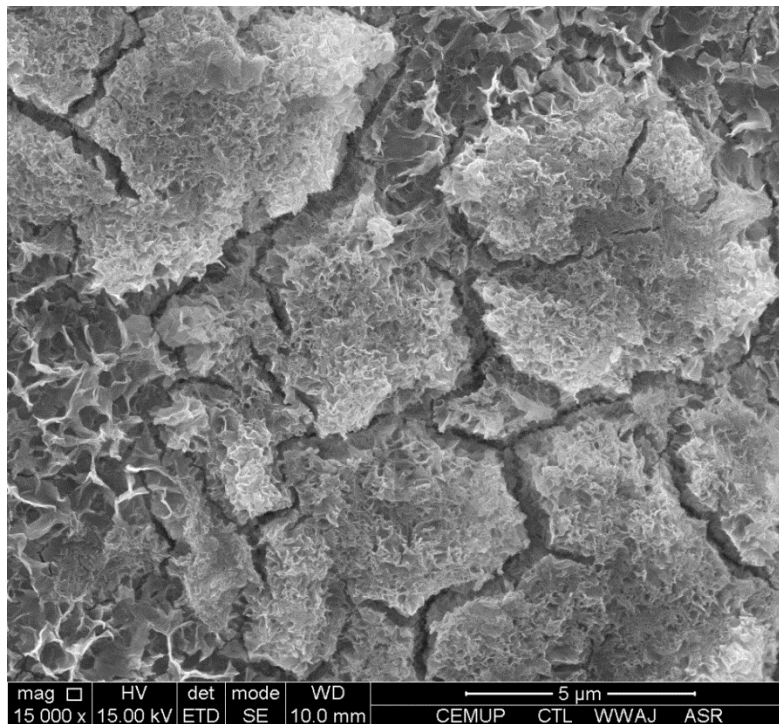


Figura 40 – Amostra CTL coberta do gel após ataque por ASR

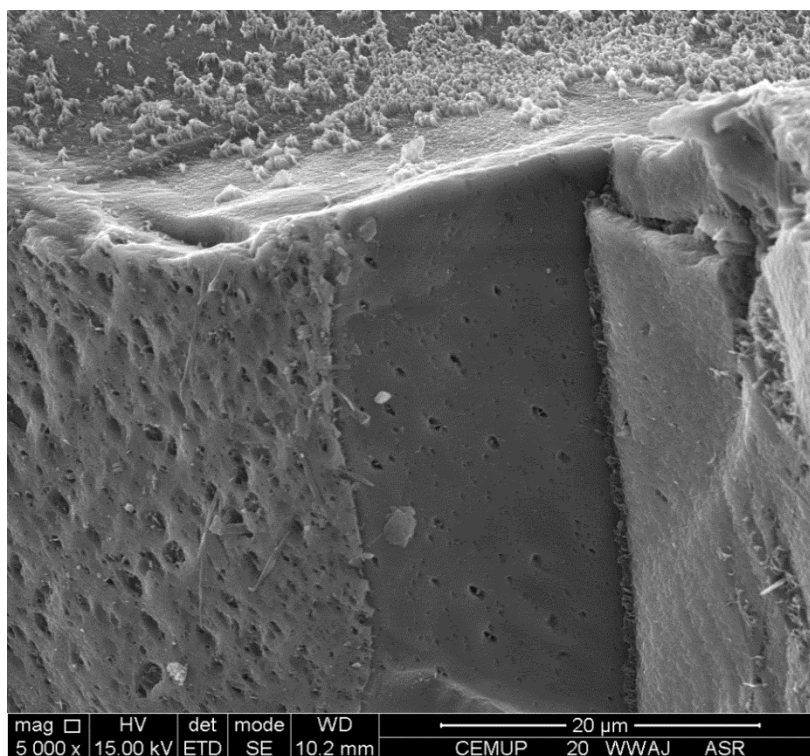


Figura 41 - Amostra WWAj 20% com gel após ataque por ASR

4.1.12 Ataque por sulfatos

Relativamente ao ataque por sulfatos, o tempo de realização deste ensaio foi muito inferior ao tempo que a especificação do LNEC E 462 estabelece para o mesmo. De facto ainda não é possível tirar conclusões pois é esperado que as expansões comecem a aumentar mais tarde como se pode verificar pela análise da Figura 42 que corresponde a um estudo semelhante mas com uma pozolana diferente (pó de vidro, GP).

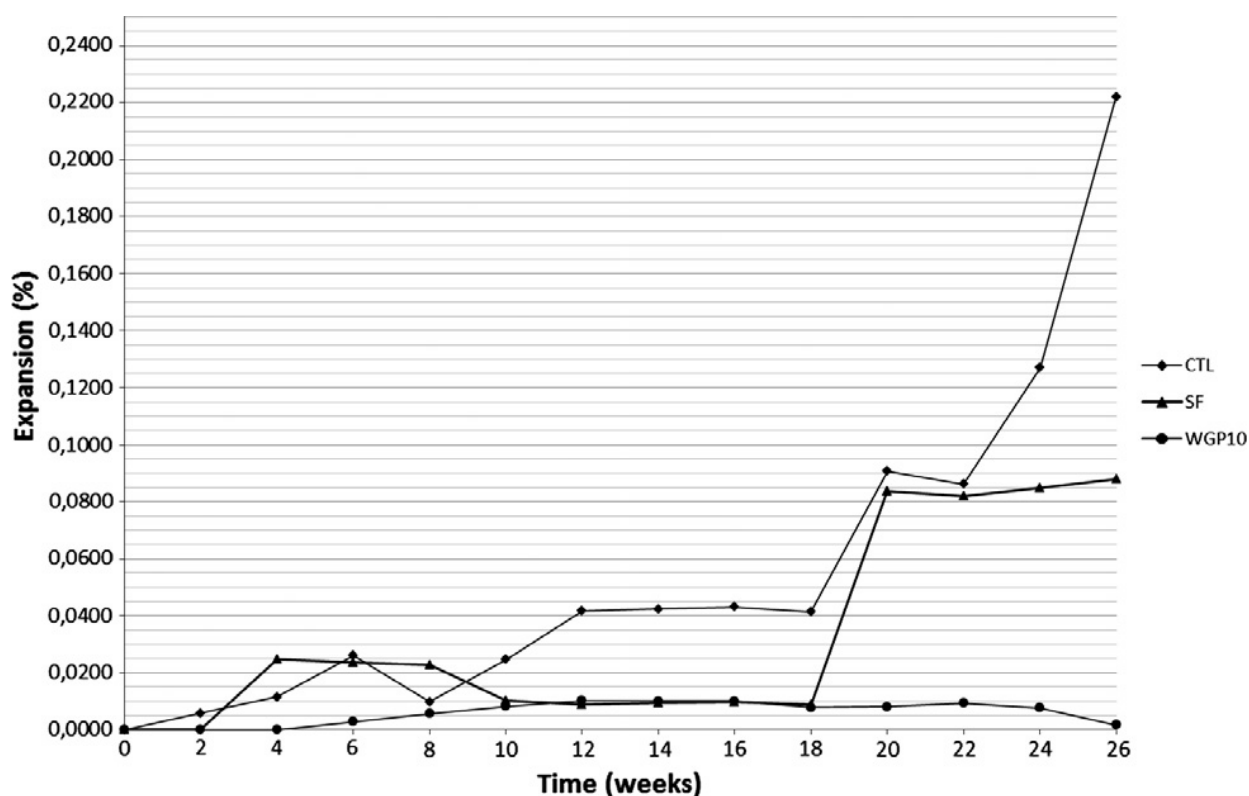


Figura 42 – Expansão devida ao ataque por sulfatos em argamassa de controlo (CTL) e argamassa com 10% de substituição do cimento por sílica de fumo (SF) e pó de resíduos de vidro (WGP) [53]

Repare-se que dos resultados das primeiras semanas também não seria possível prever o seu comportamento no final das 26 semanas. Em boa verdade, para o caso do SF e CTL, apenas a partir das 18 semanas é que a expansão devida a este ataque sofre um grande aumento.

5

CONCLUSÕES

Como conclusões gerais deste trabalho e analisando os resultados do capítulo 4 e da Tabela 27, poder-se-á concluir que a substituição de cimento em argamassas com 10% e 20% de cinzas de resíduos de madeira da Junglepowers (WWAj), tem como efeito os seguintes pontos:

- Perda marginal de trabalhabilidade;
- Perda de resistência considerável para 20% de substituição e para qualquer idade, e para 10% de substituição até aos 28 dias;
- Perda marginal de resistência aos 90 dias de cura para 10% de substituição, podendo-se prever ganhos para tempos de cura superiores;
- Grande perda de resistência à carbonatação como é em geral habitual para materiais pozolânicos;
- Vantagem marginal em termos de resistência à penetração de cloretos considerando 10% de substituição e uma ligeira perda para 20%;
- Grande aumento de resistência à ASR apenas para a percentagem de 20% de substituição com perda marginal para 10%.

Depreende-se portanto que embora o resíduo não apresente, segundo este estudo, propriedades pozolânicas evidentes, é possível que corresponda a um grau reduzido de pozolanicidade traduzindo-se numa recuperação de resistência dos 7 aos 90 dias e sem perda de resistência à penetração de cloretos nem perda significativa de resistência à reação álcali-silica para 10% de substituição.

Tabela 27 - Resultados obtidos e respetivo desempenho

Resultados aos ensaios / Desempenho	CTL	WWAj 10%	WWAj 20%
Trabalhabilidade (mm)	202	200	197
Desempenho (%)	-	-1	-3
R7 (MPa)	41,6	31,7	22,5
Desempenho (%)	-	-24	-46
R28 (MPa)	53,8	42,0	27,2
Desempenho (%)	-	-22	-49
R90 (MPa)	56,5	54,3	31,2
Desempenho (%)	-	-4	-45
Profundidade de carbonatação (semana 10) (mm)	4,04	5,95	9,12
Desempenho (%)	-	-47	-126
Penetração dos cloretos – Dns médio (*10 ⁻¹² m ² /s)	15,13	14,82	15,96
Desempenho (%)	-	+2	-6
Expansão média ASR (%)	0,128	0,134	0,083
Desempenho (%)	-	-5	+35

Em suma, com os dados que se dispõem presentemente, fruto do trabalho presente, as cinzas de resíduos de madeira (WWAj) testadas não apresentam as características necessárias para serem consideradas “pozolana para betão” segundo a normalização em vigor (NP 4220).

No entanto não se deve por de lado a possibilidade de uso deste resíduo como substituto parcial do cimento tendo o estudo que ser complementado com ensaios posteriores que clarifiquem e completem os seguintes aspetos:

- Variação da resistência a partir dos 90 dias de cura;
- Variação das várias propriedades com tratamento prévio das cinzas tais como a moagem, e considerando diferentes graus de finura;
- Análise ao longo do tempo das propriedades químicas e físicas destas cinzas com um plano de recolhas fundamentado;
- Estudo pormenorizado da lixiviação de metais pesados e elementos perigosos;
- Analisar o comportamento da substituição parcial de WWAj em cimento usando outras percentagens, nomeadamente 5% e 15%. Note-se que foram conseguidos bons resultados, nomeadamente no que se refere à carbonatação, para a substituição de 5% de cimento por cinza de madeira, por diversos autores ([28] e [23]);
- Estudo mais completo incluindo propriedades não avaliadas, como a resistência ao ataque por sulfatos e absorção de água;
- Estudos em betão.

Eventualmente se for provado que o resíduo tem interesse para substituto parcial do cimento, será também necessário avaliar a influência das condições de queima nas propriedades das cinzas e a possibilidade do ajuste dessas condições de forma a tornar a cinza numa adição mais eficaz, sem prejuízo da eficiência energética da queima dos resíduos.

Finalmente é importante salientar que a aplicação deste tipo de resíduos será apenas eventualmente viável em betões correntes. A sua utilização deverá ser analisada de uma forma global, considerando, além dos aspetos técnicos (alguns dos quais avaliados neste trabalho), os aspetos económicos e sobretudo as mais valias ambientais e a sustentabilidade na construção.

BIBLIOGRAFIA

1. Kluger, J. and A. Dorfman, *The challenges we face*. Time, 2002.
2. Malhotra, V.M., *Role of Supplementary Cementing Materials in Reducing Greenhouse Gas Emissions into the Environment*. 1998: OP & J.
3. Damtoft, J., et al., *Sustainable development and climate change initiatives*. Cement and Concrete Research, 2008. **38**: p. 115-27.
4. *Europe's environment: The dobris assessment - an overview*. Comissão europeia do Ambiente 2005.
5. *A UE e a gestão de resíduos*, in *Comissão europeia direção geral do ambiente*, S.d.p.o.d.c. europeias, Editor 2000: Luxemburgo.
6. Mehta, P.K., *Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development*. Concrete International, 2002. **24**: p. 23-28.
7. Cimpor, *2º Relatório de Sustentabilidade – Actividade Económica, Ambiental e Social*. Extraído do site www.cimpor.pt.
8. Zampini, D., *Future developments of concrete in the construction materials industry*, ed. T. Telford. Vol. 1. 2009. 251-58.
9. Sousa Coutinho, J., *Materiais de Construção 2 - Ligantes*. 2010, FEUP - Departamento de Engenharia Civil.
10. Muñiz, G.I.B.d., et al., *CARACTERIZAÇÃO DO RENDIMENTO E QUANTIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS GERADOS EM SERRARIA ATRAVÉS DO BALANÇO DE MATERIAIS* REVISTA FLORESTA 32(2) 247-259 , Brasil, 2001.
11. INETI, I.N.d.E.e.T.I.-. *Guia técnico sectorial – Indústria da madeira e do mobiliário*. 2000, Lisboa. 253.
12. Cabrita, I. and I. Gulyurtlu, *Desafios Tecnológicos, consequências sociais, económicas e ambientais*, in *Das energias fósseis às energias renováveis*. 2007: INETI, Lisboa. p. 97.
13. Rajamma, R., et al., *Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials*. J Hazard Mater, 2009: p. 1049-1060.
14. Cheah, C.B. and M. Ramli, *The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: An overview*. Resources, Conservation and Recycling, 2011. **55**(7): p. 669-685.
15. Udoeyo, F. and P. Dashibil, *Sawdust Ash as Concrete Material*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2002. **14**(2): p. 173-176.

16. Elinwa, A.U. and S.P. Ejeh, *Effects of the Incorporation of Sawdust Waste Incineration Fly Ash in Cement Pastes and Mortars*. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2004. **3**(1): p. 1-7.
17. Udoeyo, F., et al., *Potential of wood waste ash as an additive in concrete*. Journal of materials in civil engineering, 2006. **18**(4): p. 605-611.
18. Naik, T., R. Kraus, and R. Siddique, *CLSM containing mixtures of coal ash and a new pozzolanic material*. ACI journal, 2003: p. 208-215.
19. Elinwa, A.U. and Y.A. Mahmood, *Ash from timber waste as cement replacement material*. Cement and Concrete Composites, 2002. **24**(2): p. 219-222.
20. Naik, T., R. Kraus, and Rafat, *Use of wood ash in cement-based materials*. ACI journal, 2003. **CBU-2003 -19**.
21. Vassilev, S., et al., *An overview of the chemical composition of biomass*. Fuel, 2010. **89**: p. 913-33.
22. Abdullahi, M., *Characteristics of wood ash/OPC concrete*. Leonardo Electronic J Pract Technol, 2006. **8**: p. 9-16.
23. Cheah, C.B. and M. Ramli, *Mechanical strength, durability and drying shrinkage of structural mortar containing HCWA as partial replacement of cement*. Construction and Building Materials, 2012. **30**(0): p. 320-329.
24. Etiegni, L. and A. Campbell, *Physical and Chemical Characteristics of wood fly ash*. Bioresource Technology Vol. 37. 1991, England, UK: Elsevier Science Publishers Ltd.
25. Naik, T. and R. Kraus, *A new source of pozzolanic material* Concrete international, 2003. **25**: p. 55-62.
26. Fytianos K and T. B., *Leachability of heavy metals in Greek fly ash from coal combustion*. Environ Int, 1998. **24**: p. 477-86.
27. Karuppiyah M and G. G., *Toxicity of metals in coal combustion ash leachate*. J Hazard Mater, 1997. **56**: p. 53-8.
28. Sousa Coutinho, J. and M.L. Garcia, *Strength and durability of cement with forest waste bottom ash*. Construction and Building Materials, 2013. **41**(0): p. 897-910.
29. *Instituto Português da Qualidade, Pozolanas para betão, argamassa e caldas Definições, requisitos e verificação da conformidade NP4220, Lisboa, IPQ*.
30. Naik, T., R. Kraus, and R. Kumar *Wood ash: a new source of pozzolanic material*. 2001.
31. Naik, T., R. Kraus, and R. Siddique, *Demonstration of manufacturing technology for concrete and CLSM utilizing wood ash from Wisconsin*, 2002, Department of Civil Engineering and Mechanics, University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee. p. 124.
32. Wang, S., et al., *Biomass fly ash in concrete: Mixture proportioning and mechanical properties*. Fuel, 2008. **87**(3): p. 365-371.

33. Elinwa, A., S. Ejeh, and I. Akpabio, *Using metakaolin to improve sawdust ash concrete*. Concrete International, 2005.
34. Neville, A., *Properties of concrete*. 4th ed. 1995, England.
35. Wang, S. and L. Baxter, *Comprehensive study of biomass fly ash in concrete: Strength, microscopy, kinetics and durability*. Fuel Processing Technology, 2007. **88**(11–12): p. 1165-1170.
36. *ASTM C 1260- 94 Standard test method for potencial alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method)*. Philadelphia.
37. *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Betões. Metodologias para prevenir reacções expansivas internas. E-461, 2004, Lisboa, LNEC.*
38. Alhozaimy, A., P. Soroushian, and F. Mirza, *Effects of curing conditions and age on chloride permeability of fly ash mortar*. ACI Mater, 1996. **93**: p. 87-95.
39. Scanlon, J. and M. Sherman, *Fly ash concrete: an evaluation of chloride penetration testing methods*. Concrete International, 1996: p. 57-62.
40. Zhang, M.-H., et al., *Concrete incorporating supplementary cementing materials: effect on compressive strength and resistance to chloride ion penetration*. ACI Mater, 1999: p. 96.
41. Wang, S., et al., *Durability of biomass fly ash concrete: Freezing and thawing and rapid chloride permeability tests*. Fuel, 2008. **87**(3): p. 359-364.
42. Wang, S. and L. Baxter, *Quantitative kinetics of pozzolanic reaction and strength build-up in the mortar of biomass/coal fly ash with calcium hydroxide*, in *9th Canmet/ACI international conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans 2007*: Poland.
43. Khan, M. and C. Lynsdale, *Strength, permeability, and carbonation of highperformance concrete*. Cem Concr Res, 2002. **32**: p. 123-31.
44. *ASTM C 109/90 - ASTM Designation C109-90-Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*.
45. *ASTM C 230 - ASTM Designation C230M-98-Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of hydraulic Cement*. Philadelphia.
46. *Instituto Português da Qualidade, Método de ensaios de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas NP EN 196-1, 2006, Lisboa, IPQ.*
47. *Laboratório Nacional de Engenharia Civil , Betões. Determinação da resistência à carbonatação E-391, 1993, Lisboa, LNEC.*
48. *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário E-463, 2004, Lisboa, LNEC.*
49. *Laboratorio Nacional de engenharia civil, Cimentos. Resistência dos cimentos ao ataque por sulfatos E462, 2004, Lisboa, LNEC.*
50. Sousa Coutinho, A., *Fabrico e propriedades do betão*. Vol. 1. 1988, LNEC.

51. Nilsson, L., M.H. Ngo, and O.E. Gjorv, *High-Performance Repair Materials for Concrete Structures in the Port of Gothenburg*, in *Second International Conference on Concrete Under Severe Conditions Environment and Loading*, K.S. O. E. Gjorv, N. Banthia, E. & FN Spon, Editor 1998: London and New York. p. 1193-1198.
52. Coutinho, J.S., T. Ramos, and A.M. Matos, *Wood waste ash for sustainable concrete*. *Construction & Building Materials*, (Artigo submetido para publicação).
53. Matos, A.M. and J. Sousa-Coutinho, *Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement*, in *Construction and Building Materials* 2012. p. 205-215.

ANEXOS

ANEXO A

TRABALHABILIDADE DAS ARGAMASSAS REALIZADAS

Argamassa	Ensaio	Diâmetros de espalhamento (mm)			Trabalhabilidade	Desvio padrão
CTL	R7	200	200	197,5	199	1,44
WWAj-10%	R7	195	195	200	197	2,89
WWAj-20%	R7	195	191	190	192	2,65
CTL	R90	197,5	200	200	199	1,44
WWAj-10%	R90	190	190	195	192	2,89
WWAj-20%	R90	197,5	200	205	201	3,82
CTL	R28	204	205	204	204	0,58
WWAj-10%	R28	197,5	199	200	199	1,26
WWAj-20%	R28	205	197,5	197,5	200	4,33
CTL	carbonatação	205	207,5	205	206	1,44
WWAj-10%	carbonatação	206	205	210	207	2,65
WWAj-20%	carbonatação	200	197,5	197,5	198	1,44
CTL	cloretos	205	200	200	202	2,89
WWAj-10%	cloretos	205	205	207,5	206	1,44
WWAj-20%	cloretos	197	199	198	198	1,00
CTL	R180	205	204	203	204	1,00
WWAj-10%	R180	203	200	202	202	1,53
WWAj-20%	R180	195	194,5	196	195	0,76
CTL	Sulfatos	197	205	197	200	4,62
WWAj-10%	Sulfatos	205	202,5	201	203	2,02
WWAj-20%	Sulfatos	195	195,5	194	195	0,76
CTL	ASR	201	197,5	202,5	200	2,57
WWAj-10%	ASR	197,5	200	200	199	1,44
WWAj-20%	ASR	200	200	198	199	1,15

ANEXO B

RESISTÊNCIAS MECÂNICAS AOS 7 DIAS

Laboratório de Engenharia de
materiais de construção

Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia

Determinação das resistências mecânicas

Norma de referência: NP EN 196-1 Método de ensaio de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas

Requisição nº **MEC Bruno Pinto**

Boletim nº

Referência da amostra: **WWAj - Data de fabrico: 04/03/2013**

Equipamento (indicar o código do equipamento(s) utilizado(s))

Código	Designação	Critério de aceitação
	Máquina de ensaio	
	Misturadora	
	Balança	±1g
	Proveta	±1mL
	Cronómetro	±1s

Determinação da resistência à flexão

Referência	Massa (g)	Data de Fabrico	Idade (dias)	Data de Ensaio	Carga de rotura F_f (kN)	Resistência à flexão R_f (MPa)	Resistência à flexão média (MPa)	Std Dev.
CTL	564.3	04-03-13	7	11-03-2013	2.4	5.6	5.7	(0.4)
CTL	568.3				2.6	6.1		
CTL	562.1				2.3	5.4		
10% WWAj	564.7	04-03-13	7	11-03-2013	2.0	4.7	4.5	(0.1)
10% WWAj	563.1				1.9	4.5		
10% WWAj	556.6				1.7	4.0		
20% WWAj	549.7	04-03-13	7	11-03-2013	1.6	3.8	3.5	(0.6)
20% WWAj	551.8				1.2	2.8		
20% WWAj	554.1				1.7	4.0		

Determinação da resistência à compressão

Referência	Data de Fabrico	Idade (dias)	Data de ensaio	Carga de rotura F_c (kN)	Resistência à compressão R_c (MPa)	Resistência à compressão média R_m (MPa)		
CTL	04-03-13	7	11-03-2013	64.5	65.2	40.3	41.6 (0.2)	
CTL				65.8	63.0	41.1		39.4
CTL				67.5	73.0	40.2		45.6
10% WWAj	04-03-13	7	11-03-2013	49.3	49.6	30.8	31.7 (1.1)	
10% WWAj				49.5	50.1	30.9		32.5
10% WWAj				53.5	50.3	33.4		31.4
20% WWAj	04-03-13	7	11-03-2013	37.2	33.8	23.6	22.5 (0.9)	
20% WWAj				40.8	36.2	25.8		22.6
20% WWAj				36.3	36.3	22.7		22.3

Observações:

Ensaio realizado por: Paula

ANEXO C

RESISTÊNCIAS MECÂNICAS AOS 28 DIAS

materiais de construção

Faculdade de Engenharia

Determinação das resistências mecânicas

Norma de referência: NP EN 196-1 Método de ensaio de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas

Requisição nº MEC Bruno Pinto

Boletim nº

Referência da amostra: WWAj - Data de fabrico: 05/03/2013

Equipamento (indicar o código do equipamento(s) utilizado(s))

Código	Designação	Critério de aceitação
	Máquina de ensaio	
	Misturadora	
	Balança	±1g
	Proveta	±1mL
	Cronómetro	±1s

Determinação da resistência à flexão

Referência	Massa (g)	Data de Fabrico	Idade (dias)	Data de Ensaio	Carga de rotura F_r (kN)	Resistência à flexão R_f (MPa)	Resistência à flexão média (MPa)
CTL	537,8	06-03-13	28	03-04-2013	6,5	6,0	6,8
CTL	533,6				3,1	4,2	
CTL	530,9				2,3	6,7	
10% WWAj	572,5	06-03-13	28	03-04-2013	2,7	3,7	5,9
10% WWAj	537,7				4,7	5,3	
10% WWAj	529,9				2,9	3,9	
20% WWAj	562,9	06-03-13	28	03-04-2013	2,7	3,2	4,9
20% WWAj	567,7				2,7	3,9	
20% WWAj	555,3				2,8	4,2	

Determinação da resistência à compressão

Referência	Data de Fabrico	Idade (dias)	Data de ensaio	Carga de rotura F_c (kN)	Resistência à compressão R_c (MPa)	Resistência à compressão média R_m (MPa)
CTL	06-03-13	28	03-04-2013	80,3	83,9	53,7
CTL				84,7	88,9	52,7
CTL				87,5	83,3	55,9
10% WWAj	06-03-13	28	03-04-2013	70,8	66,3	44,3
10% WWAj				69,0	64,7	40,0
10% WWAj				70,2	66,9	44,3
20% WWAj	06-03-13	28	03-04-2013	70,9	41,1	25,6
20% WWAj				77,3	73,6	30,2
20% WWAj				76,7	73,7	30,7

Observações: de 0% valores extra fora

Ensaio realizado por: 

ANEXO D

RESISTÊNCIAS MECÂNICAS AOS 90 DIAS



Pág.: 1 de 1

Determinação das resistências mecânicasNorma de referência: **NP EN 196-1 Método de ensaio de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas**Requisição n° **MIEC Bruno Pinto**Boletim n° Referência da amostra: **WWA) - Data de fabrico: 27/02/2013**

Equipamento (indicar o código do equipamento(s) utilizado(s))

Código	Designação	Critério de aceitação
	Máquina de ensaio	
	Misturadora	
	Balança	±1g
	Proveta	±1mL
	Cronómetro	±1s

Determinação da resistência à flexão

Referência	Massa (g)	Data de Fabrico	Idade (dias)	Data do Ensaio	Carga de rotura F_r (kN)	Resistência à flexão R_f (MPa)	Resistência à flexão média (MPa)
CTL	585,0	27-02-13	90	28-05-2013	3,2	3,5	7,8
CTL	588,3				3,4	8,0	
CTL	593,3				3,4	8,0	
10% WWAj	588,8	27-02-13	90	28-05-2013	2,0	4,2	6,6
10% WWAj	589,8				3,2	3,5	
10% WWAj	592,4				3,2	3,5	
20% WWAj	592,8	27-02-13	90	28-05-2013	2,4	5,6	5,5
20% WWAj	591,8				2,2	5,2	
20% WWAj	594,3				2,5	5,7	

Determinação da resistência à compressão

Referência	Data de Fabrico	Idade (dias)	Data do ensaio	Carga de rotura F_c (kN)	Resistência à compressão R_c (MPa)	Resistência à compressão média R_m (MPa)
CTL	27-02-13	90	28-05-2013	87,7	86,6	54,8
CTL				93,6	90,1	58,2
CTL				89,4	90,9	54,6
10% WWAj	27-02-13	90	28-05-2013	52,2	57,6	56,7
10% WWAj				84,6	80,7	62,9
10% WWAj				87,3	85,2	64,6
20% WWAj	27-02-13	90	28-05-2013	52,4	52,2	32,8
20% WWAj				54,1	48,0	33,8
20% WWAj				47,0	46,0	27,4

Observações:

Ensaio realizado por: Carla

ANEXO F

DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO DOS CLORETOS POR ENSAIO DE MIGRAÇÃO EM REGIME NÃO ESTACIONÁRIO

Provete	Profundidade de Penetração (mm)							X _{d,med} (mm)	D _{ns}	D _{ns} médio	Δ
	xd6	xd4	xd2	xd1	xd3	xd5	xd7				
CTL - 1	22,23	20,92	23,92	23,91	21,27	24,44	23,80	22,93	16,24	15,13	1,576
CTL - 2	19,53	18,47	21,94	21,43	20,09	19,23	19,48	20,02	14,01		
WWA10%-1	18,89	19,02	21,81	21,75	21,31	21,03	20,47	20,61	14,47	14,82	0,503
WWA10%-2	22,31	20,43	20,34	21,31	22,96	21,74	21,73	21,55	15,18		
WWA20%-1	25,50	25,98	24,77	25,77	27,57	26,46	26,22	26,04	14,82	15,96	1,624
WWA20%-2	30,75	32,90	29,96	29,41	29,89	28,69	27,42	29,86	17,11		