

MATERIAIS CIMENTÍCIOS COM RESÍDUOS COMO ADIÇÕES

ANA FILIPA LOPES LEAL

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

JUNHO DE 2017

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2016/2017

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446



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 +351-22-508 1440



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2016/2017 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2017.*

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

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

À minha mãe.
E à memória do meu avô.

“Live as if you were to die tomorrow. Learn as if you were to live forever.”

Gandhi

AGRADECIMENTOS

Na nossa vida temos de escolher caminhos que nem sempre são fáceis de percorrer.

Nesta fase do meu percurso académico contei com o apoio e ajuda de pessoas fantásticas, que me incentivaram a ultrapassar os obstáculos e a tomar as melhores decisões.

Mais uma etapa concluída. Fica a certeza do dever cumprido e um agradecimento sentido a todos quantos acreditaram em mim.

O meu muito obrigada à minha orientadora, Professora Doutora Joana de Sousa Coutinho, por me ajudar a culminar esta fase da minha vida, pela passagem dos seus conhecimentos, sabedoria e experiência, por toda a disponibilidade e simpatia com que me presenteou, por me ter sugerido este tema, acreditando que a realização deste trabalho seria possível.

A todos no LEMC, por me terem recebido com tanto carinho e por todo o apoio prestado estes meses.

Ao LABEST, em especial à Eng^a. Paula pela ajuda e auxílio no decorrer de alguns dos ensaios.

Às empresas ELV e FERESPE, por terem fornecido as amostras dos resíduos pó de ardósia e “escórias e refratários de fundição”, respetivamente.

À Eng^a. Mariana Brandão, por me ter ajudado na cartografia dos xistos e ardósias em Portugal.

A todos os meus colegas de curso, em especial aos meus colegas de mestrado, por todo o companheirismo e incentivo.

Aos meus amigos, por todas as conversas de apoio para ultrapassar os momentos mais complicados e, pelos momentos inesquecíveis que me ajudaram a manter o sorriso na cara.

À minha avó por estar sempre presente e pelo amor incondicional.

Aos meus tios/padrinhos que estão sempre presentes nos bons e maus momentos. Tratam-me como uma filha e todos os conselhos que me dão permitem-me crescer e tornar-me num melhor ser humano.

Ao meu irmão que sempre me ajudou, motivou e aturou, mesmo estando longe.

Por último, o maior agradecimento é para o pilar da minha vida, a minha Mãe. Pelo amor e amizade, por acreditar em mim mais do que eu própria, por me amparar todas as quedas e voltar a indicar o caminho certo, por sempre ter uma palavra sábia, por realizar todos os meus sonhos e, claro, por ter proporcionado a minha formação académica, dando-me as asas para poder voar. O meu obrigada nunca será o suficiente.

Obrigada a todos.

RESUMO

Com o contínuo agravamento das alterações climáticas em todo o Mundo tem havido uma crescente preocupação na redução das emissões de dióxido de carbono e, uma tentativa de solucionar a preservação de recursos ao nível de várias indústrias e empresas.

Ao nível do sector da construção sustentável, têm sido diversas as formas de tentar atenuar não só as emissões de dióxido de carbono, mas principalmente de dispor alternativas aos resíduos gerados.

Assim, dando destaque à reciclagem de materiais e também á possibilidade de criação de subprodutos, promove-se a prática da Economia Circular.

Esta dissertação surge no âmbito da construção sustentável e, valorização de resíduos. Foram estudados dois resíduos, um apenas preliminarmente, o resíduo “escórias e restos de refratário de fundição” (FRS) a aplicar eventualmente como agregado para betão e, o segundo resíduo, pó de ardósia (SW) como substituto parcial do cimento. O pó de ardósia foi utilizado tal qual como gerado, sem ter sido submetido a qualquer tratamento prévio.

Foi realizada uma série de ensaios em pastas e argamassas (com 5, 20 e 40 % de substituição do cimento por resíduo usado), para avaliar além das resistências mecânicas, alguns dos indicadores de durabilidade mais importantes nomeadamente carbonatação acelerada, absorção por capilaridade, resistividade e resistência à penetração de cloretos, ao ataque por sulfatos e à expansão álcalis-sílica (ASR).

Este programa experimental permitiu prever a viabilidade do uso de pó de ardósia como substituto parcial do cimento em betão.

Para percentagens elevadas de substituição (20 e 40 %) foi necessário o emprego de superplastificante para atingir a mesma trabalhabilidade que a argamassa de referência (0 % de substituição) e, para estes níveis de substituição, verificou-se surpreendentemente um aumento significativo da resistência à ASR. Assim, em situações onde se possa prever a ocorrência de ASR e em que os outros ataques agressivos não se verifiquem, será possível usar SW em percentagens de substituição mais elevadas sugerindo-se 10 a 15 %.

Com 5 % de substituição do cimento por pó de ardósia, que se verificou ser não pozolânico, observou-se uma perda mínima sobretudo das resistências mecânicas, da carbonatação, do coeficiente de difusão de cloretos e ASR e, uma melhoria no coeficiente de absorção por capilaridade.

Assim conclui-se que é possível utilizar 5 % de substituição de pó de ardósia, sem qualquer tratamento prévio, como fíler em betão, contribuindo assim para a sustentabilidade na construção e Economia Circular.

PALAVRAS-CHAVE: construção sustentável, resíduo pó de ardósia, FRS, argamassas, durabilidade.

ABSTRACT

The increasing climatic changes throughout the World, has led to growing concern related to reduction of carbon dioxide emissions and also to sparing natural resources mainly at the level of several industries and enterprises.

In terms of sustainable construction, several attempts have been made to reduce carbon dioxide emission as well as sorting out uses for waste materials and therefore putting Circular Economy into practice.

This work was carried out considering sustainability in construction, in particular waste upgrading where two waste materials were considered: “furnace and refractory slag” (FRS) eventually, to be applied as aggregate replacement material in concrete and also slate waste (SW) to be incorporated in concrete as a partial cement replacement material. Slate waste was used as produced, this is, it was not subjected to any prior treatment.

An experimental program was carried out at paste and mortars levels (with 5, 20 and 40 % of cement replacement with SW), to evaluate the mechanical strength, and some of the most important durability parameters such as carbonation resistance, water absorption by capillarity, resistivity, chloride penetration resistance, sulfate resistance and resistance to alkali-silica reaction (ASR).

This experimental program allowed to foresee the viability of using slate powder waste as a partial cement replacement in concrete

The higher percentages of cement replacement with SW (20 and 40 %) required the use of superplasticizer to reach the same flowability as the reference mortar (0 % cement replacement with SW). Surprisingly, these high replacement levels led to a significant increase in resistance to ASR. Thus, in case of probable ASR attack and negligible attack by other aggressive agents it may be advantageous to use SW and it is suggested to use about 10-15 %.

With 5 % cement replacement with a, non pozzolanic material, SW, detrimental losses of mechanical strength, carbonation resistance, chloride penetration resistance and ASR resistance were observed and an improvement in sorptivity.

So, it may be concluded from this work that this type of slate waste may be used “as is”, with no prior treatment, as a filler for concrete, thereon contributing to the sustainable construction and Circular Economy.

KEYWORDS: sustainable construction, slate powder waste, FRS, mortar, durability

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL	1
1.2. GESTÃO DE RESÍDUOS E ECONOMIA CIRCULAR	2
1.3. INDÚSTRIA CIMENTEIRA	3
1.4. OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DO PLANO DE TRABALHOS	4

2. ESTADO DA ARTE

2.1. ARDÓSIA	5
2.1.1. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DE EXPLORAÇÕES DE ARDÓSIA	5
2.1.2. ARDÓSIA DE VALONGO	8
2.1.3. ESTUDOS REALIZADOS COM ARDÓSIA	9
2.2. MICROSCOPIA ELETRÓNICA DE VARRIMENTO (MEV)	10
2.3. INDICADORES DE DURABILIDADE	10
2.3.1. RESISTIVIDADE ELÉTRICA	11
2.3.2. CARBONATAÇÃO ACELERADA	11
2.3.3. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	11
2.3.4. RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS	12
2.3.5. RESISTÊNCIA AO ATAQUE POR SULFATOS	12
2.3.6. REAÇÃO ÁLCALIS-SÍLICA (ASR)	12
2.4. OUTROS RESÍDUOS ESTUDADOS	13

3. RESÍDUO ESCÓRIAS E RESTOS DE REFRATÁRIO DE FUNDIÇÃO, FRS

3.1. INTRODUÇÃO	15
3.2. ORIGEM E DEFINIÇÃO DO RESÍDUO FRS	16
3.3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	18
3.3.1. PREPARAÇÃO DO FRS	18

3.3.2. PENEIRAÇÃO DO FRS	18
3.3.3. LIMPEZA DE MATERIAL FERROSO	19
3.3.4. TRABALHABILIDADE DA ARGAMASSA COM FRS	20
3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS RELATIVAMENTE AO RESÍDUO FRS	21

4.PROCEDIMENTOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1. INTRODUÇÃO	23
4.2. MATERIAIS UTILIZADOS	23
4.2.1. ÁGUA DESTILADA	23
4.2.2. AREIA NORMALIZADA (CEN)	24
4.2.3. ADJUVANTE	24
4.2.4. CIMENTO UTILIZADO	25
4.2.5. ORIGEM DO RESÍDUO PÓ DE ARDÓSIA (SW).....	26
4.3. CARACTERÍSTICAS DO CIMENTO E DO SW	27
4.3.1. GRANULOMETRIA E MEV	27
4.3.2. ANÁLISE QUÍMICA DOS LIGANTES E ESPECTROMETRIA POR RAIOS-X EM MEV	30
4.3.3. ENSAIO DE POZOLANICIDADE	31
4.3.4. ENSAIO MASSA VOLÚMICA	32
4.3.5. ENSAIO BLAINE.....	33
4.4. ENSAIOS COM PASTAS DE CIMENTO	36
4.4.1. FABRICO DOS PROVETES	36
4.4.2. DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA E DO TEMPO DE PRESA	36
4.4.3. ENSAIO DE EXPANSIBILIDADE	38
4.5. ENSAIOS EM ARGAMASSAS	39
4.5.1. COMPOSIÇÃO DOS PROVETES.....	39
4.5.2. FABRICO DOS PROVETES.....	40
4.5.3. ENSAIOS DE TRABALHABILIDADE	41
4.5.4. RESISTÊNCIAS MECÂNICAS	43
4.5.4.1. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO	44
4.5.4.2. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	46
4.5.5. RESISTIVIDADE ELÉTRICA	48
4.5.6. CARBONATAÇÃO ACELERADA.....	52

4.5.7. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	56
4.5.8. RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS	62
4.5.9. RESISTÊNCIA AO ATAQUE POR SULFATOS	70
4.5.10 OBSERVAÇÃO EM MEV AOS 28 DIAS	73
4.5.10.1. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA MEV	73
4.5.10.2. MEV DE AMOSTRA DE ARGAMASSAS AOS 28 DIAS	74
4.5.11. REAÇÃO ÁLCALIS-SÍLICA (ASR)	79
4.5.11.1. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	79
4.5.11.2. OBSERVAÇÕES EM MEV - ASR	82

5. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5.1. INTRODUÇÃO	89
5.2. ANÁLISES DOS RESULTADOS OBTIDOS	89
5.2.1. GRANULOMETRIA	89
5.2.2. ANÁLISES QUÍMICAS	90
5.2.3. POZOLANICIDADE	91
5.2.4. MASSA VOLÚMICA	92
5.2.5. ENSAIO BLAINE	93
5.2.6. CONSISTÊNCIA NORMAL E TEMPOS DE PRESA	93
5.2.7. EXPANSIBILIDADE	93
5.2.8. TRABALHABILIDADE	94
5.2.9. RESISTÊNCIAS MECÂNICAS	94
5.2.10. ÍNDICE DE ATIVIDADE	96
5.2.11. RESISTIVIDADE	97
5.2.12. CARBONATAÇÃO	98
5.2.13. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	98
5.2.14. ANÁLISE DA PENETRAÇÃO DE CLORETOS	100
5.2.15. REAÇÃO ÁLCALIS-SÍLICA (ASR)	100

6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÕES GERAIS	103
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	106

REFERÊNCIAS 107

ANEXOS 113

ANEXO 1 – FICHA TÉCNICA DO ADJUVANTE SIKA VISCOCRETE 3005 (SIKA)

ANEXO 2 – FICHA TÉCNICA DO CIMENTO CEM I 42,5 R (FORNECIDA PELA SECIL)

ANEXO 3 – BOLETIM DE ANÁLISE DA DETERMINAÇÃO DA POZOLANICIDADE

ANEXO 4 – ANÁLISE QUÍMICA DO SW (REALIZADA PELO LNEG)

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 – Resíduos gerados, excluindo os principais resíduos minerais, em 2004 e 2014 (Adaptado de EUROSTAT, 2014)	2
Fig. 1.2 – Percentagem de resíduos na UE em 2014 por atividade (Adaptado EUROSTAT, 2014)	3
Fig. 2.1 – Países que mais exportaram ardósia até 2015 (Adaptado de OEC).....	6
Fig. 2.2 – Ardósia de Valongo	7
Fig. 2.3 – Ardósia de Arouca.....	7
Fig. 2.4 – Ardósia de Mondim de Basto	7
Fig. 2.5 – Ardósia de Foz Côa.....	7
Fig. 2.6 – Xisto de Mourão	7
Fig. 2.7 – Xisto de Barrancos	7
Fig. 2.8 – Ardósias e xistos em Portugal (ilustrado pela Eng ^a . Mariana Brandão)	8
Fig. 2.9 – Microscópio eletrónico de varrimento ambiental - CEMUP	10
Fig. 3.1 – Matéria prima de fundição: sucata variada	16
Fig. 3.2 – Processos de fundição (acima adaptada da FERESPE), e após o processo de fundição (abaixo)	16
Fig. 3.3 – Molde de areia usado	17
Fig. 3.4 – Armazenagem de finos de despoeiramento	17
Fig. 3.5 – Resíduos escória de fusão.....	17
Fig. 3.6 – Recolha do material FRS	17
Fig. 3.7 – Amostra de FRS seco	18
Fig. 3.8 – Amostra de FRS tratada.....	18
Fig. 3.9 – Agitador mecânico.....	18
Fig. 3.10 – Resultado de peneiração manual	18
Fig. 3.11 – Restos metálicos	18
Fig. 3.12 – Espalhamento exemplo de material para passagem do íman.....	19
Fig. 3.13 – Material ferroso agarrado ao íman.....	20
Fig. 3.14 – Aspeto da amassadura com o substituto FRS.....	21
Fig. 4.1 – Água destilada e utensílios utilizados	23
Fig. 4.2 – Saco de areia CEN comercializado	24
Fig. 4.3 – Adjuvante Sika ViscoCrete 3005.....	24
Fig. 4.4 – Amostra de cimento	25

Fig. 4.5 – Pedreira da Milhária em Campo, Valongo	26
Fig. 4.6 – Corte de blocos em fábrica	26
Fig. 4.7 – Fábrica da empresa ELV.....	26
Fig. 4.8 – Amostra de SW	27
Fig. 4.9 – Curva granulométrica do cimento	28
Fig. 4.10 – Curva granulométrica do SW	28
Fig. 4.11 – Dimensões de partículas do cimento	29
Fig. 4.12 – Dimensões de partículas do SW	29
Fig. 4.13 – Amostra de cimento aumentada 1000 vezes.....	29
Fig. 4.14 – Amostra de SW aumentada 1000 vezes.....	29
Fig. 4.15 – Amostra de cimento aumentada 5000 vezes.....	29
Fig. 4.16 – Amostra de cimento aumentada 5000 vezes.....	29
Fig. 4.17 – Partículas numa amostra de SW a analisar.....	31
Fig. 4.18 – Espetro da zona Z1 da fig.4.17	31
Fig. 4.19 – Espetro da zona Z2 da fig.4.17	31
Fig. 4.20 – Diagrama para a determinação da pozolanicidade e identificação de X_1 e X_2	32
Fig. 4.21 – Momento de registo de V_1	33
Fig. 4.22 – Ensaio de massa volúmica.....	33
Fig. 4.23 – Equipamento para o ensaio Blaine	34
Fig. 4.24 – Introdução do material a ensaiar	34
Fig. 4.25 – Impossibilidade de formar camada com amostra de SW	35
Fig. 4.26 – Colocação da célula no manómetro.....	35
Fig. 4.27 – Procedimento do fabrico de pastas (Coutinho, 2002).....	36
Fig. 4.28 – Misturadora usada no fabrico de pastas	37
Fig. 4.29 – Aparelho de Vicat (manual à esquerda e automático à direita).....	37
Fig. 4.30 – Aspeto final da pasta endurecida.....	37
Fig. 4.31 – Início do ensaio de expansibilidade	38
Fig. 4.32 – Leitura do afastamento das agulhas	38
Fig. 4.33 – Moldes em água quente.....	38
Fig. 4.34 – Procedimento do fabrico das amassaduras (Adaptado de Coutinho, 2002)	40
Fig. 4.35 – Mistura de cimento e ardósia	41
Fig. 4.36 – Massa de água mais SP	41
Fig. 4.37 - Misturadora	41

Fig. 4.38 – Esquema de moldagens realizadas	41
Fig. 4.39 – Mesa de espalhamento	42
Fig. 4.40 – Identificação da série de provetes a ensaiar aos 7 dias	44
Fig. 4.41 – Posicionamento do provete para o ensaio de flexão	44
Fig. 4.42 – Rotura do provete por flexão.....	44
Fig. 4.43 – Resistência à flexão ao fim de 7, 28, 56 e 84 dias (exceto $R_f^{\text{resist.}}$).....	46
Fig. 4.44 – Preparação de um ensaio de compressão	46
Fig. 4.45 – Ensaio de compressão.....	46
Fig. 4.46 – Resistência à compressão ao fim de 7, 28, 56 e 84 dias (exceto $R_c^{\text{resist.}}$)	47
Fig. 4.47 – Colocação de redes inoxidáveis nos moldes	48
Fig. 4.48 – Exemplo de ligação dos elétrodos a um provete SW20	48
Fig. 4.49 – Montagem para ensaio de resistividade	49
Fig. 4.50 – Provette antes do ensaio de flexão.....	49
Fig. 4.51 – Provette após rotura por flexão	49
Fig. 4.52 – Provette antes do ensaio de compressão.....	50
Fig. 4.53 – Provette fissurado por compressão	50
Fig. 4.54 – Evolução da resistividade das argamassas ensaiadas aos 28 e 56 dias.....	52
Fig. 4.55 – Corte de 3 cm de um provete de argamassa.....	52
Fig. 4.56 – Doze provetes de argamassa cortados antes da aplicação da solução.....	53
Fig. 4.57 – À esquerda provetes CTL e à direita provetes SW5 (dia 8/06/2017)	53
Fig. 4.58 – À esquerda provetes SW20 e à direita SW40	53
Fig. 4.59 – À esquerda provetes CTL e à direita provetes SW5 (9/06/2017)	54
Fig. 4.60 – Provetes de argamassa ensaiadas à carbonatação.....	54
Fig. 4.61 – Esquema usado para determinar a profundidade de carbonatação.....	55
Fig. 4.62 – Profundidade média de carbonatação das argamassas.....	56
Fig. 4.63 – Colocação dos 15 provetes para o ensaio de absorção de água por capilaridade ..	57
Fig. 4.64 – Provetes ao fim de 24 horas de ensaio de absorção de água por capilaridade	58
Fig. 4.65 – Curvas de absorção dos provetes CTL ₁ , CTL ₂ e CTL.....	59
Fig. 4.66 – Curvas de absorção dos provetes SW5.....	59
Fig. 4.67 - Curvas de absorção dos provetes SW20	60
Fig. 4.68 - Curvas de absorção dos provetes SW40	60
Fig. 4.69 – Valores médios do coeficiente de absorção de água por capilaridade (4h30min) ...	62
Fig. 4.70 – Provetes mantidos na solução Ca(OH) ₂ após desligar a bomba de vácuo	63

Fig. 4.71 – Exemplo de provetes montados nas células para o ensaio	63
Fig. 4.72 – Um dos lados da célula preenchido com solução anódica	64
Fig. 4.73 – Colocação de termómetros nos ânodos dos provetes.....	65
Fig. 4.74 – Ensaio de migração dos provetes SW5 e SW20	65
Fig. 4.75 – Compressão diametral dos 3 provetes SW20	66
Fig. 4.76 – Provetes CTL ₁ e SW40.....	66
Fig. 4.77 – Provetes CTL ₂	66
Fig. 4.78 – À esquerda os provetes SW20 e à direita os provetes SW5.....	67
Fig. 4.79 – Ilustração da medição das profundidades de penetração dos cloretos (Adaptada da E-463, 2004).....	67
Fig. 4.80 – Molde montado para provetes a ensaiar à resistência aos sulfatos	70
Fig. 4.81 – Preparação da solução de hidróxido de cálcio (reagente à esquerda e agitador à direita).....	71
Fig. 4.82 – Leitura da barra invar na direção normal	71
Fig. 4.83 – Preparação de 1 L de sulfato de sódio	72
Fig. 4.84 – Divisão dos provetes 1, 3 e 5 e 2, 4, 6.....	72
Fig. 4.85 – Colagem de amostra em disco metálico	74
Fig. 4.86 – Identificação de amostras	74
Fig. 4.87 – Argamassa CTL ampliada 100 vezes	74
Fig. 4.88 – Argamassa SW5 ampliada 100 vezes	74
Fig. 4.89 – Argamassa CTL ampliada 1000 vezes	75
Fig. 4.90 – Argamassa SW5 ampliada 1000 vezes	75
Fig. 4.91 – Argamassa CTL ampliada 5000 vezes	75
Fig. 4.92 – Argamassa SW5 ampliada 5000 vezes	75
Fig. 4.93 – Argamassa CTL ampliada 20000 vezes	75
Fig. 4.94 – Argamassa SW5 ampliada 20000 vezes	75
Fig. 4.95 – Argamassa SW20 ampliada 100 vezes	76
Fig. 4.96 – Argamassa SW40 ampliada 100 vezes	76
Fig. 4.97 – Argamassa SW20 ampliada 1000 vezes	76
Fig. 4.98 – Argamassa SW40 ampliada 1000 vezes	76
Fig. 4.99 – Argamassa SW20 ampliada 5000 vezes	76
Fig. 4.100 – Argamassa SW40 ampliada 5000 vezes	76
Fig. 4.101 – Argamassa SW20 ampliada 20000 vezes	77
Fig. 4.102 – Argamassa SW40 ampliada 20000 vezes	77

Fig. 4.103 – Amostra de argamassa CTL ampliada 5000 e 20000 vezes	77
Fig. 4.104 – Espectro da zona Z1 da figura 4.103	78
Fig. 4.105 – Amostra de argamassa SW40 ampliada 1000 e 5000 vezes	78
Fig. 4.106 – Espectro da zona Z1 da fig.4.105	78
Fig. 4.107 – Cristal de hidróxido de cálcio formado em argamassa SW5 e respetivo espectro ...	79
Fig. 4.108 – Barras de argamassa para ensaio ASR imersas em água potável	80
Fig. 4.109 – Leitura da barra invar para ensaio ASR	80
Fig. 4.110 – Preparação da solução de hidróxido de sódio	81
Fig. 4.111 – Expansão dos provetes de argamassa até aos 26 dias	82
Fig. 4.112 – Argamassa CTL ampliada 1000 vezes	82
Fig. 4.113 – Argamassa SW5 ampliada 1000 vezes	82
Fig. 4.114 – Argamassa CTL ampliada 5000 vezes	83
Fig. 4.115 – Argamassa SW5 ampliada 5000 vezes	83
Fig. 4.116 – Argamassa CTL ampliada 20000 vezes	83
Fig. 4.117 – Argamassa SW5 ampliada 20000 vezes	83
Fig. 4.118 – Argamassa SW20 ampliada 1000 vezes	84
Fig. 4.119 – Argamassa SW40 ampliada 1000 vezes	84
Fig. 4.120 – Argamassa SW20 ampliada 5000 vezes	84
Fig. 4.121 – Argamassa SW40 ampliada 5000 vezes	84
Fig. 4.122 – Argamassa SW20 ampliada 20000 vezes	84
Fig. 4.123 – Argamassa SW40 ampliada 20000 vezes	84
Fig. 4.124 – Amostra de argamassa CTL ensaiada à ASR ampliada 5000 vezes e respetivo espectro	85
Fig. 4.125 – Amostra de argamassa SW5 ensaiada à ASR ampliada 5000 vezes e respetivo espectro	85
Fig. 4.126 – Amostra de argamassa SW20 ensaiada à ASR ampliada 20000 vezes e respetivo espectro	85
Fig. 4.127 – Amostra de argamassa SW40 ensaiada à ASR ampliada 20000 vezes e respetivo espectro	86
Fig. 4.128 – Amostra de argamassa SW40 ampliada 20000 vezes e respetivo espectro	86
Fig. 4.129 – Amostra de argamassa SW40 ampliada 5000 vezes à esquerda e 20000 vezes à direita	86
Fig. 4.130 – Espectro da zona Z3 da fig.4.129	87
Fig. 4.131 – Amostra de argamassa SW40 ampliada 5000 vezes à esquerda e 20000 vezes à direita	87

Fig. 4.132 – Espectro da zona Z4 da fig.4.131	87
Fig. 4.133 – Espectro da zona Z5 da fig.4.131	87
Fig. 4.134 – Amostra de argamassa SW40 ampliada 5000 vezes à esquerda e 20000 vezes à direita.....	88
Fig. 4.135 – Espectro da zona Z8 e Z9 identificadas na fig.4.134.....	88
Fig. 5.1 – Curvas granulométricas do cimento e do SW utilizados.....	90
Fig. 5.2 – Pozolanicidade de misturas de cimento Portland com pozolanas naturais – Adaptada de Coutinho, A. (1988)	92
Fig. 5.3 – Curvas de absorção capilar obtidas para as primeiras 4h30min do ensaio	99
Fig. 6.1 – Comparação geral do desempenho das argamassas estudadas	106

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Países que mais exportam ardósia em 2015 (Adaptado de OEC)	6
Tabela 3.1 – Descrição de exportação de bens (FOB) – Adaptada do INE	15
Tabela 3.2 – Resultado dos processos de peneiração	19
Tabela 3.3 – Quantidades nas amassaduras das argamassas	20
Tabela 4.1 – Composição granulométrica da areia normalizada CEN	24
Tabela 4.2 – Dados técnicos Sika ViscoCrete 3005 (Sika)	24
Tabela 4.3 – Ensaio físico (SECIL)	25
Tabela 4.4 – Ensaio mecânico (SECIL)	26
Tabela 4.5 – Granulometria do cimento e do SW	27
Tabela 4.6 – Comparação da análise química do cimento e do SW	30
Tabela 4.7 – Resultados da pozolanicidade	32
Tabela 4.8 – Determinação das massas volúmicas dos ligantes	33
Tabela 4.9 – Composição das pastas ensaiadas	36
Tabela 4.10 – Tempos de presa das pastas	38
Tabela 4.11 – Expansibilidade das pastas	39
Tabela 4.12 – Quantidade para as amassaduras das argamassas	39
Tabela 4.13 – Trabalhabilidade obtida para todos os provetes ensaiados	42
Tabela 4.14 – Resistências médias à flexão (MPa)	45
Tabela 4.15 – Resistências médias à compressão (MPa)	47
Tabela 4.16 – Resistividade média aos 28 dias	51
Tabela 4.17 – Resistividade média aos 56 dias	51
Tabela 4.18 – Áreas médias de carbonatação	55
Tabela 4.19 – Profundidade média de carbonatação das argamassas	56
Tabela 4.20 – Coeficiente de absorção capilar das argamassas ensaiadas	61
Tabela 4.21 – Diferença de potencial elétrico e duração do ensaio de migração	64
Tabela 4.22 – Profundidades médias de penetração de cloretos	68
Tabela 4.23 – Resumo de valores para o cálculo de D	69
Tabela 4.24 – Resistividade do ensaio de cloretos	70
Tabela 4.25 – Expansão média do ataque por sulfatos ao longo de 8 semanas	73
Tabela 4.26 – Expansão média para cada tipo de argamassa	81
Tabela 5.1 – Granulometria dos materiais	90

Tabela 5.2 – Comparação das análises químicas	91
Tabela 5.3 – Resumo das massas volúmicas dos ligantes usados.....	92
Tabela 5.4 – Tempos de início e fim de presa	93
Tabela 5.5 – Expansibilidade média	94
Tabela 5.6 – Trabalhabilidade média das argamassas	94
Tabela 5.7 – Resistências médias à flexão (MPa) e desempenho (%) das argamassas com SW	94
Tabela 5.8 – Resistências médias à compressão (MPa) e desempenho (%) das argamassas com SW	95
Tabela 5.9 – Requisitos de resistência à compressão (Adaptado da NP EN 197-1, 2012)	95
Tabela 5.10– Classes de pozolanicidade e respectivas composições do ligante da argamassa (Adaptada da norma NP 4220, 2015)	96
Tabela 5.11 – Índice de atividade das pozolanas	96
Tabela 5.12 – Resistividade média aos 28 dias.....	97
Tabela 5.13 – Resistividade média aos 56 dias.....	97
Tabela 5.14 – Área média de carbonatação e desempenho das argamassas SW.....	98
Tabela 5.15 – Coeficiente médio de absorção de água por capilaridade e desempenho.....	98
Tabela 5.16 – Apresentação de $D_{médio}$ e desempenho das argamassas.....	100
Tabela 5.17 – Expansão ao fim de 14 e 26 dias na solução de NaOH	100
Tabela 6.1 – Síntese dos resultados obtidos nos ensaios.....	104

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

σ – Desvio-padrão

μm – micrómetro

ASR (ou RAS, em português) Reação álcali-silica

ASTM – American Society for Testing and Materials

ATIC – Associação Técnica da Indústria de Cimento

Ca(OH)_2 – Hidróxido de cálcio

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

CEMUP – Centro de Materiais da Universidade do Porto

CEN – Comité Européen de Normalisation

CO_2 – Dióxido de carbono

CTL – Argamassa de controlo, com 100 % de cimento (0 % de substituição)

cv – Coeficiente de variação

DEC - Departamento de Engenharia Civil

D_{ns} – Coeficiente de difusão aparente

EDS – Energy Dispersive x-ray Spectrometer

EUA – Estados Unidos da América

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

FRS – Furnace Refractory Slag

LABEST – Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural

LEMC – Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NaCl – Cloreto de sódio

NaOH – Hidróxido de sódio

ONU – Organização das Nações Unidas

SEM – Scanning Electron Microscopy

SW – Slate Waste (pó de ardósia)

UE – União Europeia

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL

O conceito de desenvolvimento sustentável já sofreu alterações desde que foi definido, pela primeira vez no relatório Brundtland em 1987, da seguinte forma: “Desenvolvimento sustentável entende-se por desenvolvimento que satisfaz as necessidades atuais sem comprometer a capacidade das gerações futuras para satisfazerem as suas próprias necessidades”. De facto, desenvolvimento sustentável é um conceito muito mais amplo que só o da proteção ambiental. A preocupação pelas gerações futuras inclui a qualidade de vida e assim sendo, as problemáticas sociais, sanitárias, e éticas do bem-estar humano.

A 1 de janeiro de 2016 entrou em vigor a resolução da Organização das Nações Unidas (ONU) intitulada “Transformar o nosso mundo: Agenda 2030 de Desenvolvimento Sustentável”, constituída por 169 metas e agrupadas em 17 objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS17) que são os seguintes: erradicar a pobreza; erradicar a fome, alcançar a segurança alimentar, melhorar a nutrição e promover a agricultura sustentável; garantir acesso à saúde de qualidade e promover o bem-estar para todos, em todas as idades; garantir o acesso à educação inclusiva, de qualidade; alcançar a igualdade de género e empoderar todas as mulheres e raparigas; garantir a disponibilidade e a gestão sustentável da água potável e do saneamento para todos; energias renováveis e acessíveis; trabalho digno e crescimento económico; indústria e inovação e infraestruturas; reduzir as desigualdades; cidades e comunidades sustentáveis; produção e consumo sustentáveis; ação climática; proteger a vida marinha; proteger a vida terrestre; paz, justiça e instituições eficazes; parcerias para a implementação dos objetivos (UNRIC, 2016).

O termo “construção sustentável” foi proposto pela primeira vez pelo professor Charles Kibert em 1994 para descrever as responsabilidades da indústria da construção integrando os princípios da eco-eficiência com as condicionantes económicas, a equidade social e o legado cultural (iiSBE Portugal, 2011).

Em resumo, a construção sustentável tem como práticas base minimizar o uso de água e economizar a energia; assegurar a salubridade dos edifícios; maximizar a durabilidade dos edifícios; planejar a conservação e a manutenção dos edifícios; utilizar materiais eco-eficientes; apresentar baixa massa de construção; minimizar a produção de resíduos; apresentar custos de ciclo de vida menos elevados do que a construção convencional; garantir condições dignas de higiene e segurança nos trabalhos de construção (iiSBE Portugal, 2011).

1.2. GESTÃO DE RESÍDUOS E ECONOMIA CIRCULAR

Com todas as políticas aplicadas no controlo de emissões atmosféricas para a redução de emissão de gases de efeito de estufa e requisitos de qualidade nas diferentes indústrias, os resíduos têm sido a maior problemática ambiental, social e económica.

Em 2014, o total de resíduos gerados na União Europeia (UE) foi de cerca de 2503 milhões de toneladas. Na figura 1.1 pode ser observada a comparação entre os anos de 2004 e 2014, onde de um modo geral há um decréscimo da quantidade de resíduos gerados por habitante.

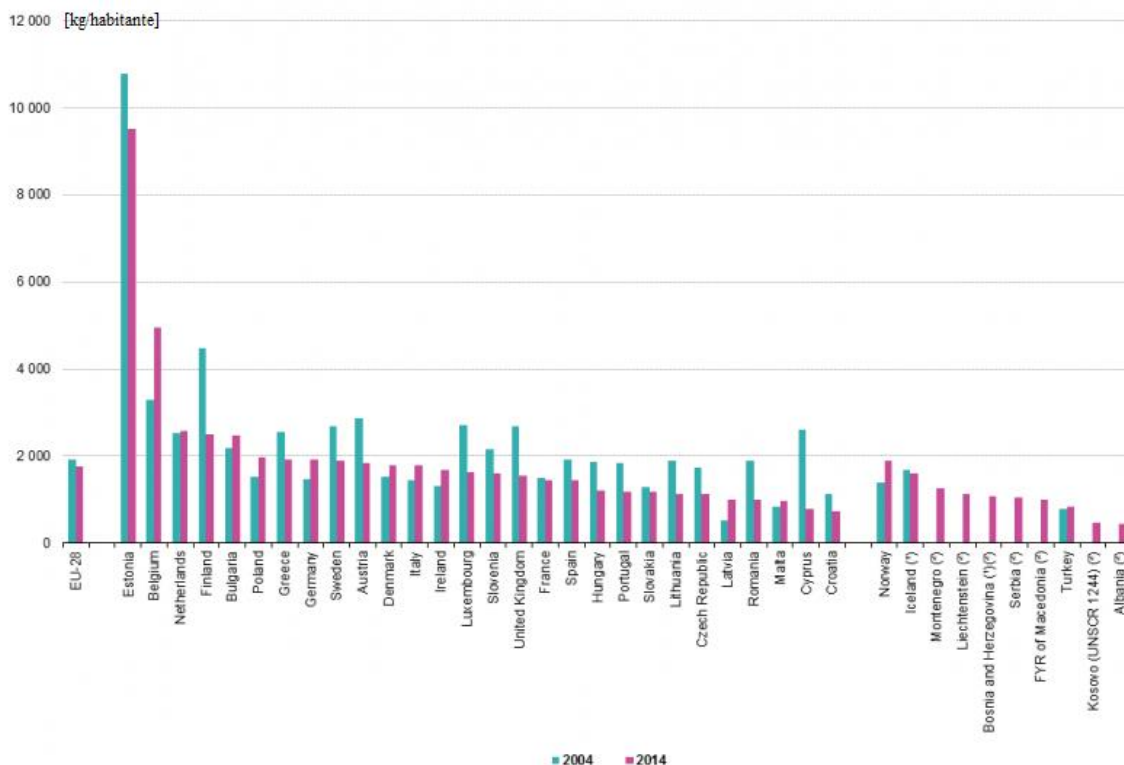


Figura 1.1 – Resíduos gerados, excluindo os principais resíduos minerais, em 2004 e 2014 (Adaptado de EUROSTAT, 2014)

Na figura 1.2. apresenta-se o gráfico com a percentagem de resíduos gerados por atividade económica e por agregados familiares na UE em 2014, e onde se pode observar que o setor da construção contribuiu com 34 % do total. Segundo as estatísticas da EUROSTAT de 2012, num total de mais de 2515 milhões de toneladas, Portugal contribuiu com cerca de 14184 toneladas de resíduos, o que representa cerca de 0,6%.

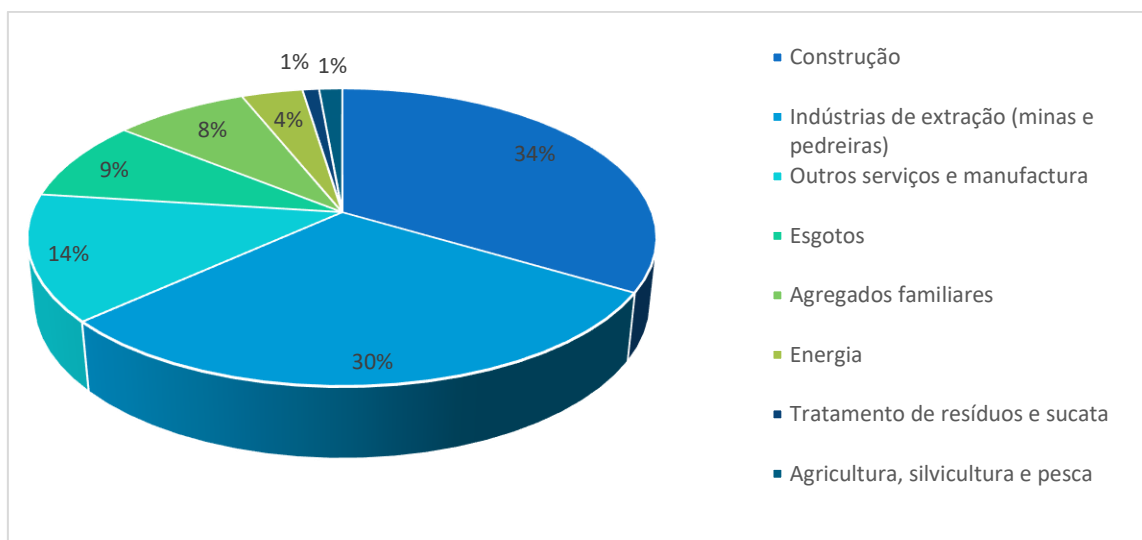


Figura 1.2 - Percentagem de resíduos na UE em 2014 por atividade (Adaptado de EUROSTAT, 2014)

O elevado desenvolvimento industrial e aumento do consumo tem levado a um intenso debate acerca da crescente escassez de recursos e produção de resíduos, o que se torna cada vez mais uma ameaça ao planeta. O modelo de negócio “Economia Circular” permite desassociar o crescimento económico da geração de resíduos e visa a proteção ambiental, prevenção da poluição e desenvolvimento sustentável. Assim, sob este modelo, os recursos são utilizados com maior eficiência, reutilizados e reciclados quando possível, abordagem que integra uma produção mais limpa na ecologia industrial (Leal, 2015).

A Comissão Europeia apresentou, em dezembro de 2015, um pacote de medidas sobre economia circular que inclui medidas visando a produção, o consumo, a gestão de resíduos, o mercado de matérias-primas secundárias, a inovação e o investimento, e uma série de propostas legislativas restritas ao caso particular da gestão de resíduos (Fernandes, 2016)

Pretende-se assim aumentar a competitividade da economia europeia nos limites da capacidade ambiental onde o valor dos produtos, materiais e recursos se mantém na economia o máximo de tempo possível e a produção de resíduos reduzida ao mínimo (Fernandes, 2016).

1.3. INDÚSTRIA CIMENTEIRA

O cimento é uma das substâncias fabricadas pelo homem mais utilizadas no planeta. A cada ano, aproximadamente 450 kg de cimento são consumidos por cada ser humano.

Produzir cimento é um processo com consumo intensivo de energia e recursos, gerador de impactos globais e locais. Reconhecendo que a indústria cimenteira é responsável por cerca de 5 a 8 % das emissões antropogénicas de dióxido de carbono (CO₂), algumas companhias de cimento promoveram a Iniciativa para a Sustentabilidade do Cimento (CSI – Cement Sustainability Initiative) em 1999, um programa patrocinado pelos seus membros, do Conselho Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (World Business Council for Sustainable Development – WBCSD) (Iniciativa para a Sustentabilidade do Cimento, 2012).

Em 2014, as emissões de CO₂ geradas pelos combustíveis fósseis e produção de cimento aumentaram para cerca de 35,9 gigatoneladas de CO₂, valor 60 % acima das emissões de 1990. A China contribui com 27 % das emissões, os EUA 15 %, a UE 10 % e a Índia 7 % (WRI, 2015).

Face a esta situação, as melhores estratégias a tomar pela indústria cimenteira para reduzir as emissões de CO₂ associada à produção de cimento são:

- Aumentar a eficiência energética usando combustíveis alternativos (como por exemplo pneus, plásticos e óleo usado) ou combustíveis fósseis com menores emissões de CO₂;
- Reduzir a quantidade de clínquer no fabrico de cimento utilizando adições minerais alternativas nomeadamente: as pozolanas naturais, cinzas volantes, sílica de fumo, escórias de alto-forno, metacaulino, cinzas de casca de arroz, xisto cozido, e outros, e aumentar o uso de cimentos compostos na construção.

1.4. OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DO PLANO DE TRABALHOS

Esta dissertação pretende contribuir para a sustentabilidade na construção estudando o uso do resíduo de pó de ardósia como substituto parcial do cimento e o uso do resíduo “Escórias e restos de refratários de fundição” como agregado, avaliando as suas influências em pastas e argamassas e assim contribuir para a Economia Circular.

Este trabalho foi estruturado em seis capítulos.

O *capítulo 1* onde se apresenta o enquadramento da construção nas problemáticas ambientais referindo considerações sobre construção sustentável e economia circular.

No *capítulo 2* (Estado da Arte) apresentam-se as considerações gerais sobre a ardósia em Portugal e as noções base de durabilidade para o desenvolvimento do trabalho.

No *capítulo 3* (Escórias e restos de refratários de fundição, FRS) explica-se a origem do resíduo, e apresenta-se o curto procedimento experimental e conclusões sobre a sua viabilidade.

No *capítulo 4* (Procedimentos e Resultados experimentais) começa-se por caracterizar os dois materiais mais importantes, o cimento e o resíduo pó de ardósia. Apresentam-se também as metodologias e o procedimento experimental para os ensaios com pastas e argamassas, assim como os resultados obtidos.

O *capítulo 5* (Discussão de resultados) inclui a comparação e o desempenho das argamassas com resíduo pó de ardósia face às argamassas de controlo.

Por o último, no *capítulo 6* (Conclusões e Desenvolvimentos Futuros) descrevem-se as conclusões e sugestões para futuros desenvolvimentos.

2

ESTADO DA ARTE

2.1. A ARDÓSIA

As rochas metamórficas podem ser classificadas consoante a sua textura e podem ser agrupadas em rochas foliadas, como é o caso da ardósia e do xisto, ou em não foliadas, como é o caso do mármore.

O que diferencia as rochas metamórficas é o seu grau de metamorfismo, que quanto mais baixo, menores foram os níveis de pressão e temperatura correspondentes aos seus processos de formação.

A ardósia de grau de metamorfismo baixo é caracterizada por ser uma rocha de grão muito fino composta por grãos microscópicos de micas e resultante do argilito e xisto argiloso. O xisto, rocha metamórfica mais comum, distingue-se por grãos visíveis e pode resultar do mesmo tipo de metamorfismo que a ardósia, mas de grau mais intenso.

Estes tipos de rochas metamórficas já há muito tempo que são usadas com diferentes finalidades na construção civil sendo de salientar o seu valor estético em decorações interiores e exteriores, a durabilidade e facilidade de manutenção.

2.1.1. CARACTERIZAÇÃO GEOGRÁFICA DE EXPLORAÇÕES DE ARDÓSIA

A indústria das rochas ornamentais (extração e transformação) é uma das mais antigas atividades económicas nacionais. O subsector das rochas ornamentais compreende extração e transformação de três grandes grupos de pedra natural, “mármore e outras rochas carbonatadas”, “granito e rochas similares” e ainda “ardósias e xistos ardosíferos”.

De acordo com o OEC (The Observatory of Economic Complexity) e como é possível ver na figura 2.1, referente a dados até 2015, a ardósia é uma rocha exportada por vários países do mundo.



Figura 2.1 – Países que exportaram ardósia até 2015 (Adaptado de OEC)

Os cinco maiores exportadores são França (19,0 %), China (17,0 %), Espanha (16,0 %), Índia (11,0 %) e Brasil (6,0 %). Na tabela 2.1 são apresentados as percentagens e ganhos (USD), correspondentes a um total de \$79,1M, para os dez países que mais exportaram ardósia.

Tabela 2.1 – Dez países que mais exportaram ardósia em 2015 (Adaptado de OEC)

Países	% de ardósia exportada	Valor das exportações (\$M)
França	19,0	15,20
China	17,0	13,40
Espanha	16,0	12,5
Índia	11,0	8,89
Brasil	6,0	4,71
Portugal	4,8	3,80
Reino Unido	4,1	3,24
Alemanha	3,2	2,57
Itália	2,8	2,20
Grécia	2,0	1,59

Em Portugal, a ardósia pode ser encontrada na zona norte nos concelhos de Valongo (xisto de cor cinzento azulada a cinzenta escura e de clivagem xistenta nítida), Arouca e Mondim de Basto, que são do tipo apresentado nas figuras 2.2, 2.3, e 2.4 respetivamente. Também no concelho de Vila Nova de Foz Côa há presença de ardósia, embora seja uma ardósia diferente (fig.2.5), por já ter um grau de metamorfismo ligeiramente maior por vezes com brilho e ondulação, pelo que pode ser designada por ardósia de Foz Côa ou como xisto negro de Foz Côa.



Figura 2.2 – Ardósia de Valongo



Figura 2.3 – Ardósia de Arouca



Figura 2.4 – Ardósia de Mondim de Basto

Dentro da classe dos xistos, que podem ser considerados como de grau médio de metamorfismo, e portanto mais elevado que a ardósia, podem apresentar uma superfície lisa ou com ligeira ondulação e brilhante, sendo por vezes possível visível a presença de minerais. Podem ser encontrados mais a sul de Portugal no Alentejo, designados como xisto de Mourão (fig.2.6) no concelho de Mourão e Xisto de Barrancos (fig.2.7) no concelho de Barrancos.



Figura 2.5 – Ardósia de Foz Côa



Figura 2.6 – Xisto de Mourão



Figura 2.7. – Xisto de Barrancos

Na figura 2.8, apresenta-se a localização geográfica de ardósia e xistos em Portugal continental.

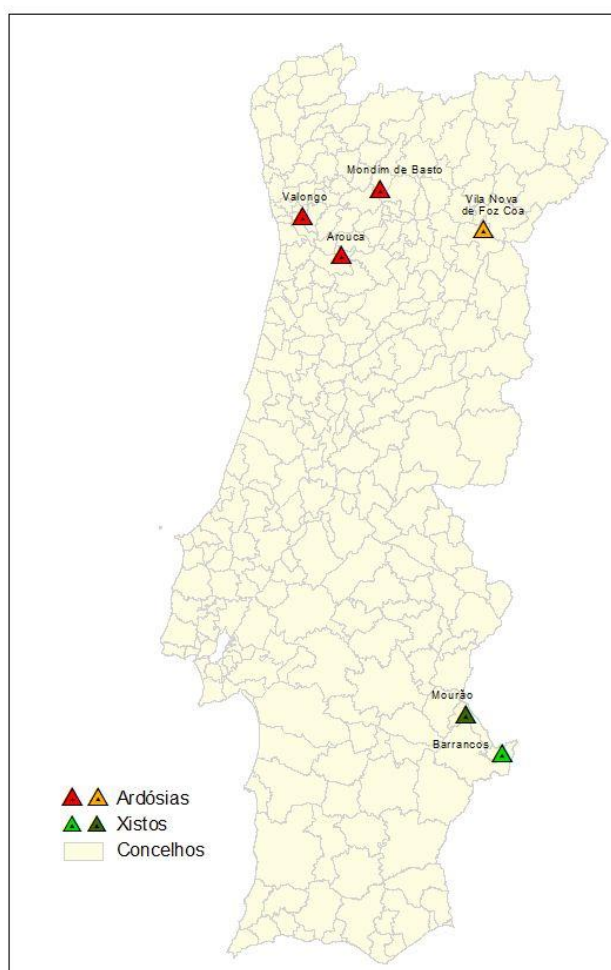


Figura 2.8 – Ardósias e xistos em Portugal (Ilustrado pela Eng^a. Mariana Brandão)

2.1.2. ARDÓSIA DE VALONGO

O Anticlinal de Valongo representa uma importante estrutura geológica na zona norte de Portugal Continental que abrange os concelhos de Gondomar, Valongo e Paredes, e é uma estrutura com flancos assimétricos e orientados com direção a noroeste-sudeste.

Valongo é uma área de exploração de minerais não metálicos como o carvão (antracite) e rochas industriais e/ou ornamentais (ardósias), onde a indústria da exploração de ardósia se encontra principalmente na freguesia de Campo, sendo um dos motores da economia do concelho.

Pela tipologia de afloramento geológico, tem uma relevância enquanto interesse científico, mas que não é puramente geológico, havendo estudos sobre a fauna do afloramento de rochas incluídas no Sistema Devónico (Domingos, 2014), assim como do ponto de vista hidrogeológico das unidades litoestratigráficas do Anticlinal de Valongo, entre outros (Gonçalves, 2013).

Fora as diversas ações de estudo, foi implementado em 1998 o projeto de geoconservação em parceria entre a Câmara Municipal de Valongo e a Faculdade de Ciências do Porto, com a criação do Parque Paleozóico de Valongo. (Anexo IV - Fichas de caracterização, 2015)

2.1.3. ESTUDOS REALIZADOS COM RESÍDUOS DE ARDÓSIA

A ardósia é mundialmente conhecida e são vários os usos conhecidos como por exemplo pelo fabrico de telhas, pelos antigos quadros escolares, revestimentos de paredes, para tampos e bancas de cozinhas ou de laboratórios, mesas de bilhar e pelo seu uso ornamental em geral, entre outros produtos.

Como é normal numa exploração deste tipo de rochas, são várias as problemáticas relacionadas com o ambiente, mas a de principal foco atualmente são os resíduos gerados desde a extração até à obtenção do produto final.

Alguns estudos têm vindo a ser feitos para incentivar a economia circular nas indústrias de rochas ornamentais, potencializando os resíduos de ardósia, nomeadamente os seguintes:

- *Ardósia como matéria prima para cerâmica* (Oliveira, Rodrigues, e Artur, 2000)

Do 44º Congresso Brasileiro de Cerâmica, a publicação em questão é referente ao estudo de resíduos de ardósia, que mostraram potencial para o fabrico de cerâmicos vermelhos. Para tal foram realizados ensaios de análise química, análise mineralógica por difração de raios-X e caracterização das propriedades: cor de queima, absorção de água, porosidade aparente, resistência mecânica à flexão, retração de queima e massa específica aparente. Os resultados indicaram o benefício de ardósia no fabrico de materiais cerâmicos.

- *Obtenção de compósitos de resíduos de ardósia e polipropileno* (Oréfice, Mansur, e de Carvalho 2007)

Estudo sobre a possibilidade de utilização de resíduos de ardósia como reforço em matrizes poliméricas, para tal, resíduos de ardósia na forma de pó foram misturados a polipropileno. Para aumentar afinidade química entre as partículas inorgânicas e o polímero foi também utilizado anidro maleico como reagente. Os resultados deste estudo mostraram a viabilidade de uso de partículas de ardósia em matrizes poliméricas.

- *Propostas de aproveitamento de resíduos de ardósia da cidade de Pompéu, Minas Gerais* (de Kássia Rodrigues, 2015)

Descreve a possibilidade de se obter novas matérias-primas nas áreas da construção civil como por exemplo, como agregado para betão reduzindo a extração de areia e brita ou uso em forma de pó para composição de pavimento asfáltico em vias de baixo volume de tráfego. A ardósia pode também ser utilizada no cimento como componente da farinha de cru para a fabricação do clínquer, ou na forma de brita fina, em substituição da argila empregada para a mesma função, citando (CARRUSCA, 2001 apud KISTEMANN E CHIOLDI, 2014, p. 83.). É também relatado o potencial da ardósia como fertilizante alternativo para reflorestamento ou como uso corretivo do solo.

- *Estudo da reatividade do resíduo de ardósia como adição em matrizes cimentícias* (Toledo, 2016)

Neste estudo recente, para a possibilidade de adição mineral em matrizes de cimento Portland do resíduo de ardósia, foram analisadas as características químicas por ensaios de granulometria laser, fluorescência e difração de Raios-X do resíduo e, análise térmica da pasta de cimento com 35 % de substituição de cimento por pó de ardósia após 28 dias de cura. É também apresentado um estudo da atividade pozolânica do resíduo segundo a norma ABNT NBR 5751 (2012), bem como a eficiência da sua utilização.

Note-se que este resíduo ainda não foi muito estudado tendo-se encontrado os estudos acima referidos.

2.2. MICROSCOPIA ELETRÓNICA DE VARRIMENTO (MEV)

Os materiais de base cimentícia possuem uma microestrutura heterogénea e que se altera ao longo do tempo pelo que a sua observação a microscópio eletrónico de varrimento complementada pelas análises por difração de Raios-X poderá fornecer informação suplementar.

Em relação a material em pó, por exemplo cimento, é possível observar a forma e dimensão das partículas e conhecer elementos químicos da composição através dos espectros. Já em pastas ou argamassas o método permite avaliar a disposição forma e outras características dos constituintes.

Os microscópios eletrónicos de varrimento permitem a observação de imagens numa vasta gama de ampliações à qual se pode associar uma análise química de amostras. Para o exame SEM / EDS, realizado no CEMUP, foi utilizado o microscópio eletrónico de varrimento ambiental (figura 2.9), de alta resolução (Schottky), com microanálise por Raios-X e análise de padrões de difração de elétrons retrodifundidos Quanta 400FEG ESEM / EDAX Genesis X4M.

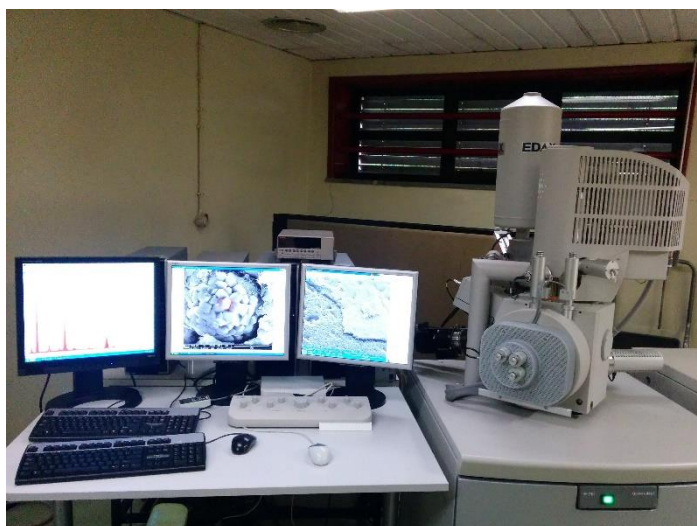


Figura 2.9 – Microscópio eletrónico de varrimento ambiental - CEMUP

As imagens são formadas por um feixe de elétrons que incidem na amostra, “varrendo-a”. Assim sendo, apresentam diferentes características dependendo da amplificação do sinal obtido da interação da difração com a amostra.

Na obtenção das imagens, os feixes de elétrons são originários de elétrons retrodifundidos (“electron backscatter diffraction” - EBSD) em baixo e alto vácuo e de elétrons secundários (“secondary electrons” - SE) em baixo vácuo (“large field detector” - LFD) ou em alto vácuo (“Everhart-Thornley detector” - ETD).

2.3. INDICADORES DE DURABILIDADE

A durabilidade do betão, em geral, é definida pela capacidade que a estrutura (de betão armado ou pré-esforçado) de que faz parte, tem de resistir a ataques físico-mecânicos, químicos e/ou biológicos sem que isso afete o seu funcionamento em serviço e, sem ter que recorrer a operações de manutenção e reabilitação.

Os principais fatores que influenciam a qualidade, e garantem uma maior ou menor durabilidade da estrutura do betão, definindo a sua natureza e rede porosa, são resumidamente o projeto estrutural, os materiais, a execução e a cura. Um bom desempenho reflete a sua durabilidade pelas noções de segurança (e por sua vez de resistência), funcionalidade e aspeto.

Para estudar resíduos como adição cimentícia, de modo a prever o seu comportamento em betão, é necessário em primeiro lugar conhecer o material caracterizando-o e em seguida, antes de o incorporar em betão, levar a cabo um estudo experimental em argamassas. Este estudo inicial em argamassas permite conhecer a influência da utilização do resíduo em causa em termos de resistências mecânicas e sobretudo na durabilidade.

Assim, para controlo de qualidade das argamassas contendo o resíduo, neste caso de ardósia, foram produzidas e estudadas em laboratório uma série de provetes de argamassa tendo sido avaliados indicadores de resistência e durabilidade, que se passam sucintamente a descrever.

2.3.1. RESISTIVIDADE ELÉTRICA

O uso da resistividade elétrica no betão como indicador da maior ou menor facilidade de corrosão das armaduras em estruturas de betão armado para comprovar a durabilidade, apresenta-se como uma opção muito válida porque se tem demonstrado a sua relação com aspetos relevantes da durabilidade de estruturas. Além disso, é uma técnica de ensaio de baixo custo, não destrutivo, de fácil aplicação e rápida resposta. (Silva, Ferreira, e Figueiras, 2012).

A resistividade varia com diversos fatores, tais como a temperatura; o teor de humidade do betão; o tipo e dosagem de cimento; a razão água/ligante; o grau de hidratação da pasta cimentícia; a estrutura porosa, i.é, o tamanho e conectividade dos poros e a presença de fibras metálicas (Coutinho, 2014).

Assim, a resistividade fornece indicações sobre a conectividade dos poros e, portanto, sobre a resistência do betão à penetração de substâncias líquidas ou gás, podendo correlacionar-se com a resistência à compressão e indicadores de durabilidade, como é o caso do coeficiente de migração de cloretos.

2.3.2. CARBONATAÇÃO ACELERADA

Em betão armado, ou pré-esforçado, há uma especial atenção ao efeito da carbonatação, uma vez que o CO_2 vai reagindo, na presença de humidade com minerais do cimento hidratado, podendo dar início à corrosão generalizada.

A carbonatação desenvolve-se progressivamente a partir do betão exposto ao CO_2 para o seu interior, e a velocidade de carbonatação é influenciada por diversos fatores como as condições de exposição e concentração de CO_2 , e também da permeabilidade do betão e do teor de hidróxido de cálcio.

À medida que se vai processando a carbonatação do betão, o hidróxido de cálcio na pasta de cimento hidratada vai-se transformando em carbonato de cálcio de pH mais baixo e, portanto, a carbonatação do betão, inicialmente são e de pH cerca de 12,5, tem como consequência uma diminuição da alcalinidade que pode ir até valores abaixo de 9 quando o betão passa a estar totalmente carbonatado (Coutinho, 2005).

2.3.3. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

A absorção de água por capilaridade é um dos mecanismos fundamentais de penetração de água através do betão de recobrimento. De facto, a maior parte das estruturas de betão armado ou pré-

esforçado está sujeita a, sobretudo, fenómenos de absorção de água ciclicamente causados essencialmente pela chuva. A água, além de poder ser nociva à estrutura alimentando o fenómeno de corrosão, funciona também como meio de transporte de agentes agressivos nela dissolvidos (Silva, 2010).

Em relação à absorção capilar propriamente dita, este mecanismo é muito importante relativamente à maioria das obras em betão na medida em que constitui um dos mecanismos preponderantes na entrada de água. Difere da permeação e absorção por imersão, pois não é causada por gradientes hidráulicos (Coutinho, 2005).

Em qualquer tipo de ensaio de absorção por capilaridade verifica-se que a absorção é elevada se os capilares são maiores e mais lenta se são de dimensões mais reduzidas e, portanto, poder-se-á inferir da qualidade do mesmo (Coutinho, 2005).

2.3.4. RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS

Os cloretos podem alcançar e corroer de forma localizada as armaduras podendo ser de origem externa, como na exposição a ambientes marítimos ou quando em contacto com sais descongelantes, ou por origens internas.

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 (Pinto, 2013).

Em geral, a penetração de cloretos resulta da combinação de vários mecanismos sendo um deles predominante. No caso de o betão ser suficientemente compacto e não ter fissuras é o fenómeno da difusão o mais importante (Coutinho, 2005).

2.3.5. RESISTÊNCIA AO ATAQUE POR SULFATOS

O ataque por sulfatos, que se enquadra nos fenómenos de degradação química do betão resulta, em geral, da reação entre o ião sulfato com os aluminatos de cimentos, formando-se sulfoaluminato tricálcico (etringite) e gesso, produzindo-se um significativo aumento de volume na presença da água. A presença de sílica e carbonato pode ainda conduzir à formação de um terceiro composto, a taumasite (Romano e Brito, 2012).

No estudo de durabilidade do ataque por sulfatos (Coutinho, 1999) lê-se que embora os cimentos Portland resistentes aos sulfatos, cimentos pozolânicos (mais de 30 % de pozolanas) e os cimentos com escórias (mais de 65 % de escórias de alto forno) são os que oferecem maior resistência aos sulfatos, embora não tornem o betão imune ao ataque por sulfatos em todas as situações e para qualquer concentração das soluções. De facto, todos os tipos de sulfatos levam à deterioração do betão de cimento Portland, mas o mecanismo e grau do ataque depende do tipo de sulfato presente.

2.3.6. REAÇÃO ÁLCALIS-SÍLICA (ASR)

As reações entre a sílica reativa (existente nos agregados) e os álcalis ativos do cimento são expansivas provocando fissuração, e assim, deteriorando a estrutura cimentícia podendo pôr em risco a sua durabilidade. Os álcalis de hidróxidos metálicos presentes na água da pasta de cimento atacam a sílica sob a forma reativa originando gel de silicatos alcalinos de várias composições. (Aroso, 2012).

Assim, a ASR desenvolve-se quando estão reunidas as três condições seguintes: uma alcalinidade suficientemente elevada da solução intersticial do betão, a existência de agregados reactivos com concentrações dentro duma gama crítica e humidade elevada (Neves, 2010).

2.4. ESTUDOS REALIZADOS COM SUBSTITUIÇÕES DE CIMENTO EM ARGAMASSAS PARA BETÃO

Vários estudos têm sido realizados de forma a reduzir o teor de cimento das argamassas, sem comprometer o seu comportamento, e trazendo vantagens pela diminuição dos custos de fabrico, consumo de energia das argamassas e criação de alternativas para os resíduos.

Internacionalmente, referem-se os estudos sobre os seguintes temas: valorização de resíduos pela sua ativação alcalina em produção de materiais cimentícios em (Bernal et al. 2016); vantagens no uso de cinzas volantes em cimentos contendo resíduos de combustão pozolânico: sílica de fumo, cinzas de lodo de esgoto, catalisador de leito fluidizado e cinza de casca de arroz (Payá et al. 2002); e o estudo das propriedades pozolânicas da sílica obtida da casca de arroz por processo químico e térmico (Salas et al. 2007).

Como exemplos de resíduos já estudados na FEUP tem-se o resíduo de vidro moído (GP), as cinzas de fundo das centrais de biomassa (WA), as cinzas volantes de biomassa (BFA), as cinzas de casca de arroz (RHA), os grifos da indústria da pasta de papel.

Recentemente na FEUP, estudou-se a aplicabilidade de resíduos de construção e demolição (CDW) como substituto parcial do cimento Portland, onde se concluiu que argamassas com 5 % de substituição de CDW apresenta melhor desempenho à expansão ASR e, como as perdas em geral para esta dosagem foram mínimas, poderá substituir o cimento em betão (Rocha et al., 2016).

Do grupo das rochas ornamentais, é de referir o estudo realizado na FEUP com lamas de granito como substituto parcial do cimento em argamassas. O programa experimental incluiu análises químicas, análises granulométricas a laser e MEV, bem como ensaios de resistência mecânica e ensaios de durabilidade para diferentes misturas de 5 e 10 % de substituição do cimento por pó de granito moído. Concluiu-se nesse trabalho que, se finamente moído, o pó de granito pode originar uma matriz cimentícia mais densa, melhorando a durabilidade (Ramos et al., 2013).

3

ESCÓRIAS E RESTOS DE REFRAATÁRIO DE FUNDIÇÃO, FRS

3.1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo apresenta-se um breve estudo preliminar em que se pretendeu avaliar a viabilidade de utilização de um resíduo, “Escórias e restos de refratário de fundição”, resíduo esse gerado pela empresa FERESPE que produz peças técnicas para aplicações de elevada exigência, em vários tipos de aços, sobretudo inoxidáveis.

A indústria metalúrgica em Portugal começou a destacar-se a partir do século XIX, mas com maior expressão no século XX, sendo que, nos dias de hoje são várias as empresas que exploram este sector.

Em Portugal, no que toca ao comércio internacional de exportação de bens (FOB – Free On Board), que resumidamente significa que só no local de entrega o comprador toma posse do produto sendo responsável pelo seu transporte (Ballou,1999), são apresentados na tabela 3.1 os dez maiores grupos de produtos exportados, num total de 17 analisados pelo INE, dados publicados no Boletim Mensal de Estatística de Março de 2017.

Tabela 3.1 – Descrição de exportação de bens (FOB) - Adaptada do INE

	Valores Mensais (10 ³ EUR)				Variação homóloga Fev. (%)
	Fev. (2017)	Jan. (2017)	Dez. (2016)	Nov. (2016)	
Total geral (de 17 grupos)	4388761	4379453	4079317	4685085	9,0
Top 10 de produtos:					
Máquinas e aparelhos	662820	688528	613437	771966	11,6
Veículos e outro material transporte	497723	484084	408852	505087	-3,9
Combustíveis minerais	368130	355157	364721	299918	86,1
Plásticos e borrachas	334616	329753	269582	343388	4,8
Metais comuns	328867	348997	311452	357135	10,6
Agrícolas	273168	268456	309756	384991	21,6
Outros produtos	270358	260737	228539	276648	-0,6
Vestuário	263683	282106	252115	267306	-2,5
Químicos	216996	221584	236949	242287	
Minerais e minérios	207676	186251	184993	210421	18,4

O resíduo “Escórias e restos de refratário de fundição” é gerado numa indústria de fundição e enquadra-se no grupo de metais comuns com um valor em Fevereiro de 2017 de 328867 €, o que representa cerca de 7,5 % do total exportado nesse mês pelos 17 grupos analisados pelo INE, e de acordo com o estudo referido anteriormente.

Apresenta-se seguidamente o estudo realizado relativamente ao resíduo “Escórias e restos de refratário de fundição” recolhido na FERESPE, incluindo a sua origem, o procedimento experimental e as respetivas conclusões.

3.2. ORIGEM E DEFINIÇÃO DO RESÍDUO FRS

Partindo de sucata como matéria prima (fig.3.1), escolhida consoante o tipo de aço a produzir, dá-se início ao processo de fundição de materiais ferrosos, para produção de peças de ferro e de aço.



Figura 3.1 – Matéria prima de fundição: sucata variada



Figura 3.2 – Processos de fundição (acima adaptada da FERESPE), e após o processo de fundição (abaixo)

A mistura metálica de composição adequada é fundida em pequenos fornos (fig.3.2) forrados a material refratário e depois vazada para os moldes de areia, dando a origem a diversos tipos de peças como produto final. De todo este processo surgem dois tipos de resíduos, finos e escórias.

- Resíduo fino:

Para o processo de fundição por moldação de areia, esta é inicialmente misturada com dosagem controlada de resinas e catalisadores em misturadores do tipo Omega Foundry Machinery, com capacidade para 20 t/h cada. Segue-se a moldação manual ou mecanizada. Depois da desmoldação (figura 3.3), toda a areia é sujeita a uma regeneração mecânica e térmica (em regenerador térmico do tipo Omega Foundry Machinery Ltd), donde cada 10 % de areia regenerada é reutilizada numa nova mistura.

O resíduo fino advém da regeneração térmica da areia, ou seja, são os finos captados nos sistemas de despoeiramento, que são armazenados (fig.3.4) e posteriormente depositados em aterros com classificação de resíduo não perigoso. É gerada uma quantidade de cerca de 250 t/ano.



Figura 3.3 – Molde de areia usado



Figura 3.4 – Armazenagem de finos de despoeiramento

- Escórias e restos de refratário de fundição:

O material refratário, material que reveste os fornos e que mantém a sua resistência a altas temperaturas após um certo número de ciclos de fundição, degrada-se sendo então necessário substituí-lo. Gera-se assim material refratário degradado contendo restos de metais. Este resíduo designa-se por restos de refratário de fundição e é classificado como resíduo inerte.

O resíduo escória de fusão (fig.3.5) é um produto de oxidação de elementos metálicos presentes no metal líquido que se formam durante o processo de fusão, que pelas suas características físicas precipitam e têm que ser removidas da superfície do metal líquido.



Figura 3.5 – Resíduos escória de fusão



Figura 3.6 – Recolha do material FRS

O resíduo “Escórias e restos de refratário de fundição” é, portanto, uma mistura destes dois resíduos de fusão, que será designado como FRS (Furnace and Refractory Slag), e que foram recolhidos aleatoriamente do contentor de armazenamento ilustrado na figura 3.6. É gerada uma quantidade de cerca de 50 t/ano de FRS, numa relação de FRS/material fundido de 5 %.

3.3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Considerando a eventualidade de o FRS poder vir a ser utilizado como agregado em betão, começou-se por pretender estudar o seu efeito em argamassa, como substituto total de areia. Assim, preparou-se o FRS de modo a se obter uma granulometria equivalente à areia normalizada CEN para posterior produção de argamassa e comparação com argamassa normalizada.

O resíduo FRS visualmente apresenta cor escura e define-se com uma superfície irregular cortante, por conter vestígios de metal não fundido, pelo que houve um especial cuidado no manuseamento e também na escolha dos métodos a utilizar em laboratório.

3.3.1. PREPARAÇÃO DO FRS

Colocou-se uma amostra de FRS a secar durante aproximadamente 22 horas a 110 °C. Após esse período, com recurso a um martelo (figura 3.7), foram dadas as pancadas necessárias até se atingir uma granulometria próxima da granulometria da areia CEN (figura 3.8).



Figura 3.7 – Amostra de FRS seco



Figura 3.8 – Amostra de FRS tratada

3.3.2. PENEIRAÇÃO DO FRS

Após a redução de dimensão descrita, considerou-se uma amostra inicial de FRS de massa 10677,8 g, e procedeu-se a uma peneiração mecânica com o agitador indicado na figura 3.9 durante cerca de 1 minuto, seguido de peneiração manual até se obter o material retido acumulado nos diferentes peneiros. Na figura 3.10 está apresentado o material que ficou retido nos peneiros de malha quadrada e de aberturas de 2,00 mm, 1,60 mm, 1,00 mm, 0,50 mm, 0,16 mm, 0,08 mm, e ainda o fundo.



Figura 3.9 – Agitador mecânico



Figura 3.10 – Resultado de peneiração manual

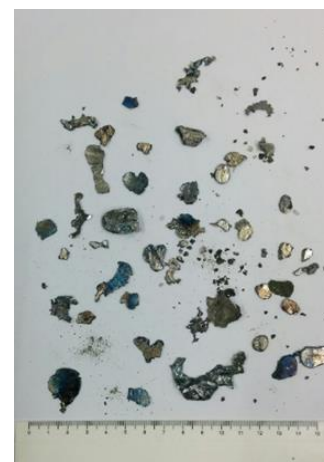


Figura 3.11 – Restos metálicos

Na tabela 3.2 estão apresentadas as massas (g), acumuladas em cada peneiro, por aberturas de malha (mm) correspondentes.

Tabela 3.2 – Resultado dos processos de peneiração

Peneiração de amostra de FRS de 10677,8 g		
Abertura da série de peneiros (mm)	Massa acumulada por peneiro (g)	% de FRS acumulada
2,00	2231,3	21
1,60	1209,0	11
1,00	2089,4	20
0,50	1824,8	17
0,16	1871,5	18
0,08	821,6	8
Fundo	614,0	6

3.3.3. Limpeza do material ferroso

Uma vez que na composição granulométrica da areia CEN só contabiliza o material acumulado a partir do peneiro 1,60 mm, e portanto, podendo-se excluir o material obtido no peneiro 2,00 mm para a composição granulométrica desejada, passou-se uma vistoria ao material moído.

Por terem sido detetados diversos tipos de restos metálicos (fig.3.11), decidiu-se espalhar o material acumulado já peneirado e passar um íman, desde o peneiro 1,60 mm até o fundo (perfazendo uma amostra de 8430,3 g) como exemplificado na figura 3.12.

Inicialmente o íman vinha com material agarrado (fig.3.13), pelo que se passou as vezes necessárias até que tal não acontecesse.



Figura 3.12 – Espalhamento exemplo de material para passagem do íman



Figura 3.13 – Material ferroso agarrado ao ímã

Quando se terminou este processo de limpeza, avaliou-se a massa de material ferroso retirado desde o peneiro de abertura 1,60 mm até o fundo inclusivé, registando-se um valor de 46,8 g de restos metálicos. Em relação a esta parte da amostra, concluiu-se que cerca de 0,6 % do FRS é material ferroso a rejeitar no estudo que se pretende.

Em relação à percentagem de restos metálicos, na norma NP EN 12620:2002+A1 (2010) de agregados para betão, é possível classificar os tipos de agregados reciclados grossos pelos seus constituintes. Neste caso, estamos perante uma situação designada por X+Rg (onde “X” é referente a diversos materiais ferrosos e não ferrosos, e o “Rg” é referente ao vidro) em que pela percentagem de massa, os 0,6 % recolhidos encontram-se no intervalo de 0,5 % a 1 % do total, e estão incluídos na categoria XRg1.

3.3.4. TRABALHABILIDADE DA ARGAMASSA COM FRS

A fase seguinte consistiria em produzir provetes de argamassa com substituição total da areia CEN por FRS com a mesma granulometria e, no processo, avaliar a sua trabalhabilidade.

Assim, após a separação do material ferroso, procedeu-se à constituição de 1350 g de FRS tomando as quantidades necessárias de cada uma das frações já peneiradas de modo a obter uma granulometria idêntica à granulometria da areia CEN. Produziram-se, então, uma argamassa de controlo e uma segunda argamassa com FRS, de composição idêntica à normalizada, de acordo com a tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Quantidades nas amassaduras das argamassas

Materiais	CTL	FRS
Areia CEN (g)	1350	-
FRS (g)	-	1350
Água (g)	225	225
CEM I 42,5 R (g)	450	450

Verificou-se que a amassadura com FRS não apresentou qualquer coesão, com aspeto de uma mistura de areia molhada como se pode observar na figura 3.14.



Figura 3.14 – Aspeto da amassadura com o substituto FRS

3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS RELATIVAMENTE AO RESÍDUO FRS

Tendo-se obtido uma trabalhabilidade inadequada para o FRS sem (ou quase sem) resíduos metálicos, considerou-se que o trabalho de estudo da possibilidade de uso de FRS como agregado para betão, seria dado como interrompido, nesta fase muito preliminar de avaliação.

Assim, em termos de estudos futuros, sugere-se que:

- Se examine a quantidade de FRS produzido a nível nacional para decidir sobre a viabilidade do estudo na medida em que 50 t/ano parece ser um valor muito reduzido;
- Se considerem as várias hipóteses de investigação de FRS, com e sem a separação do resíduo metálico que é reciclável;
- Se estude a viabilidade técnica de uso de FRS em betão, quer a nível de resistências, quer, sobretudo, de durabilidade;
- Se realize um estudo económico das soluções viáveis tecnicamente considerando a economia circular.

4

PROCEDIMENTOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1. INTRODUÇÃO

O trabalho apresentado teve como objetivo fulcral determinar a viabilidade do uso do resíduo pó de ardósia, que será designado como SW (Slate Waste), como substituto parcial do cimento em produção de argamassas, de forma a prever, no futuro, o seu comportamento em betão.

Neste capítulo começa-se por descrever os materiais utilizados durante o trabalho, incluindo as características físicas e químicas dos dois principais materiais, o SW e o cimento utilizado. Em seguida apresenta-se a caracterização de pastas e argamassas de controlo, com incremento de SW na composição, e os respetivos ensaios realizados.

Em cada ensaio são descritos o procedimento experimental e equipamentos utilizados, a norma seguida, de um modo geral, e os resultados obtidos.

4.2. MATERIAIS UTILIZADOS

4.2.1. ÁGUA

Todo o fabrico de pastas e argamassas, e a maior parte das soluções deste trabalho, foram realizados com água destilada existente no LEMC (fig.4.1) a uma temperatura ambiente de cerca de (20 ± 2) °C. Para a cura dos provetes, e restantes ensaios e soluções, utilizou-se água potável o que se enquadra na norma EN 196-1 (2016) – Methods of testing cement.



Figura 4.1 – Água destilada e utensílios utilizados

4.2.2. AREIA NORMALIZADA CEN

A areia normalizada CEN segundo a norma EN 196-1 (2016), e de acordo com a ISO 679: 2009, apresenta uma granulometria entre os intervalos indicados na tabela 4.1.

Sendo a granulometria da areia uma das propriedades mais importantes na resistência das argamassas, usou-se sempre areia CEN para que não fosse mais um fator de influência no caso de estudo.

Tabela 4.1 – Composição granulométrica da areia normalizada CEN

Abertura do peneiro (mm)	2,00	1,60	1,00	0,50	0,16	0,08
Resíduo no peneiro (%)	0	7 ± 5	33 ± 5	67 ± 5	87 ± 5	99 ± 1

Esta areia natural siliciosa de partículas arredondadas, constituída com pelo menos 98 % de sílica, é comercializada em sacos com (1350 ± 5) g como o apresentado na figura 4.2.



Figura 4.2 – Saco de areia CEN comercializado



Figura 4.3 – Adjuvante Sika ViscoCrete 3005

4.2.3. ADJUVANTE

O adjuvante superplastificante (SP) usado para conseguir manter uma adequada trabalhabilidade nas argamassas com maiores percentagens de substituição parcial de cimento e com razão A/C constante, foi o Sika ViscoCrete 3005 (fig.4.3) cuja ficha técnica se apresenta em Anexos. Os dados técnicos da Sika referentes a este produto são os indicados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Dados técnicos Sika ViscoCrete 3005 (Sika)

Dados técnicos (Sika)
Base química: solução aquosa de policarboxilatos modificados
Massa volúmica: 1,05 ± 0,02 kg/dm ³ (a temperatura de +23 ± 2 °C)
pH (23 ± 2 °C): 4,0 ± 1,3%
Teor de sólidos: 26,0 ± 1,3%
Teor em cloretos: ≤ 0,1%

4.2.4. CIMENTO UTILIZADO

Para a produção das argamassas e pastas optou-se pela utilização do cimento CEM I 42,5 R produzido pela SECIL segundo a NP EN 197-1 (2012), e que é composto por pelo menos 95% de clínquer e os restantes 0% a 5% de componentes adicionais minoritários. Por se tratar de um cimento com baixa percentagem de outros componentes para além do clínquer, torna-se o mais indicado para estudar o efeito do SW como ligante cimentício.

Representada na figura 4.4 está o aspeto de uma amostra de cimento.



Figura 4.4 – Amostra de cimento

Os dados das tabelas 4.3 e 4.4 referentes aos ensaios físicos e ensaios mecânicos respetivamente, são valores médios de resultados de autocontrolo do cimento realizado pela SECIL, em 16/12/2016, e que pode ser consultada na ficha técnica em Anexos.

Tabela 4.3 – Ensaio físicos (SECIL)

Ensaio Físicos		Mês	Ano
Peso específico (g/cm ³)		3,12	3,12
Resíduo peneiração	45 m	5,31	2,77
	32 m	-	9,20
Superfície específica Blaine (cm ² /g)		3508	3729
Água na pasta normal (%)		27,9	28,3
Tempo presa (min)	Início	173	179
	Fim	226	269
Expansibilidade		0,7	0,7
Índice de reflectância - Y (0 a 100)		26	28

Tabela 4.4 – Ensaio mecânicos (SECIL)

Idade (d)	Resistência à Flexão (MPa)		Resistência à compressão (MPa)	
	Mês	Ano	Mês	Ano
2	5,6	5,5	30,8	31,2
7	7,5	7,6	45,8	48,1
28	8,8	8,6	55,9	58,8

4.2.5. ORIGEM DO RESÍDUO PÓ DE ARDÓSIA (SW)

O resíduo pó de ardósia (SW – Slate Waste) foi cedido pela empresa ELV de Valongo, e é um material fino resultante dos processos de corte e polimento em fábrica.

A ardósia da “Pedreira da Milhária” ilustrada na figura 4.5, actualmente é extraída em blocos de rocha por um processo mecanizado em exploração a céu aberto localizada perto da fábrica da ELV.



Figura 4.5 – Pedreira da Milhária em Campo, Valongo



Figura 4.6 – Corte de blocos em fábrica

Blocos mais pequenos são depois cortados consoante o fim a que se destinam (fig.4.6), sendo de seguida aplicados processos de acabamento manual, de polimento, até se obter o produto final em placas para telhados, chão de ardósia ou mesas de bilhar (fig.4.7).



Figura 4.7 – Fábrica da empresa ELV

Como o SW já é um material fino não foi feito nenhum acerto à sua granulometria. Na figura 4.8 apresenta-se uma figura da amostra do resíduo SW usado.



Figura 4.8 – Amostra de SW

4.3. CARACTERÍSTICAS DO CIMENTO E DO SW

4.3.1. GRANULOMETRIA E MEV

Foram realizados ensaios para a determinação da granulometria do cimento e do SW, por difração laser no Departamento de Química da FEUP, tendo-se obtido os resultados da tabela 4.5 e respectivas curvas granulométricas do cimento e do SW nas figuras 4.9 e 4.10.

Tabela 4.5 – Granulometria do cimento e do SW

Material	d_{10} (μm)	d_{50} (μm)	d_{90} (μm)	$d_{\text{médio}}$ (μm)
CEM I 42,5 R	0,74	10,13	33,76	10,13
SW	2,38	11,14	49,39	11,14

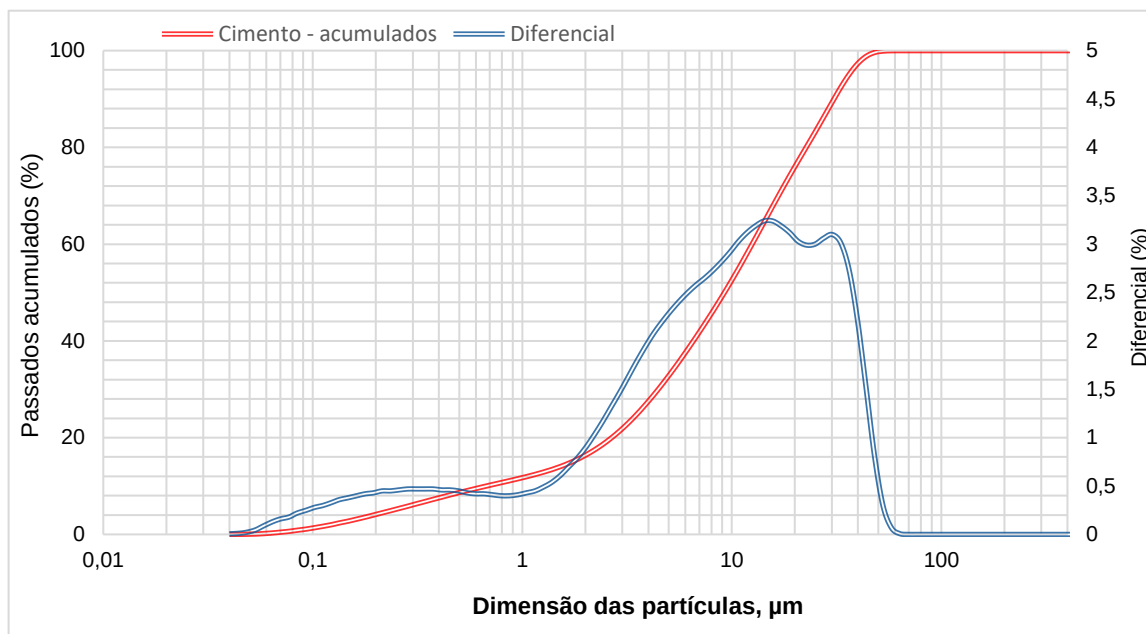


Figura 4.9 – Curva granulométrica do cimento

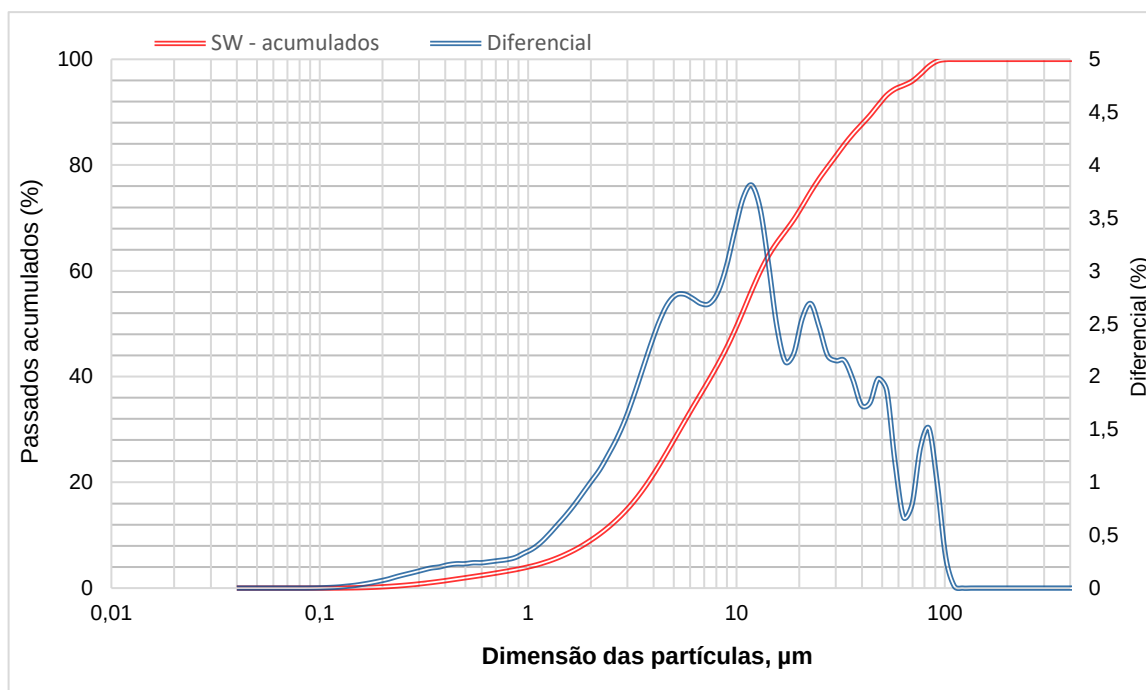


Figura 4.10 - Curva granulométrica do SW

As figuras 4.11 e 4.12 ilustram a dimensão de algumas partículas do cimento e do SW, respectivamente, visualizadas em MEV e ampliadas 500 vezes. Da mesma zona observada, as amostras de cimento e SW foram ainda ampliadas 1000 e 5000 vezes, correspondendo o cimento às figuras 4.13 e 4.15 e o SW às figuras 4.14 e 4.16.

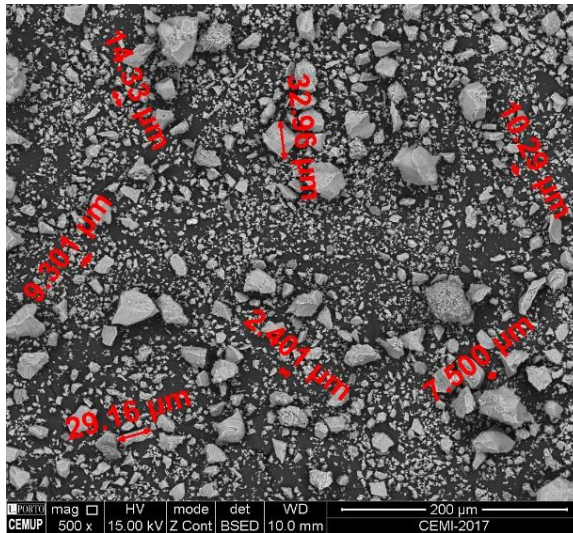


Figura 4.11 – Dimensões de partículas do cimento

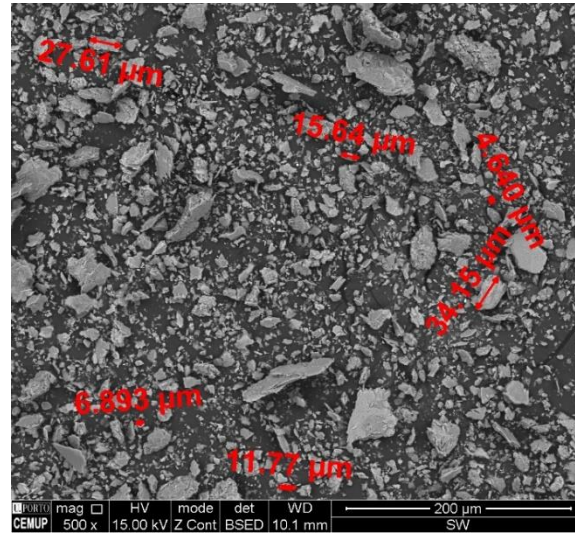


Figura 4.12 – Dimensões de partículas do SW

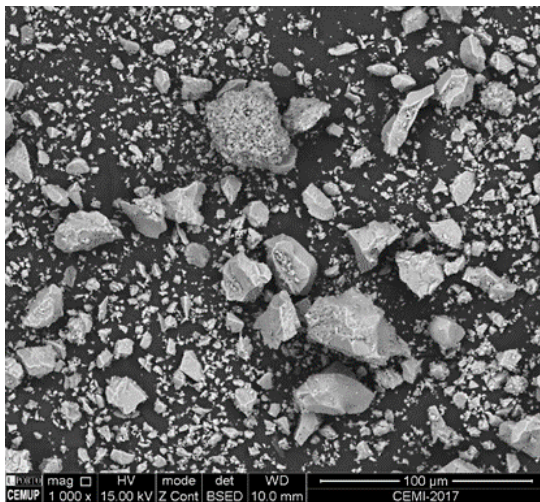


Figura 4.13 – Amostra de cimento aumentada 1000 vezes

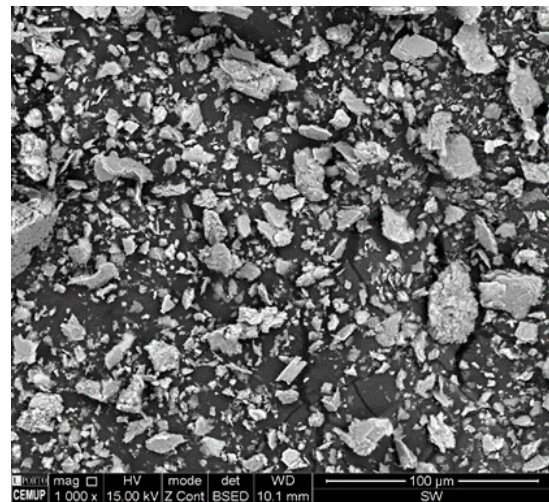


Figura 4.14 – Amostra de SW aumentada 1000 vezes

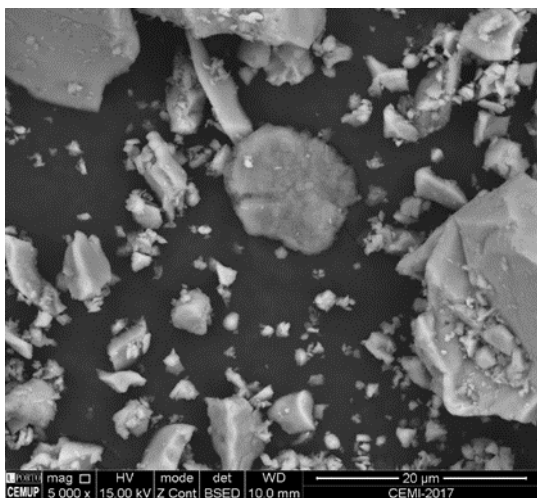


Figura 4.15 – Amostra de cimento aumentada 5000 vezes

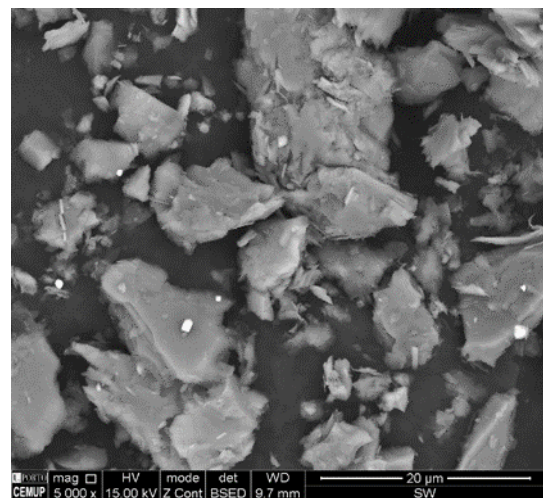


Figura 4.16 – Amostra de SW aumentada 5000 vezes

4.3.2. ANÁLISE QUÍMICA DOS LIGANTES E ESPECTROMETRIA POR RAIOS-X EM MEV

Também do documento em Anexos, do autocontrolo da SECIL, é possível analisar os valores médios por ano, no boletim de análises químicas de Dezembro de 2016.

A caracterização do resíduo SW foi pedida ao Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) tendo sido realizada uma análise por Fluorescência de Raios-X (FRX) das percentagens de elementos maiores existentes. A análise correspondeu a uma análise semi-quantitativa e análise de cloretos solúveis realizada em HNO_3 por argentometria. Na tabela 4.6 apresentam-se todos estes resultados.

Tabela 4.6 – Comparação da análise química do cimento e do SW

Elementos (%)	Cimento (SECIL)	SW
Óxido de silício (SiO_2)	20,47	52,34
Óxido de alumínio (Al_2O_3)	4,22	24,77
Óxido de ferro (Fe_2O_3)	3,27	9,25
Óxido de manganês (MgO)	-	0,08
Óxido de cálcio (CaO)	63,33	0,45
Óxido de magnésio (MgO)	1,88	2,15
Óxido de sódio (Na_2O)	0,19	1,10
Óxido de potássio (K_2O)	0,62	3,29
Dióxido de titânio (TiO_2)	-	1,11
Óxido de fósforo (P_2O_5)	-	0,19
Perda ao fogo	2,45	5,01
Sulfatos (SO_3)	3,08	0,29
Cloretos	0,06	0,03
Resíduo insolúvel	0,93	-
Cal livre	-	-

Em MEV foi também feita uma caracterização química por Raios-X sobre o SW em duas zonas identificadas na figura 4.17 como Z1 e Z2 e com os espectros correspondentes na figura 4.18 e 4.19.

Distinguem-se claramente as elevadas percentagens de oxigénio, sílica, alumínio, potássio e vestígios significativos de sódio, magnésio e ferro, que vão de encontro aos resultados apresentados na tabela 4.6.

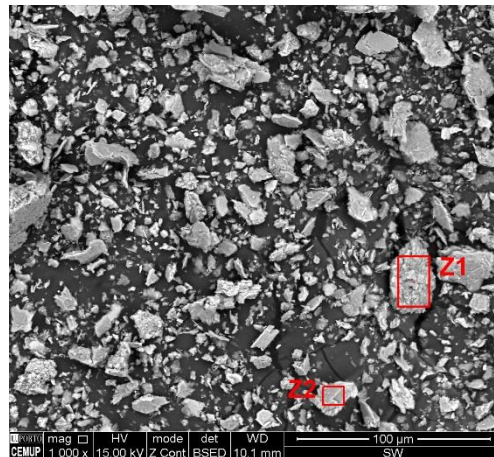


Figura 4.17 – Partículas numa amostra de SW a analisar

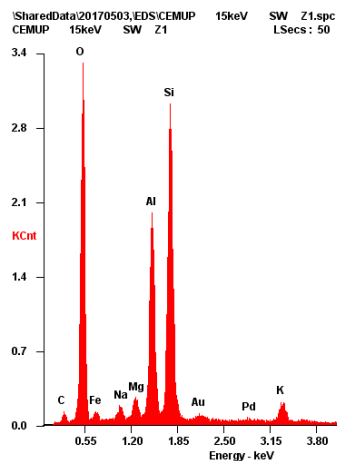


Figura 4.18 – Espectro da zona Z1 da fig.4.17

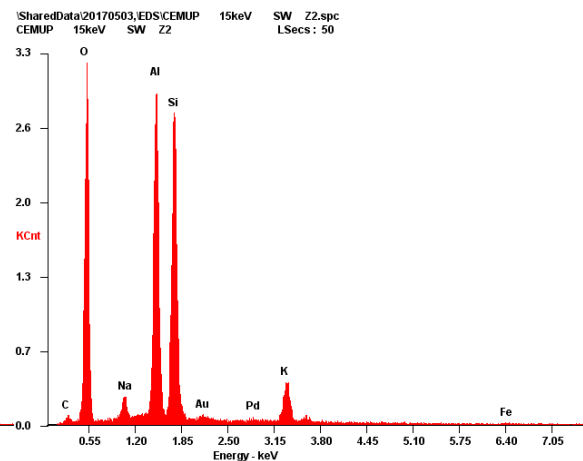


Figura 4.19 – Espectro da zona Z2 da fig.4.17

4.3.3. POZOLANICIDADE

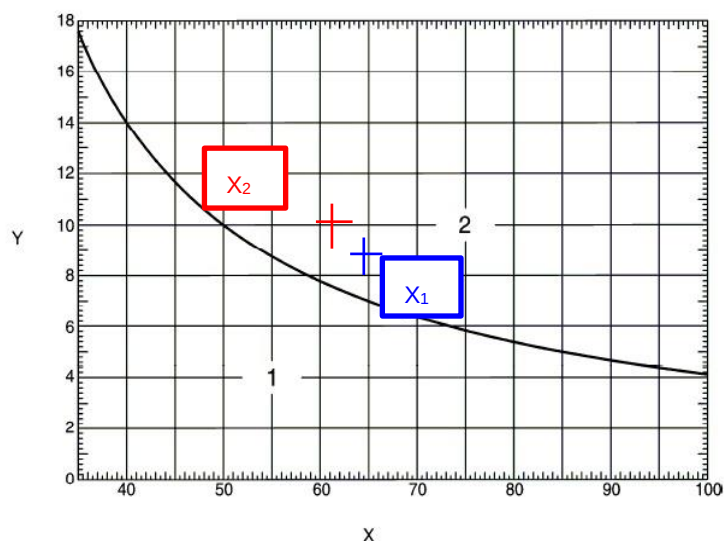
A pozolanicidade, segundo a norma NP EN 196-5 (2011), é determinada comparando a concentração de ião cálcio, expresso em óxido de cálcio, presente na solução aquosa em contacto com o cimento hidratado depois de um determinado tempo, com a quantidade de ião cálcio que faz saturar uma solução da mesma alcalinidade. A amostra satisfaz o ensaio (zona 1 ilustrada na figura 4.20), isto é, corresponde a um resultado positivo, se a concentração de ião cálcio na solução for inferior à concentração da saturação.

Para testar a pozolanicidade da ardósia procedeu-se à análise de duas amostras, uma composta por 5 % de SW e 95 % de CEM I 42,5 R e que é identificada como amostra SW5 (ilustrada pelo ponto X₁ na figura 4.20), e a segunda amostra por 20 % de SW e 80 % de CEM I 42,5 R, identificada por SW20 (ponto X₂).

Para ambos os ensaios realizados pelo LSRE (Laboratório de Processos de Separação e Reação – Laboratório de Catálise e Materiais) o resultado foi o apresentado na tabela 4.7, e foi negativo, havendo um afastamento relativamente à curva de saturação ligeiramente maior da amostra X₂ em relação à X₁.

Tabela 4.7 – Resultados da pozolanicidade

Parâmetros	Amostra: SW5 (X_1)	Amostra: SW20 (X_2)
Iões hidróxilos OH^- (mmol/L)	64,4	61,5
Óxido de cálcio CaO (mmol/L)	9,3	10,6



Legenda:

1 satisfaz

2 não satisfaz

X concentração em ião hidroxilo, mmol/l

Y concentração em ião cálcio (expresso em óxido de cálcio), mmol/l

X_1 – Referência SW5

X_2 – Referência SW20

Figura 4.20 – Diagrama para a determinação da pozolanicidade e identificação de X_1 e X_2

4.3.4. ENSAIO DE MASSA VOLÚMICA

A massa volúmica do CEM I 42,5 R e do resíduo SW foram determinadas segundo as especificações do LNEC E-64 (1979), e de acordo com o requerido na norma NP EN 196-6 (2010), exigindo-se a realização de dois ensaios por material resultando num valor de massa volúmica expresso como a média desses resultados.

Começou-se por se colocar o material em estufa a uma temperatura de 110°C , até ficar com massa constante, tendo-se depois deixado arrefecer em ambiente controlado. Entretanto verificou-se se a temperatura do líquido auxiliar, petróleo, se encontrava em equilíbrio com o ambiente da sala do laboratório a cerca de $20 \pm 2^\circ \text{C}$.

Introduziu-se então o líquido auxiliar, com recurso a um funil, no voluminímetro até o primeiro nível assinalado onde é medida e registada a primeira leitura (V_1) (figura 4.21). De seguida, introduziu-se parte do material no voluminímetro, e rodou-se a mistura para retirar o ar. É então necessário que a temperatura estabilize e só depois se realiza a segunda leitura (V_2) do volume da mistura do líquido auxiliar com o material.

Na figura 4.22 estão representados os dois voluminímetros dos ensaios com SW que se apresentam com coloração acinzentada e com o cimento CEM I 42,5 R de cor avermelhada.

Figura 4.21 – Momento de registo de V_1 

Figura 4.22 – Ensaio de massa volúmica

A partir do cálculo da massa volúmica em (g/cm^3), pela expressão (4.1), obtiveram-se os resultados indicados na tabela 4.8, onde o cimento apresenta uma massa volúmica superior.

$$\rho = \frac{m}{V_2 - V_1} \quad (4.1)$$

Onde:

ρ é a massa volúmica do material (g/cm^3);

m é a massa da amostra em gramas;

V_1 é o primeiro valor lido no voluminímetro contendo apenas o líquido auxiliar, em cm^3 ;

V_2 é o segundo valor lido no voluminímetro com o líquido auxiliar e o material, em cm^3 .

Tabela 4.8 – Determinação das massas volúmicas dos ligantes

Material	Massa (g)	V_1 (cm^3)	V_2 (cm^3)	Massa volúmica (g/cm^3)
CEM I 42,5 R	65,0	0,4	21,2	3,13
SW – amostra 1	60,0	0,5	21,9	2,80
SW – amostra 2	59,1	0,6	21,6	2,81

4.3.5. ENSAIO BLAINE

Após a determinação da massa volúmica dos materiais, procedeu-se à realização do ensaio com parte das mesmas amostras de cimento e de SW anteriormente preparadas.

O ensaio Blaine, ou método de permeabilidade ao ar, tem como objetivo a determinação da superfície específica dos materiais, com o equipamento apresentado na figura 4.23, e foi realizado segundo a norma NP EN 196-6 (2010).



Figura 4.23 – Equipamento para o ensaio Blaine

Deu-se início ao procedimento após a medição da temperatura e humidade relativa da sala do laboratório garantindo que a primeira estaria entre $20 \pm 2^\circ \text{C}$ e a segunda fosse menor que 65 %. Sabendo a massa volúmica, calculou-se a quantidade de massa necessária para realizar este ensaio e recolheu-se essa quantidade de massa numa amostra, que foi agitada manualmente durante dois minutos e de seguida esteve dois minutos em repouso.

Posteriormente colocou-se dentro da célula um disco perfurado sobreposto por um filtro de papel, seguido do material a ensaiar (figura 4.24), e ainda sobre este um segundo filtro de papel. De forma a compactar a camada introduziu-se um pistão que, comprimido, tem que encostar na célula.



Figura 4.24 – Introdução do material a ensaiar

No caso do resíduo SW, com porosidade semelhante à usada para o cimento de $0,500 \pm 0,005$ o ensaio não pôde ser realizado uma vez que não era possível formar uma camada compacta, ou seja, o pistão que forma a camada a ensaiar não chega a encostar na célula, como é possível observar na figura 4.25.

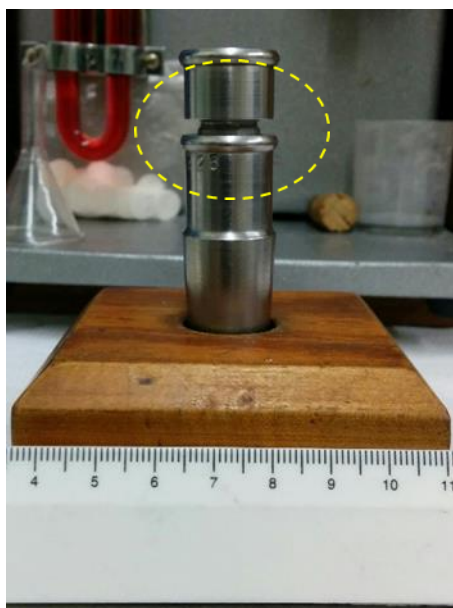


Figura 4.25 – Impossibilidade de formar camada com amostra de SW

No cimento passou-se para o passo seguinte do procedimento de colocar a célula no manómetro e garantir a estanquidade da junta com colocação de massa lubrificante (figura 4.26).



Figura 4.26 – Colocação da célula no manómetro

Registaram-se então os valores do tempo que o ar demorou a atravessar a camada dentro da célula. Neste trabalho realizaram-se dois ensaios para o cimento.

A superfície específica, S , do cimento CEM I 42,5 R foi de $4041 \text{ cm}^2/\text{g}$, calculada através da expressão (4.2).

$$S = \frac{52,43 \times K \times \sqrt{t}}{\rho} \quad (4.2)$$

Onde:

S é a superfície específica em cm^2/g

K é a constante do aparelho ($K = 23,11$)

t é a média do tempo medido em segundos ($t = 109 \text{ s}$)

ρ é a massa volúmica do cimento CEM I 42,5 R ($\rho = 3,13 \text{ g/cm}^3$)

4.4. ENSAIOS COM PASTAS DE CIMENTO

4.4.1. FABRICO DAS PASTAS DE CIMENTO

De modo a poder avaliar o tempo de presa e a expansibilidade foram compostas duas pastas, uma constituída só com cimento e outra com adição de SW (SW_p), segundo a norma NP EN 196-3 (2017). Na tabela 4.9 são apresentadas as respetivas composições usadas.

Tabela 4.9 – Composição das pastas ensaiadas

Pasta	Água (g)	Cimento (g)	SW_p (g)
Cimento	138	500	-
SW5	141	450	50

O fabrico das pastas seguiu o procedimento esquematizado na figura 4.27, e foi realizada no misturador da figura 4.28.

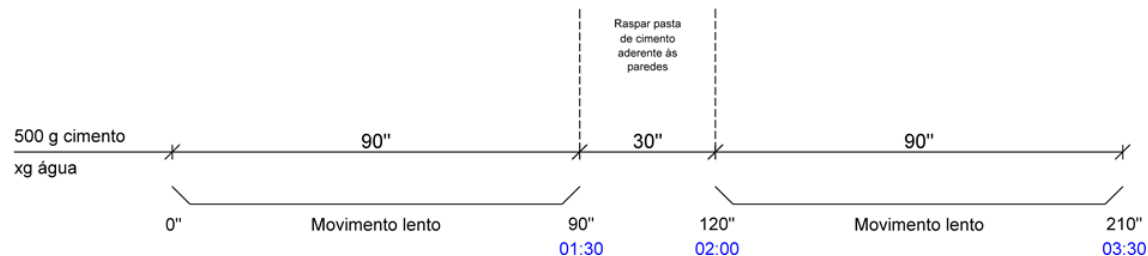


Figura 4.27 – Procedimento do fabrico de pastas (Coutinho, 2002)

4.4.2. CONSISTÊNCIA E TEMPO DE PRESA

Para determinar a quantidade de água a usar em cada pasta seguiu-se um processo iterativo, até atingir um resultado dentro do limite imposto, em que para resultados acima do limite se teria de acrescentar mais água, e com resultados inferiores seria necessário diminuir a quantidade de água na pasta.

Avaliar a consistência de uma pasta pode ser avaliar a resistência à penetração de uma sonda. Para tal, realizou-se um ensaio de penetração com o aparelho de Vicat manual, segundo a norma NP EN

196-3 (2017), de modo a que a distância entre a base de vidro do molde e a sonda fosse de 6 ± 2 mm.

Quanto à determinação do tempo de presa, este foi realizado no aparelho de Vicat automático (fig.4.29). O molde preenchido com pasta é sujeito a uma picada de 5 em 5 minutos e à medida que a pasta começa a ganhar presa, a profundidade da picada vai diminuindo até finalizar o ensaio (fig.4.30).



Figura 4.28 – Misturadora usada no fabrico de pastas



Figura 4.29 – Aparelho de Vicat manual à esquerda e automático à direita



Figura 4.30 - Aspeto final da pasta endurecida

A norma NP EN 196-3 (2017) define o início de presa como o tempo decorrido entre o “instante zero”, e o tempo ao fim do qual a distância entre a agulha e a placa de base é de (6 ± 3) mm). Já o fim de presa é definido como o tempo desde o “instante zero” até o momento em que a agulha penetra pela primeira vez apenas 0,5 mm na pasta.

Os resultados que se encontram na tabela 4.10 são em relação à razão água/cimento (w/c) para a pasta CTL e da relação água/(cimento+SW) designada como ($w/(c+sw)$) usada no fabrico da pasta SW_p , aos tempos de início e fim de presa das pastas e a diferença dos tempos de início de presa (IP) e para o fim de presa (FP) da pasta SW_p em relação à pasta CTL.

Tabela 4.10 - Tempos de presa das pastas

Pasta	w/c e w/(c+sw)	Consistência normal (mm)	Tempo de início de presa	Diferença em relação ao CTL (IP)	Tempo de fim de presa	Diferença em relação ao CTL (FP)
CTL	0,28	7	2h37min	-	3h37min	-
SW _p	0,28	7	2h47min	+ 10 min	3h22min	- 15 min

4.4.3. EXPANSIBILIDADE

A expansibilidade das pastas foi realizada segundo o procedimento experimental descrito na norma NP EN 196-3 (2017).

Preencheram-se com a pasta os moldes de Le Châtelier, e entre duas placas de vidro oleadas são colocados imersos num tabuleiro de água a temperatura ambiente de 20 ± 1 °C (fig.4.31). Passadas 24 horas os moldes são retirados e, um a um, é feita a primeira medição (fig.4.32) do afastamento entre as agulhas (leitura A).



Figura 4.31 – Início do ensaio de expansibilidade



Figura 4.32 – Leitura do afastamento das agulhas

De seguida os moldes foram transferidos para o equipamento (fig. 4.33) que permite o aquecimento da água até ao ponto de ebulição, onde se mantêm durante 3 horas. Após esse tempo realizou-se a segunda medição dos afastamentos das agulhas (leitura B). E a terceira e última leitura (leitura C) ocorre depois de os moldes arrefecerem à temperatura ambiente.



Figura 4.33 – Moldes em água quente

Das leituras A, B e C dos afastamentos das agulhas nas diferentes ocasiões do ensaio, foi possível determinar a médias das expansibilidades que são apresentadas na tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Expansibilidade das pastas

	Cimento		SW5	
Leituras	1	2	1	2
A: antes da ebulição	18	22	13	19
B: após ebulição	20	24	14	20
C: após arrefecimento	20	24	14	20
Diferença C-A	2	2	1	1
Média da diferença C-A	2		1	

4.5. ARGAMASSAS

4.5.1. COMPOSIÇÃO

As quantidades dos constituintes para o fabrico dos quatro tipos de argamassas realizadas foram as apresentadas na tabela 4.12, onde CTL corresponde à argamassa de controlo constituída por 100% de cimento. Como em quase todos os ensaios se realizaram duas amassaduras de controlo serão designadas no restante trabalho por CTL₁ e CTL₂. A argamassa SW5 contém 5% de SW como substituição de cimento, SW20 + SP com 20% de substituição e uso de superplastificante (SP) e por fim os provetes do tipo SW40 + SP com 40% de SW e também SP.

Tabela 4.12 – Quantidades para as amassaduras das argamassas

Componentes	CTL	SW5	SW20 + SP	SW40 + SP
CEM I 42,5 R (g) - Cimento	450	427,5	360	270
SW (g)	-	22,5	90	180
Areia (g)	1350	1350	1350	1350
Água (g) - W	225	225	225	225
Superplastificante- SP (g)	-	-	1,5	3
Razão W/C	0,500	0,526	0,625	0,833
Razão W/Ligante	0,500	0,500	0,500	0,500
Razão SP/C	-	-	0,00417	0,01111

4.5.2. FABRICO DOS PROVETES

Os provetes CTL e SW5 foram realizados com o procedimento de acordo com a norma EN 196-1 (2016). Como os provetes SW20 + SP e SW40 + SP (que se passarão a designar abreviadamente por SW20 e SW40, respetivamente) contêm adição de adjuvante, foram produzidos com um procedimento idêntico diferindo apenas no final, em que em vez de perfazer um total de 4 minutos estendeu-se o tempo de amassadura até aos 7 minutos (acrécimo de 3 min em movimento rápido), esquematizado na figura 4.34. Este prolongamento foi realizado não só para que ficasse bem homogeneizada, mas também para garantir o efeito do superplastificante.

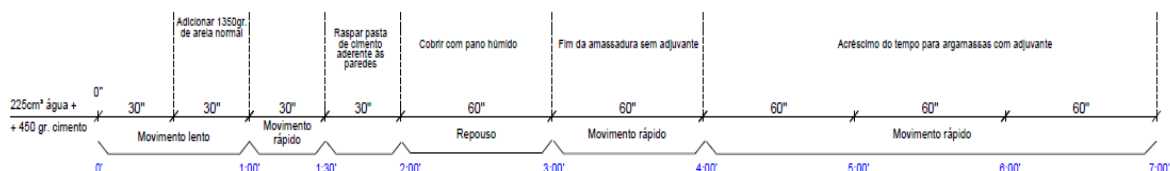


Figura 4.34 – Procedimento de fabrico das amassaduras (Adaptado de Coutinho, 2002)

Nas argamassas com adições de resíduo SW, este foi misturado inicialmente com o cimento (exemplo na figura 4.35) e só depois junto com a água para iniciar a amassadura na misturadora da figura 4.37. Quando utilizado, o SP, este era acrescentado à água (figura 4.36).



Figura 4.35 – Mistura de cimento e ardósia



Figura 4.36 – Massa de água mais SP



Figura 4.37 - Misturadora

É de salientar, que antes da colocação da argamassa nos moldes se garantiu que estes estivessem devidamente oleados para que no dia seguinte se tornasse mais fácil a desmoldagem dos provetes.

O processo de moldagem dos provetes é diferente de ensaio para ensaio no que diz respeito ao tipo de molde e compactação da argamassa como pode ser observado na figura 4.38.

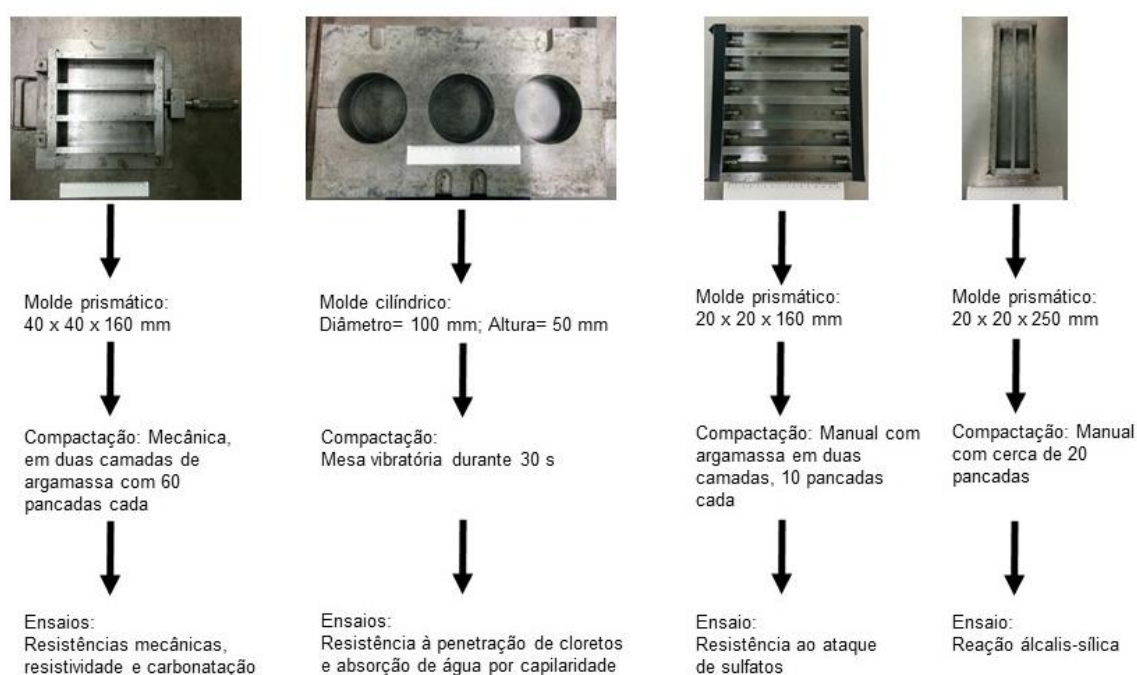


Figura 4.38 – Esquema de moldagens realizadas

Nos provetes para o ensaio de absorção de água por capilaridade e de penetração de cloretos (realizados com o mesmo molde) foi necessário realizar duas amassaduras seguidas. Enquanto se realizava a segunda amassadura, a primeira ficava coberta com um pano húmido, e para uma melhor homogeneização da argamassa a sua mistura era feita na misturadora durante mais 30 segundos em modo lento. Com a quantidade de amassadura que sobrava da moldagem para o ensaio dos cloretos, utilizava-se a restante para moldar os provetes para os ensaios de resistência aos sulfatos.

Durante todo o trabalho, de cada vez que se realizava uma amassadura também se realizava o ensaio de trabalhabilidade para detetar quaisquer erros que pudessem estar relacionados com a pesagem dos materiais, e para que as argamassas com adições estivessem sempre dentro dos limites estipulados em relação à argamassa de referência dos provetes CTL.

4.5.3. ENSAIOS DE TRABALHABILIDADE

Como se sabe a trabalhabilidade do betão fresco é uma propriedade fundamental na tecnologia do betão, pelo que cada aplicação requiere uma trabalhabilidade adequada.

De todas as vezes que era feita uma argamassa esta era ensaiada em relação à sua trabalhabilidade, seguindo a norma ASTM C1437-5 (2015), na mesa apresentada na figura 4.39, que está de acordo com o descrito na norma ASTM C230/230 M (2014).

Antes de se realizar o ensaio humedeceu-se a mesa e o molde troncocónico que foi depois centrado. A argamassa foi colocada em duas camadas, onde cada uma foi compactada com 20 pancadas para encher o molde de uma forma mais uniforme. Rasou-se o material excedente e removeu-se o molde, realizando de seguida um espalhamento de 25 pancadas com a manivela da mesa de espalhamento durante 15 segundos. Por fim mediram-se três diâmetros, onde a média designada por “diâmetro de espalhamento” é o resultado da trabalhabilidade da argamassa.



Figura 4.39 – Mesa de espalhamento

Este ensaio tornou-se determinante nos acertos de percentagens a usar neste trabalho, tanto de percentagem máxima a usar de resíduo SW como de quantidade de SP necessária para trabalhar com percentagens crescentes de SW. Para tal, realizaram-se duas séries de amassaduras experimentais, começando com a argamassa CTL e, considerando como objetivo a média dos diâmetros de espalhamento respetivos, foi-se alterando a quantidade de SP até estar dentro do limite estabelecido de trabalhabilidade da argamassa CTL ± 10 mm.

Na tabela 4.13 apresenta-se o resumo das trabalhabilidades para todas as amassaduras feitas para as argamassas ensaiadas. Nesta mesma tabela, “x” é a trabalhabilidade (mm) e “ σ ” é o desvio-padrão.

Como no fabrico dos provetes para o ensaio de resistência à penetração de cloretos e absorção de água por capilaridade se realizaram duas amassaduras, apresentam-se os 6 diâmetros medidos para a obtenção da trabalhabilidade das argamassas.

Tabela 4.13 – Trabalhabilidade obtida para todos os provetes ensaiados

Ensaio	CTL ₁	CTL ₂	CTL	SW5	SW20	SW40
Resistências Mecânicas (7d)	230	225		227	224	230
	227	227		225	220	228
	228	226		226	220	231
x $\pm$ σ	228 $\pm$ 1,5	226 $\pm$ 1,0	227 $\pm$ 1,7	226 $\pm$ 1,0	221 $\pm$ 2,3	230 $\pm$ 1,5
Resistências mecânicas (28d)	228	227		228	228	228
	226	229		229	227	229
	227	229		227	229	228
x $\pm$ σ	227 $\pm$ 1,0	228 $\pm$ 1,2	228 $\pm$ 1,2	228 $\pm$ 1,0	227 $\pm$ 1,0	228 $\pm$ 0,6
Resistências mecânicas (56d)	225	227		227	227	228
	226	226		227	227	229
	229	225		228	229	227
x $\pm$ σ	227 $\pm$ 2,1	226 $\pm$ 1,0	226 $\pm$ 1,5	227 $\pm$ 0,6	228 $\pm$ 1,2	229 $\pm$ 1,0
Resistências mecânicas (84d)	230	225		225	227	225
	232	226		226	225	226

	227	225		227	228	230
$\bar{x} \pm \sigma$	230 $\pm$ 2,5	225 $\pm$ 0,6	228 $\pm$ 2,9	226 $\pm$ 1,0	227 $\pm$ 1,5	227 $\pm$ 2,6
Resistividade (56d)	230	226		224	225	227
	228	227		225	229	225
	226	230		227	226	228
$\bar{x} \pm \sigma$	228 $\pm$ 2,0	228 $\pm$ 2,1	228 $\pm$ 1,8	225 $\pm$ 1,5	227 $\pm$ 2,1	227 $\pm$ 1,5
Carbonatação	227			225	227	229
	226	-		227	229	227
	227			226	229	228
$\bar{x} \pm \sigma$	227 $\pm$ 0,6	-	-	226 $\pm$ 1,0	228 $\pm$ 1,2	228 $\pm$ 1,0
Absorção de água por capilaridade	228 / 229	227 / 228		226 / 228	228 / 226	225 / 226
	229 / 227	229 / 227		228 / 228	229 / 227	227 / 223
	228 / 229	228 / 225		227 / 227	228 / 228	224 / 224
$\bar{x} \pm \sigma$	228 $\pm$ 0,8	227 $\pm$ 1,4	228 $\pm$ 1,2	227 $\pm$ 0,8	228 $\pm$ 1,0	225 $\pm$ 1,5
ASR	227			224	225	226
	226	-		225	224	224
	227			226	224	223
$\bar{x} \pm \sigma$	227 $\pm$ 0,6	-	-	225 $\pm$ 1,0	225 $\pm$ 0,6	225 $\pm$ 1,5
Cloretos e Sulfatos	225 / 225	229 / 227		226 / 227	226 / 227	226 / 227
	225 / 225	229 / 228		225 / 227	228 / 226	228 / 227
	226 / 226	228 / 229		227 / 226	227 / 228	227 / 228
$\bar{x} \pm \sigma$	225 $\pm$ 0,5	228 $\pm$ 0,8	227 $\pm$ 1,7	226 $\pm$ 0,8	227 $\pm$ 0,9	227 $\pm$ 0,8

Como se pode verificar, todas as argamassas apresentaram resultados dentro do intervalo de CTL ± 10 mm. Relembra-se que SW20 e SW40 correspondem a argamassas com superplastificante.

4.5.4. ENSAIOS DE RESISTÊNCIAS MECÂNICAS

Do ponto de vista estrutural, a resistência do cimento é uma das propriedades mais relevantes, sendo necessário conhecer o comportamento de provetes fabricados com substituição de parte do cimento por SW em comparação com provetes fabricados com 100 % de cimento.

Diversos fatores afetam os resultados dos ensaios e, de forma a minimizar os erros, para além de se manter as condições de moldagem, optou-se por produzir no mesmo dia os provetes das diferentes composições para avaliação à mesma idade, ou seja, para os ensaios aos 7, 28, 56 e 84 dias, resultou em 15 provetes por dias (fig. 4.40), que perfaz um total de 60 provetes.

A cura dos provetes foi controlada em temperatura e humidade, na câmara de cura do LEMC, até à altura dos ensaios para o tempo de 7, 28, 56 e 84 dias.

Inicialmente os provetes foram sujeitos aos ensaios de rotura por flexão, seguidos de ensaios de compressão.



Figura 4.40– Identificação da série de provetes a ensaiar aos 7 dias

Passadas 24 ± 2 horas da moldagem, desmoldou-se e identificou-se cada provete, tendo sido deixados submersos em água na câmara húmida até à data dos respetivos ensaios. Para preparar os provetes para os ensaios, aproximadamente 15 minutos antes do ensaio retiraram-se os provetes da câmara húmida e com um pano húmido absorveu-se o excesso de água superficial.

Começou-se por realizar os ensaios para determinar a resistência de flexão dos provetes. Da rotura dos provetes prismáticos resultaram duas metades que foram depois sujeitas aos ensaios de rotura de compressão.

4.5.4.1. Ensaio de resistência à flexão

Depois de retirar o excesso de água superficial, para cada provete mediu-se a massa, enquanto os restantes ficavam cobertos com um pano húmido.

Cada provete foi centrado sobre os dois apoios com a face de moldagem virada para o observador como ilustrado na figura 4.41, garantindo assim que as faces de contacto fossem de superfícies lisas, sendo depois sujeito a uma carga uniaxial à velocidade de 50 ± 10 N/s, aplicada a meio vão, até rotura (figura 4.42) momento em que foi registada a força máxima de rotura por flexão.



Figura 4.41 – Posicionamento do provete para ensaio de flexão



Figura 4.42 – Rotura do provete por flexão

A resistência à flexão obteve-se através da média aritmética dos três provetes ensaiados, através da seguinte equação:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times L}{b^3} \quad (4.3)$$

Onde:

R_f é a resistência à flexão (MPa);

F_f é a carga aplicada no centro do provete (N);

L é a distância entre os apoios (100 mm);

b é o lado da secção quadrada do provete (40 mm).

Na tabela 4.14 apresenta-se a compilação dos resultados médios obtidos para o ensaio de resistência à flexão, para todas as idades das várias argamassas. Incluem-se (em itálico) os resultados dos provetes realizados para o ensaio de resistividade ($R_f^{\text{resistiv.}}$) que também foram submetidos ao ensaio de resistência à flexão aos 56 dias. Na figura 4.43 apresenta-se o gráfico dos resultados, excluindo $R_f^{\text{resistiv.}}$.

Tabela 4.14 – Resistências médias à flexão (MPa)

		Argamassas					
		CTL ₁	CTL ₂	CTL	SW5	SW20	SW40
R _f aos 7 dias	Resultado (MPa)	6,50	6,37	6,43	6,40	5,80	4,60
	σ	0,36	0,40	0,35	0,17	0,17	0,36
R _f aos 28 dias	Resultado (MPa)	7,27	7,03	7,15	7,40	6,90	5,20
	σ	0,25	0,25	0,26	0,12	0,12	0,25
R _f aos 56 dias	Resultado (MPa)	6,87	7,27	7,07	7,10	6,80	5,20
	σ	0,23	0,25	0,31	0,36	0,40	0,25
$R_f^{\text{resistiv.}}$	Resultado (MPa)	7,80	7,67	7,74	7,60	6,90	5,60
	σ	0,17	0,29	0,23	0,12	0,12	0,25
R _f aos 84 dias	Resultado (MPa)	7,70	7,30	7,50	7,40	6,30	5,20
	σ	0,00	0,00	0,22	0,36	0,25	0,29

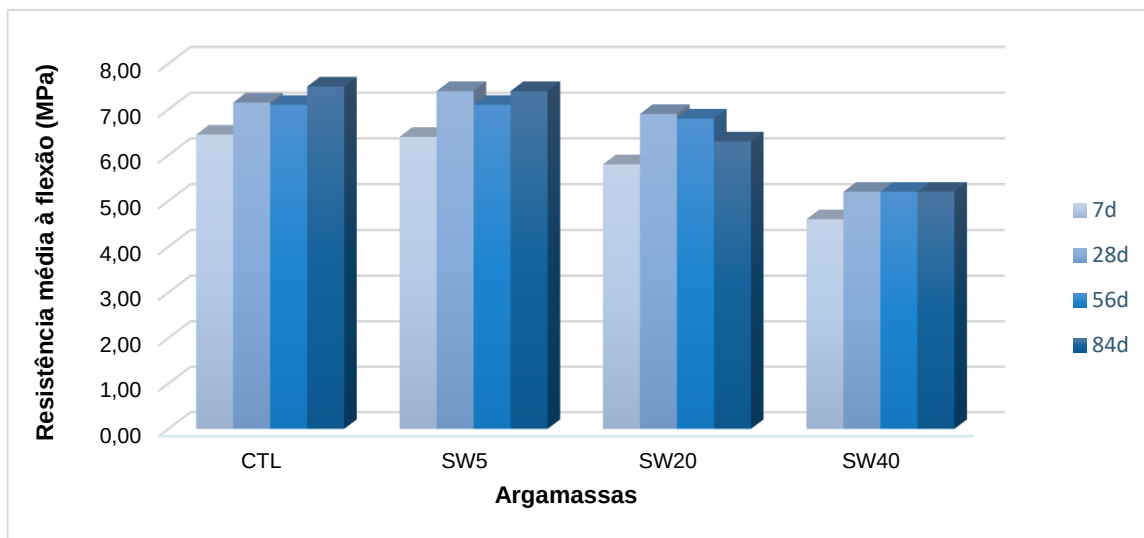


Figura 4.43 - Resistência à flexão ao fim de 7, 28, 56 e 84 dias (exceto $R_{f\text{resistiv.}}$)

4.5.4.2. Ensaio de resistência à compressão

Para cada meio prisma obtido no ensaio da resistência à flexão procedeu-se à sua colocação no equipamento próprio (figura 4.44), aplicando-se de seguida uma carga à velocidade de 2400 ± 200 N/s e registaram-se os valores correspondentes à força máxima de rotura por compressão (fig.4.45).



Figura 4.44 – Preparação de um ensaio de compressão



Figura 4.45 – Ensaio de compressão

Para obter a resistência à compressão de cada argamassa calculou-se a média aritmética das 6 metades resultantes do ensaio de flexão. A equação utilizada foi a seguinte:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (4.4)$$

Onde:

R_c é a resistência à compressão (MPa);

F_c é a carga máxima na rotura (N);

1600 é a área dos pratos da máquina de compressão (mm²).

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão para as diferentes idades e para todas as argamassas (incluindo $R_{c\text{ resistiv.}}$ em itálico) são os apresentados na tabela 4.15. Na figura 4.46 apresentam-se os resultados para todas as argamassas, com exceção de $R_{c\text{ resistiv.}}$.

Tabela 4.15 – Resistências médias à compressão (MPa)

		Argamassas					
		CTL ₁	CTL ₂	CTL	SW5	SW20	SW40
R_c aos 7 dias	Resultado (MPa)	45,50	43,60	44,56	43,90	35,90	23,70
	σ	1,87	1,12	1,76	0,45	0,77	0,47
R_c aos 28 dias	Resultado (MPa)	56,50	55,60	56,05	54,00	43,30	28,00
	σ	1,18	1,21	1,23	1,38	0,68	0,48
R_c aos 56 dias	Resultado (MPa)	59,00	59,80	59,38	55,88	44,35	28,50
	σ	1,88	1,65	1,75	1,55	0,75	0,40
$R_{c\text{ resistiv.}}$	Resultado (MPa)	62,70	59,50	61,09	57,70	43,90	27,95
	σ	1,60	1,01	2,12	1,38	1,18	0,48
R_c aos 84 dias	Resultado (MPa)	62,30	62,60	62,44	59,22	43,83	27,85
	σ	1,33	1,38	1,30	1,36	0,75	0,67

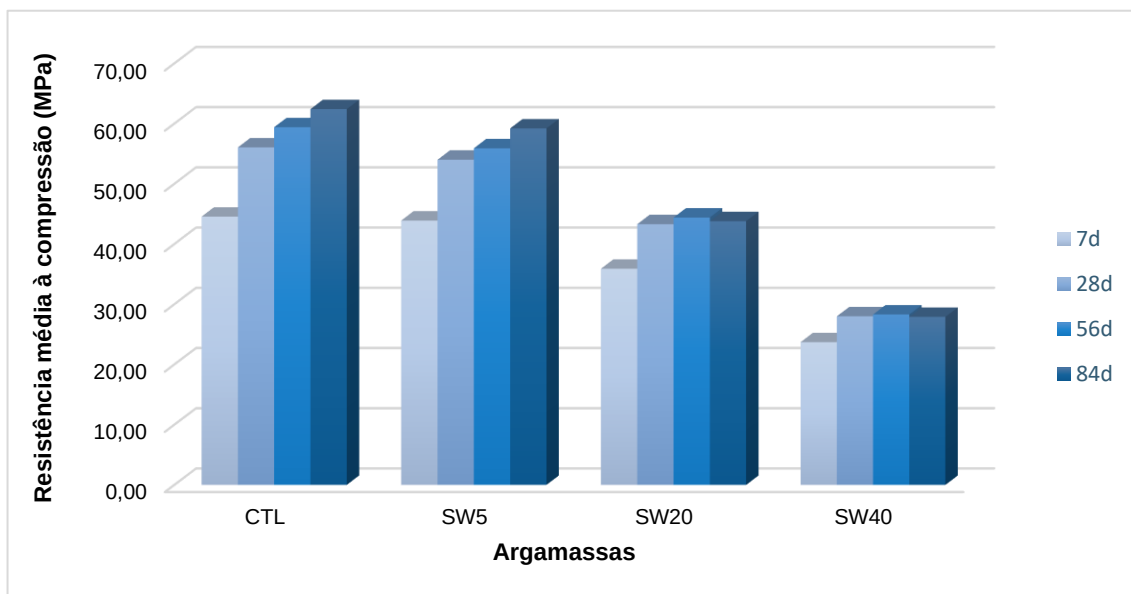


Figura 4.46 – Resistência à compressão ao fim de 7, 28, 56 e 84 dias (exceto $R_{c\text{ resistiv.}}$)

4.5.5. ENSAIOS DE RESISTIVIDADE

Deste ensaio não destrutivo é possível caracterizar o parâmetro de durabilidade do betão que interpreta a sua capacidade de transportar carga elétrica quando os poros estão totalmente saturados. Assim sendo, para avaliar a resistividade dos provetes das argamassas o ensaio foi realizado aos 28 e aos 56 dias.

Começou-se por aplicar nas extremidades do molde (fig.4.47), antes da colocação da argamassa, 6 redes de aço inoxidável.

Os mesmos provetes utilizados (15) serviram também para avaliar a resistência mecânica aos 56 dias, uma vez que foi possível conciliar os dois ensaios.



Figura 4.47 – Colocação de redesinoxidáveis nos moldes

O método utilizado neste trabalho consistiu em passar uma dada corrente elétrica através dos dois elétrodos colocados em cada uma das redes (fig.4.48), de modo a medir a diferença de potencial, com o equipamento da figura 4.49.



Figura 4.48 – Exemplo de ligação dos elétrodos a um provete SW20

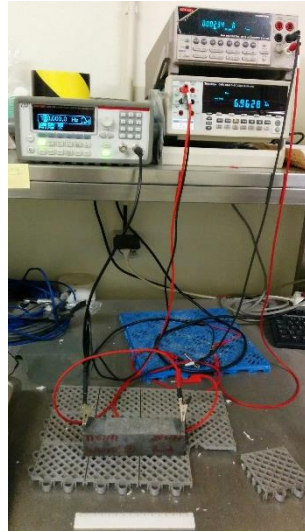


Figura 4.49 – Montagem para ensaio de resistividade

Após o ensaio de resistividade aos 56 dias, os provetes foram sujeitos aos ensaios de resistência mecânica, inicialmente à flexão (figuras 4.50 e 4.51), e as duas partes daí obtidas ensaiadas à compressão (figuras 4.52 e 4.53). Os resultados foram apresentados anteriormente e referidos nas tabelas 4.14 e 4.15 (em itálico como $R_f^{\text{resistiv.}}$ e $R_c^{\text{resistiv.}}$) dos ensaios de flexão e compressão respetivamente.

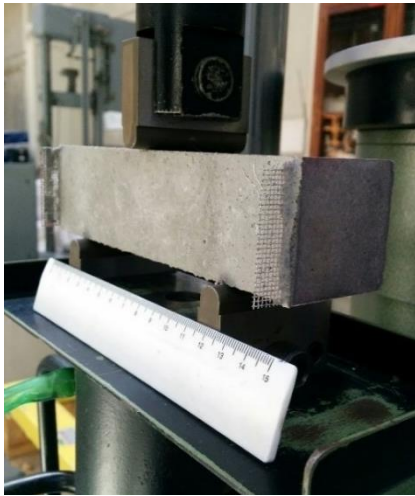


Figura 4.50 – Provete antes do ensaio de flexão

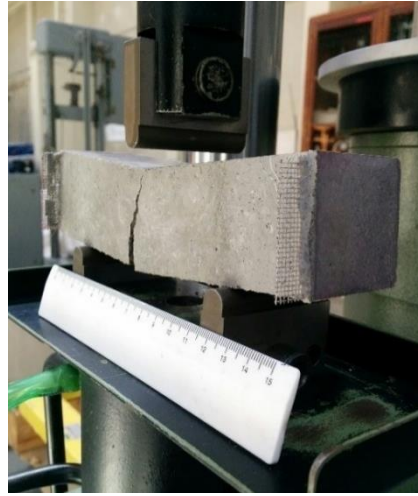


Figura 4.51- Provete após rotura por flexão

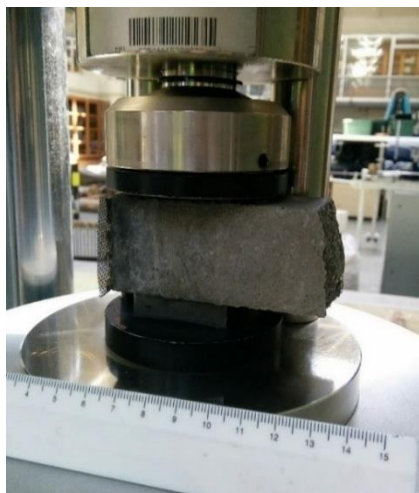


Figura 4.52 –Provete antes do ensaio de compressão

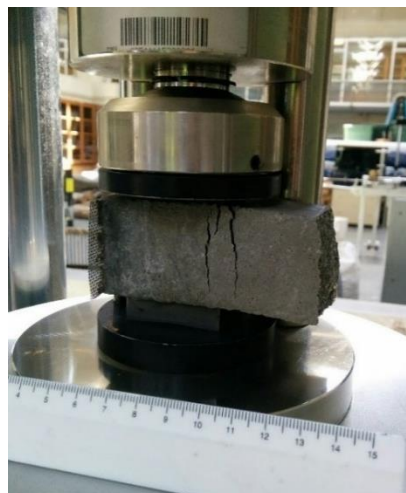


Figura 4.53 – Provete fissurado por compressão

A quantificação da resistividade depende da maior ou menor facilidade de a corrente elétrica fluir, de acordo com a natureza e conectividade dos poros da estrutura das argamassas. Para aferir se as diferentes quantidades de SW adicionadas às argamassas proporcionavam um aumento na resistividade, aplicou-se a lei de Ohm e obteve-se a resistividade (ρ) através da seguinte equação:

$$R = \frac{U}{I} \Leftrightarrow R = \rho \times \left(\frac{L}{A} \right) \Leftrightarrow \rho = \frac{U \times A}{L \times I} \quad (4.5)$$

Onde:

R é a resistência elétrica (Ω);

U é a diferença de potencial (V);

I é a intensidade de corrente (A);

L é o comprimento do provete (m);

A é a área do eléctrodo em contato com o provete (m^2).

Nas tabelas 4.16 e 4.17, apresenta-se os resultados médios das resistividades obtidas aos 28 e aos 56 dias respetivamente.

Tabela 4.16 – Resistividade média aos 28 dias

Argamassa	Provete	ρ (k Ω .cm)	$\rho_{\text{médio}}$ (k Ω .cm)	σ	Coefficiente de variação (%)
CTL1	1	4,16	4,19	0,02	0,46
	2	4,19			
	3	4,20			
CTL2	1	4,02	3,97	0,05	1,29
	2	3,92			
	3	3,97			
CTL	-	-	4,08	0,11	2,76
SW5	1	3,80	3,76	0,07	1,87
	2	3,80			
	3	3,68			
SW20	1	3,01	2,98	0,03	0,91
	2	2,98			
	3	2,96			
SW40	1	2,34	2,31	0,04	1,75
	2	2,26			
	3	2,32			

Tabela 4.17 – Resistividade média aos 56 dias

Argamassa	Provete	ρ (k Ω .cm)	$\rho_{\text{médio}}$ (k Ω .cm)	σ	Coefficiente de variação (%)
CTL1	1	4,39	4,37	0,04	0,91
	2	4,32			
	3	4,39			
CTL2	1	4,23	4,19	0,03	0,76
	2	4,16			
	3	4,19			
CTL	-	-	4,28	0,09	2,13
SW5	1	3,93	3,88	0,07	1,79
	2	3,91			
	3	3,80			
SW20	1	3,08	3,07	0,02	0,52
	2	3,08			
	3	3,06			
SW40	1	2,54	2,51	0,05	2,01
	2	2,46			
	3	2,55			

Na figura 4.54 é possível visualizar o gráfico com os resultados referentes aos ensaios de resistividade aos 28 e 56 dias.

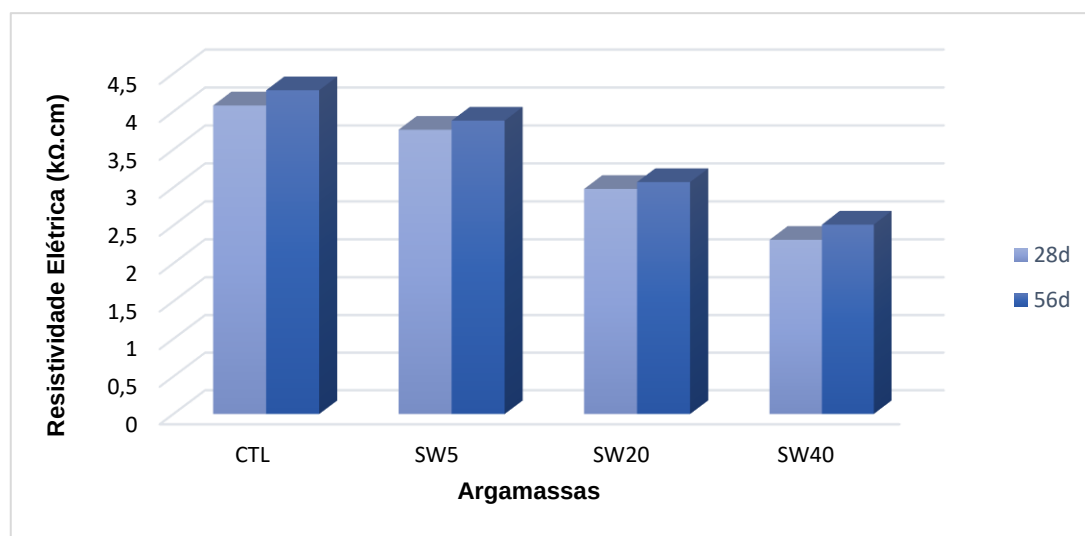


Figura 4.54 – Evolução da resistividade das argamassas ensaiadas aos 28 e 56 dias

4.5.6. ENSAIOS DE CARBONATAÇÃO ACELERADA

Com este ensaio, pretendeu-se determinar e comparar a profundidade de carbonatação dos provetes de argamassa com substituição parcial do cimento por SW, dos provetes de controlo (100 % de cimento). Quanto maior for a profundidade de penetração medida, menor será a resistência à carbonatação.

Tendo em conta o previsto na especificação E-391 (1993) do LNEC, após uma cura de 5 semanas contrariamente aos 14 dias referenciados, os provetes foram colocados na câmara de fluência durante 14 dias a uma temperatura de cerca de $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e humidade relativa de aproximadamente 50 %. Após esse período, os provetes foram transferidos para a câmara de carbonatação durante mais 5 semanas a uma temperatura de cerca de $(23 \pm 3) ^\circ\text{C}$; humidade relativa entre 55 a 65 % e alimentação de ar com $(5,0 \pm 0,1) \%$ de dióxido de carbono (CO_2).

Concluído o tempo na câmara de carbonatação, procedeu-se ao corte de 3 cm de espessura dos provetes (figura 4.55).



Figura 4.55 – Corte de 3 cm de um provete de argamassa

Após o corte dos provetes (fig.4.56) colocou-se uma solução de fenolftaleína na secção de corte. Esta solução toma uma coloração rosa em zonas não carbonatadas, onde o pH é elevado, e permanece incolor nas zonas carbonatadas. As figuras 4.57 e 4.58 representam o momento após a aplicação da solução de fenolftaleína.

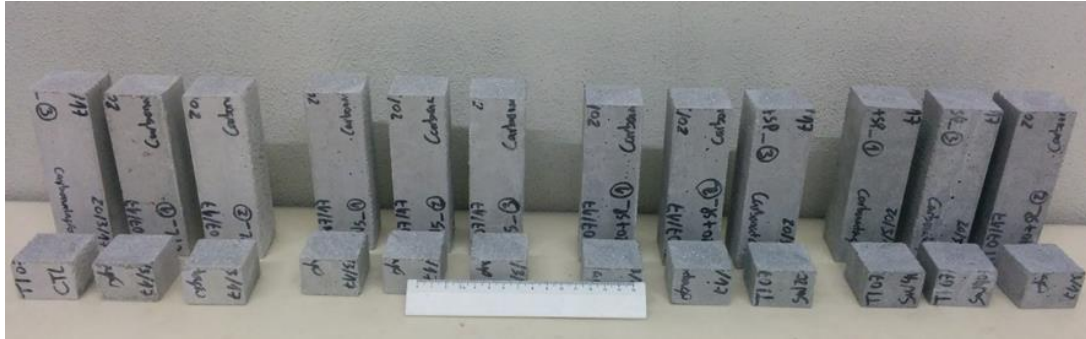


Figura 4.56 – Doze provetes de argamassa cortados antes de aplicação da solução



Figura 4.57 – À esquerda provetes CTL e à direita provetes SW5 (dia 8/06/2017)

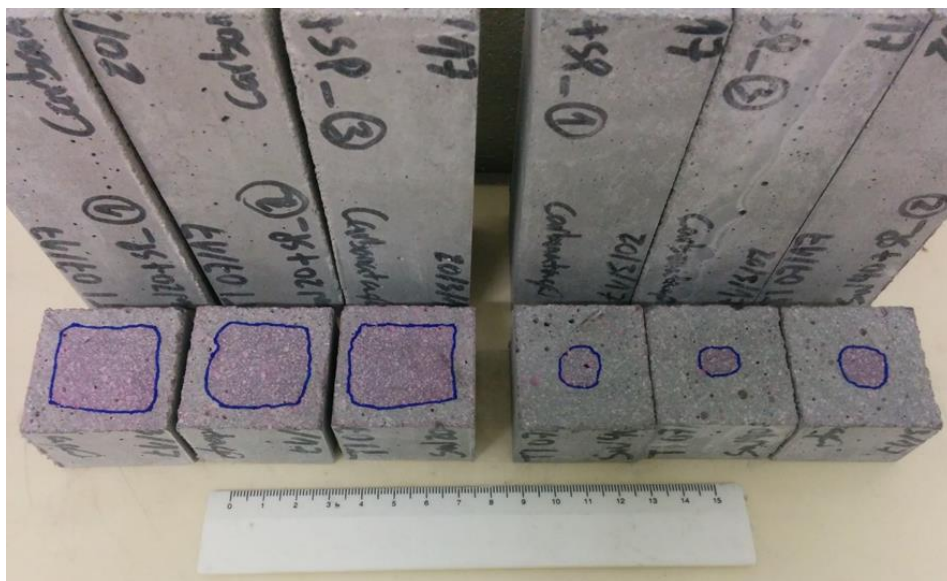


Figura 4.58 – À esquerda provetes SW20 e à direita SW40

Como houve dúvidas sobre os limites dos provetes das argamassas CTL e SW5, decidiu-se lavar a superfície de corte dos provetes com um pano húmido e esperar que a superfície secasse para que a coloração da solução de fenolftaleína se evidenciasse.

Da segunda análise aos provetes das argamassas CTL e SW5 (fig.4.59) constatou-se que de facto havia uma parte de área carbonatada, ao contrário dos 100 % de área não carbonatada da primeira análise.



Figura 4.59 – À esquerda provetes CTL e à direita provetes SW5 (9/06/2017)

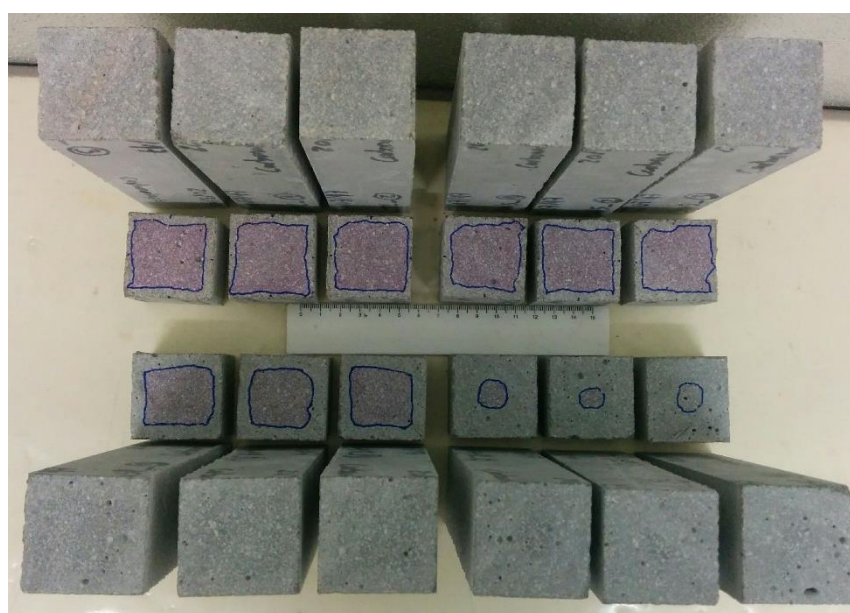


Figura 4.60 - Provetes de argamassa ensaiados à carbonatação

Com todas as áreas não carbonatadas delineadas, como se apresenta na figura 4.60, passou-se ao passo seguinte de determinar as áreas não carbonatada e carbonatada dos provetes.

Para que houvesse uma maior precisão nos resultados, optou-se por calcular as áreas não carbonatadas com recurso ao AutoCAD. As áreas carbonatadas são a diferença entre a área da face do provete (16 cm^2) e as áreas não carbonatadas. Os valores destas áreas são os apresentados na tabela 4.18, juntamente com o desempenho das argamassas com substituição parcial de cimento por SW.

Tabela 4.18 – Áreas médias de carbonatação

Argamassa	Provete	Área sem carbonatação (cm ²)	Área carbonatada (cm ²)	Área carbonatada média (cm ²)	Desvio-padrão
CTL	1	10,16	5,84	5,48	0,39
	2	10,93	5,07		
	3	10,48	5,52		
SW5	1	9,49	6,51	6,47	0,14
	2	9,69	6,31		
	3	9,42	6,58		
SW20	1	7,61	8,39	8,64	0,30
	2	7,03	8,97		
	3	7,43	8,57		
SW40	1	1,30	14,70	14,77	0,33
	2	0,88	15,12		
	3	1,52	14,48		

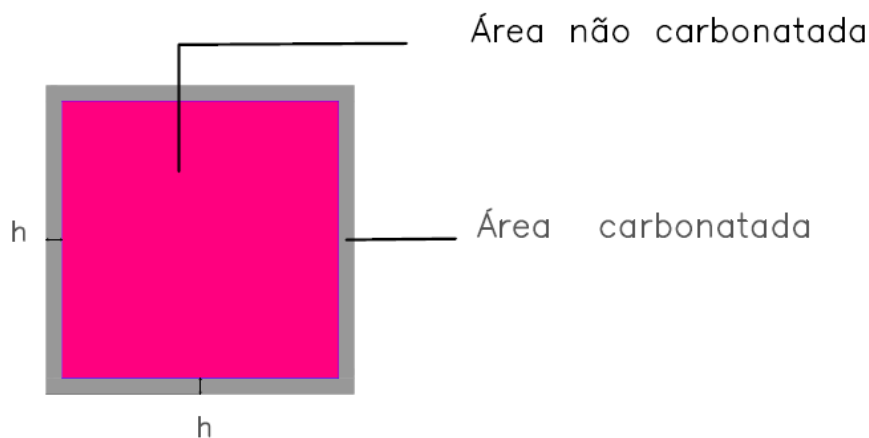


Figura 4.61 - Esquema usado para determinar a profundidade de carbonatação

Com o resultado médio das áreas carbonatadas por argamassa, e assumindo aproximações a formas quadradas como esquematizado na figura 4.61, foi possível determinar a profundidade de carbonatação (h) usando a expressão seguinte:

$$h = \frac{4 - \sqrt{A}}{2} \quad (4.6)$$

Onde:

A é a área não carbonatada (cm²);

4 é a constante do comprimento da face dos provetes (cm).

A tabela 4.19 contém os valores das profundidades de carbonatação das argamassas e o desempenho das argamassas SW, e a figura 4.62 esquematiza essas médias de profundidade de carbonatação obtidas.

Tabela 4.19 – Profundidade média de carbonatação das argamassas

Argamassa	Área não carbonatada média (cm ²)	Profundidade média de carbonatação (cm)
CTL	10,52	0,38
SW5	9,53	0,46
SW20	7,36	0,64
SW40	1,23	1,44

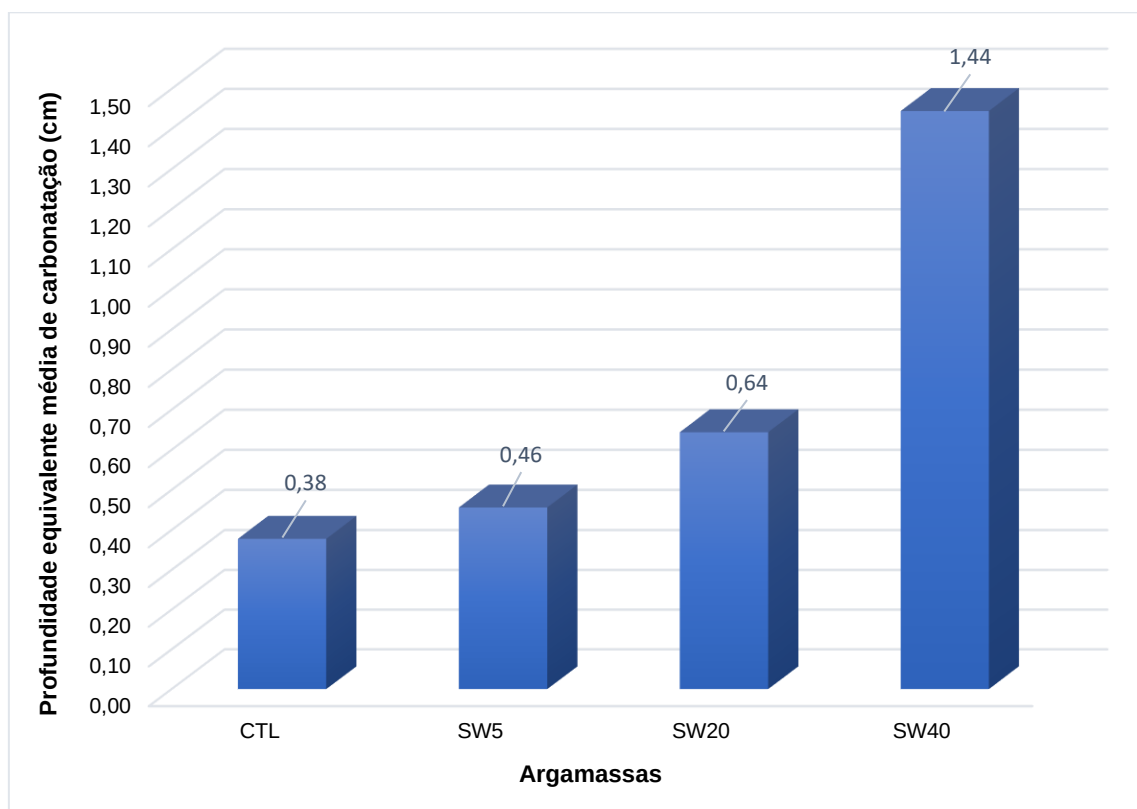


Figura 4.62 – Profundidade média de carbonatação das argamassas

4.5.7. ENSAIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Este ensaio foi realizado com base mas para além da especificação E-393 (1993) do LNEC, onde a absorção de água por capilaridade é definida como a diferença entre a massa do provete de argamassa após absorção de água (M_1) e a massa do provete seco (M_0), dividida pela área da superfície dos provetes em contacto com a água.

Os provetes foram desmoldados passadas 24 ± 2 horas da amassadura, e foram mantidos na câmara de cura até 2 meses depois. Como os provetes não foram todos produzidos no mesmo dia, quando

foi atingido o final do tempo de cura previsto, os provetes foram retirados da câmara de cura e armazenados em sala com temperatura de cerca de 21 °C.

De seguida, colocaram-se todos os 15 provetes em estufa a 40 °C durante 2 semanas até terem massa constante. Após esse tempo, os provetes foram colocados numa sala do LEMC durante 24 horas até à realização do ensaio.

No dia do ensaio os provetes foram pesados (M_0) e colocados dentro de um recipiente próprio (fig.4.63) previamente nivelado, e encheu-se cuidadosamente o recipiente com água potável até o nível de 5 ± 1 mm acima das faces inferiores dos provetes.

De seguida, procedeu-se a sucessivas pesagens dos provetes (com prévia secagem da água superficial) registando para cada provete os minutos e a massa.

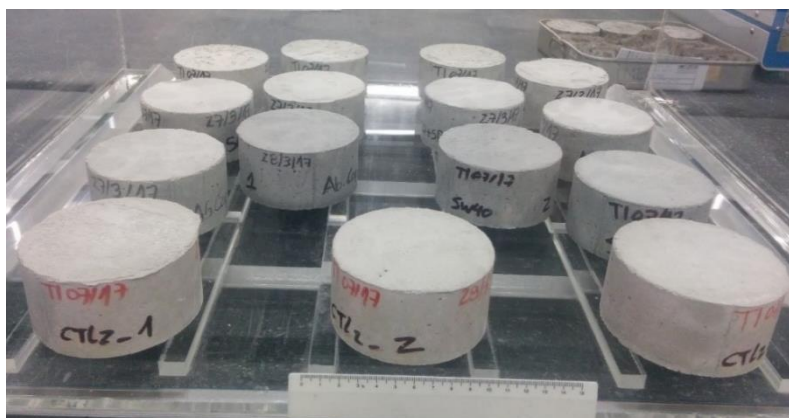


Figura 4.63 – Colocação dos 15 provetes para o ensaio de absorção de água por capilaridade

Embora a especificação do LNEC E-393 (1993) apresente um método de determinação da absorção de água por capilaridade que inclui medições ao fim de tempos iguais a 3, 6, 24 e 72 horas, optou-se por intervalos diferentes durante as primeiras horas de ensaio, realizando leituras nos tempos após o início do ensaio de 3, 8, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 120, 180, 240 e 270 minutos (ou seja, até terem decorrido 4h30min), o que está em concordância com o que é dito na especificação sobre medições mais frequentes nas primeiras 8 horas de ensaio.

Após o registo aos 270 minutos (4h30min), o recipiente onde se encontravam os provetes foi devidamente selado e mantido nessa condição até perfazer 1440 minutos (24 horas) desde o início do ensaio. A figura 4.64, corresponde ao momento final do ensaio de absorção de água por capilaridade.



Figura 4.64 – Provete ao fim de 24 horas de ensaio de absorção de água por capilaridade

Em relação à cinética de absorção é com certeza a distribuição de poros segundo a sua dimensão que influencia a velocidade de transporte dos líquidos e gases na rede porosa, pelo que frequentemente esse estudo é feito a partir da análise de curvas de absorção capilar. Estas curvas são traçadas a partir dos resultados de ensaios de absorção capilar em que apenas uma face do provete, previamente seco, é imersa em água alguns milímetros e é medido o aumento de peso em função da raiz do tempo decorrido a partir do início do ensaio (Coutinho, 2005).

Calcula-se, a partir das curvas de absorção capilar nas primeiras horas (4h30min), o coeficiente de absorção (S -sorptivity) expresso em $\text{mg}/(\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$. Este parâmetro é o declive da reta resultante da aproximação linear dos valores obtidos para a variação da massa do provete, por unidade de área (mg/mm^2), em função da raiz quadrada do tempo (Coutinho, 2005).

Segundo o processo descrito por Coutinho (2005) foram obtidas as curvas de absorção para o CTL₁, CTL₂ e correspondente CTL apresentadas na figura 4.65. Nas figuras 4.66, 4.67 e 4.68 apresentam-se as curvas de absorção para os provetes SW5, SW20 e SW40 respetivamente.

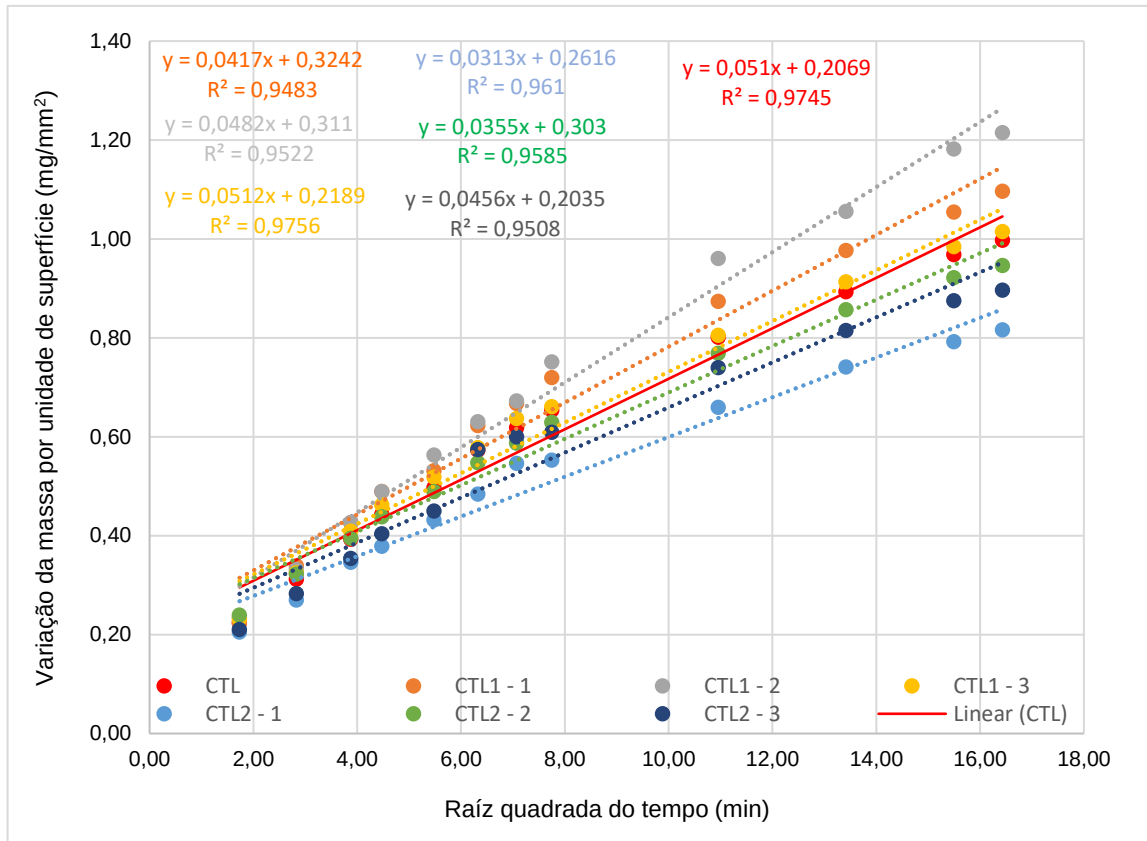


Figura 4.65 – Curvas de absorção dos provetes CTL₁ e CTL₂ e CTL

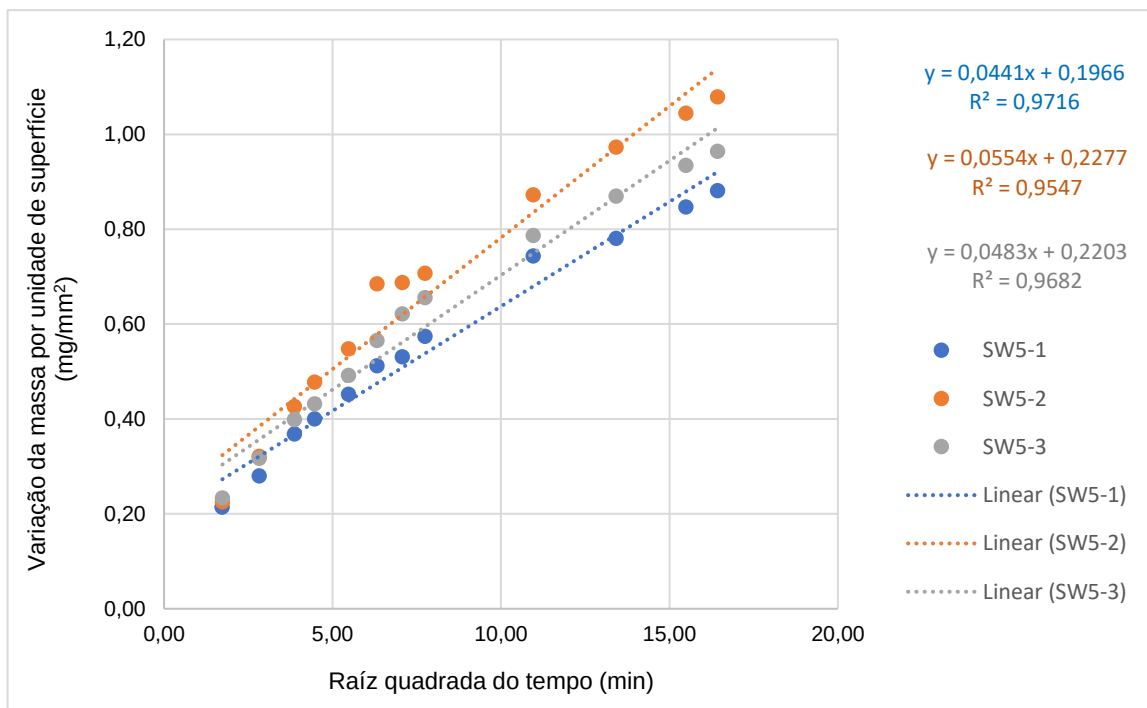


Figura 4.66 – Curvas de absorção dos provetes SW5

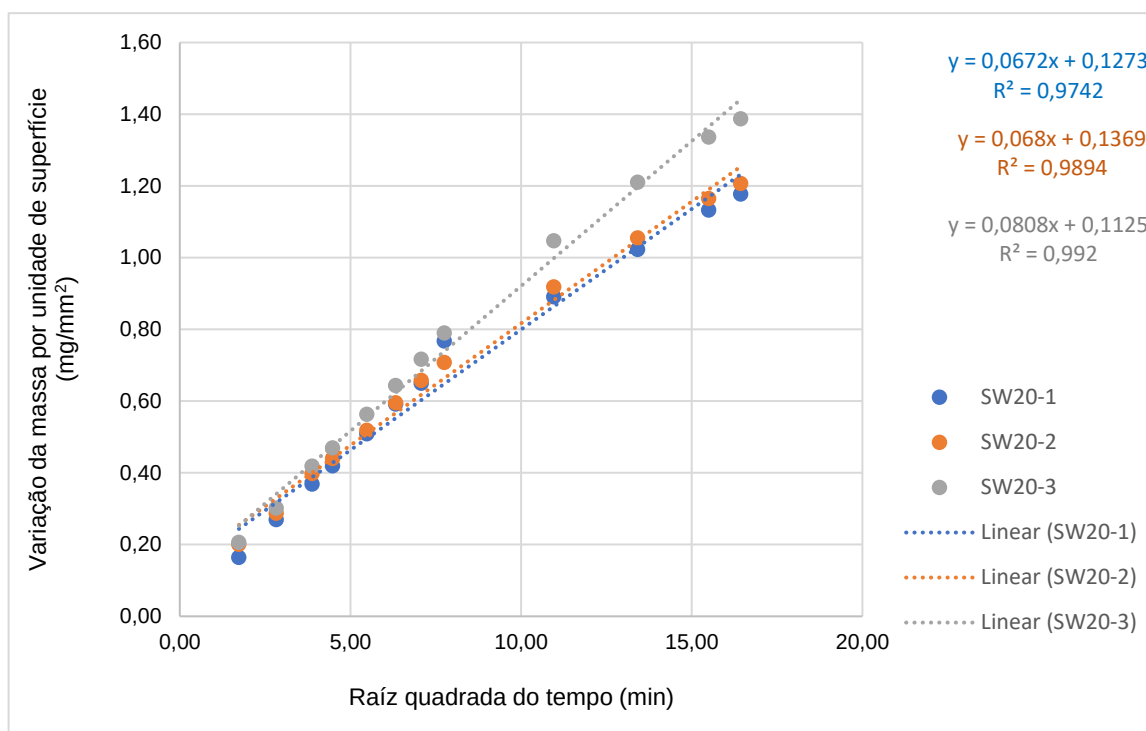


Figura 4.67 – Curvas de absorção dos provetes SW20

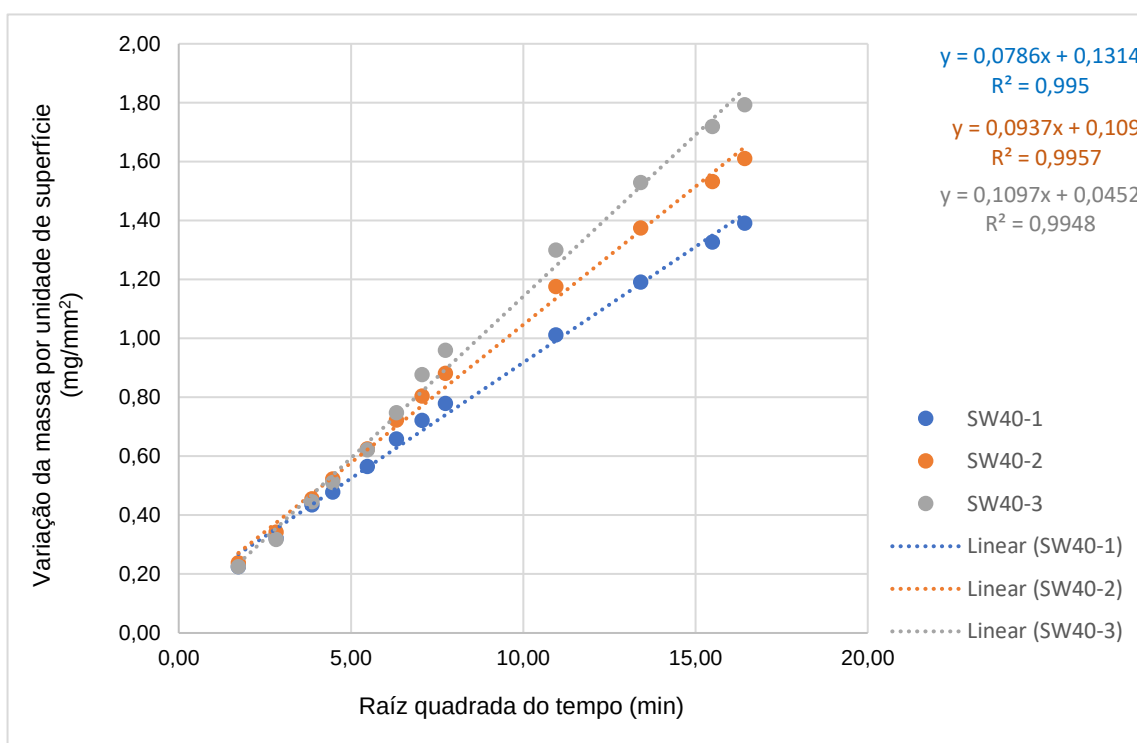


Figura 4.68 – Curvas de absorção dos provetes SW40

No que se refere ao estudo do coeficiente de absorção, S , estes foram calculados a partir da reta obtida por regressão linear às curvas de absorção, considerando as primeiras 4:30 horas de ensaio. A expressão usada foi a seguinte:

$$A = a_0 + (S \times \sqrt{t}) \quad (4.7)$$

Onde:

A é a absorção de água por unidade de superfície da argamassa (mg/mm^2);

a_0 é a água inicialmente absorvida pelos poros em contacto com a água (mg/mm^2);

S é o coeficiente de absorção do material ($\text{mg}/\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$);

t é o tempo passado desde o instante inicial (minutos).

Na tabela 4.20 apresentam-se os resultados médios obtidos para as 4h30 min e o valor de $S_{\text{médio}}$ ao fim de 24 horas (medição recomendada pela especificação do LNEC E-393, 1993). Na fig.4.69 apresenta-se o gráfico correspondente aos valores médios obtidos do coeficiente de absorção por capilaridade das argamassas ensaiadas às 4h30 min.

Tabela 4.20 – Coeficiente de absorção capilar das argamassas ensaiadas

Argamassa	Provete	S ($\text{mg}/\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$)	$S_{\text{médio}} \pm \sigma$ (4h30min)	Coeficiente de variação (%)	$S_{\text{médio}} \pm \sigma$ (24h)
CTL1	1	0,0536	$0,0536 \pm 0,0061$	11	$0,0418 \pm 0,0039$
	2	0,0596			
	3	0,0475			
CTL2	1	0,0377	$0,0410 \pm 0,0029$	7	$0,0330 \pm 0,0021$
	2	0,0432			
	3	0,0420			
CTL	-	-	$0,0473 \pm 0,0081$	17	$0,0375 \pm 0,0055$
SW5	1	0,0408	$0,0456 \pm 0,0056$	12	$0,0365 \pm 0,0031$
	2	0,0517			
	3	0,0444			
SW20	1	0,0621	$0,0651 \pm 0,0058$	9	$0,0533 \pm 0,0043$
	2	0,0615			
	3	0,0718			
SW40	1	0,0706	$0,0830 \pm 0,0122$	15	$0,0751 \pm 0,0084$
	2	0,0834			
	3	0,0950			

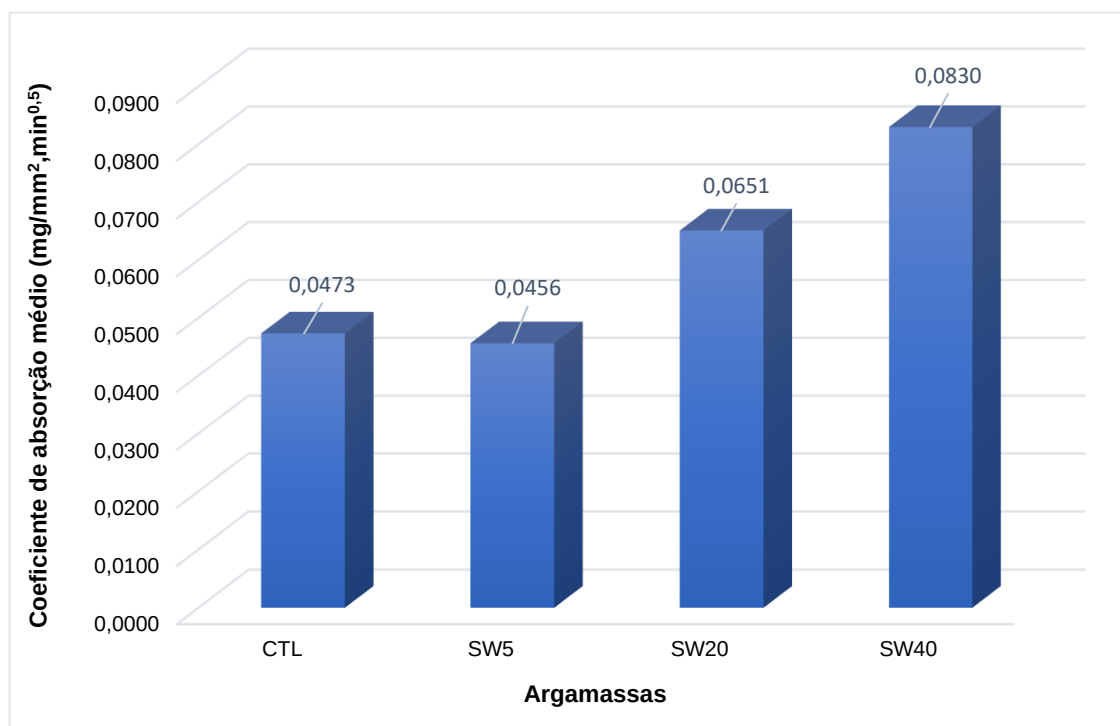


Figura 4.69 – Valores médios do coeficiente de absorção de água por capilaridade (4h30min)

4.5.8. ENSAIOS DE PENETRAÇÃO ACELERADA DE CLORETOS

De forma a avaliar o desempenho em termos da resistência à penetração de cloretos das argamassas, optou-se por realizar um ensaio de permeabilidade aos cloretos por migração em regime não estacionário, para a determinação do coeficiente de difusão dos cloretos.

Para tal, adaptou-se o procedimento descrito na especificação LNEC E-463 (2004) para os três provetes das 5 argamassas, CTL₁, CTL₂, SW5, SW20 e SW40.

Após cerca de dois meses na câmara de cura, os provetes foram retirados da câmara e limpos superficialmente, sendo depois transferidos para a câmara de vácuo com ambos os topos expostos, e foi dado início ao tratamento por vácuo a uma pressão de cerca de 10 mbar (1 kPa) durante 3 horas. Passado esse tempo, com a bomba de vácuo em funcionamento, encheu-se o recipiente com solução saturada de hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), obtida por dissolução de excesso de hidróxido de cálcio em água destilada, e manteve-se o vácuo ligado mais uma hora antes de deixar o ar entrar no recipiente. Os provetes foram mantidos na solução durante as (18 ± 2) horas, referidas na especificação, com o esquema de montagem apresentado na figura 4.70.



Figura 4.70 – Provetes mantidos na solução Ca(OH)_2 após desligar a bomba de vácuo

Para que uma das faces dos provetes fosse exposta a uma solução catódica, e a outra exposta a uma solução anódica, a primeira foi preparada com 100 g de reagente cloreto de sódio (NaCl) em 900 g de água potável, e a solução anódica foi uma solução preparada com 12 g hidróxido de sódio (NaOH) em 1 L de água destilada. As soluções foram guardadas a uma temperatura controlada de 20 °C.

De seguida, os provetes foram montados em células como ilustrado na figura.4.71, onde a face de enchimento, mais rugosa, ficou exposta à solução anódica de hidróxido de sódio (NaOH), e a face moldada, ou seja, mais lisa, ficou exposta à solução cloretos (solução catódica) para melhor representar o que acontece na realidade. A figura 4.72 ilustra um provete montado com a face exposta à solução anódica.



Figura 4.71 – Exemplo de provetes montados nas células para o ensaio



Figura 4.72 - Um dos lados da célula preenchido com solução anódica

Embora as células tenham o símbolo representativo da temperatura do lado referente à solução NaCl, seguiu-se a mesma especificação do LNEC que refere que a leitura da temperatura deve ser feita em cada solução anódica, ou seja, na solução NaOH. No passo seguinte descreve-se o início do ensaio de migração propriamente dito.

Com a fonte de alimentação com uma voltagem pré-estabelecida de 30 V, registou-se a intensidade da corrente inicial que passava em cada provete. A partir dos dados da tabela 4.21 (excerto do quadro 1 da especificação do LNEC) ajustou-se o diferencial de potencial e o tempo para os provetes ensaiados.

Tabela 4.21 – Diferença de potencial elétrico e duração do ensaio de migração

Corrente inicial I_{30V} (com 30 V) (mA)	U(V) aplicada após o ajuste	Nova corrente inicial admissível (mA)	Duração do ensaio t (horas)
$40 \leq I_0 \leq 60$	30	$40 \leq I_0 \leq 60$	24
$60 \leq I_0 \leq 90$	25	$50 \leq I_0 \leq 75$	24
$90 \leq I_0 \leq 120$	20	$60 \leq I_0 \leq 80$	24
$120 \leq I_0 \leq 180$	15	$60 \leq I_0 \leq 90$	24
$180 \leq I_0 \leq 360$	10	$60 \leq I_0 \leq 120$	24

Os provetes CTL₁ e CTL₂ com corrente inicial na ordem dos 80 mA foram sujeitos a uma diferença de potencial de 25 V. Os provetes SW5 e SW20 com corrente inicial na ordem dos 100 mA foram sujeitos a um diferencial de potencial de 20 V, e finalmente, para o SW40 com maior corrente inicial na ordem dos 140 mA adaptou-se um menor diferencial de 15 V. Todos os provetes foram ensaiados durante 24 horas e ao longo desse tempo foi registada a temperatura nos ânodos (fig.4.73).

Na figura 4.74 representa-se o momento do fim do ensaio dos provetes SW5 e SW20, com as ligações cátodo e ânodo ao polo negativo e positivo da fonte de alimentação.



Figura 4.73 – Colocação de termómetros nos ânodos dos provetes

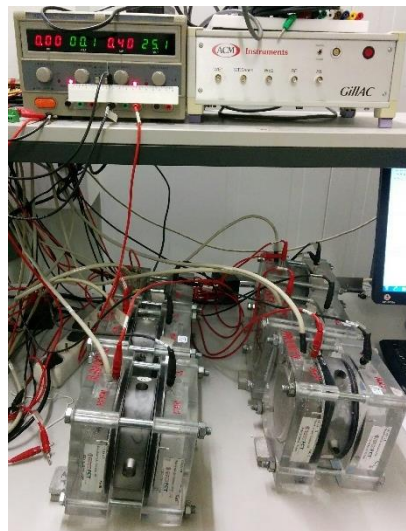


Figura 4.74 – Ensaio de migração dos provetes SW5 e SW20

Após desligar a corrente, os provetes foram retirados das células de ensaio, e com as superfícies limpas foram seccionados por compressão diametral (fig. 4.75) em duas partes, e de imediato pulverizados com solução de nitrato de prata (AgNO_3), procedendo-se de seguida, à medição da profundidade de penetração de cloretos em ambas as superfícies de fratura.

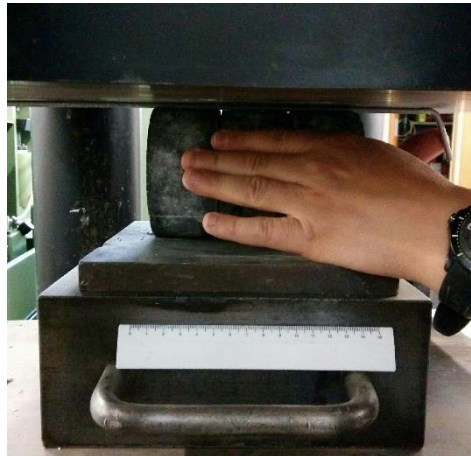


Figura 4.75 – Compressão diametral dos 3 provetes SW20

Na figura 4.76 o primeiro grupo é constituído pelas duas faces dos três provetes CTL₁, e no segundo grupo, o correspondente aos provetes SW40. Já na figura 4.77 encontram-se os provetes CTL₂, e por último na figura 4.78 os provetes SW5 e SW20.



Figura 4.76 – Provetes CTL₁ e SW40



Figura 4.77– Provetes CTL₂



Figura 4.78 – À esquerda os provetes SW20 e à direita os provetes SW5

As faces dos provetes foram marcadas de 10 em 10 mm, de acordo com o referido na especificação do LNEC, e como se pode ver na ilustração adaptada na figura 4.79 dessa mesma especificação.

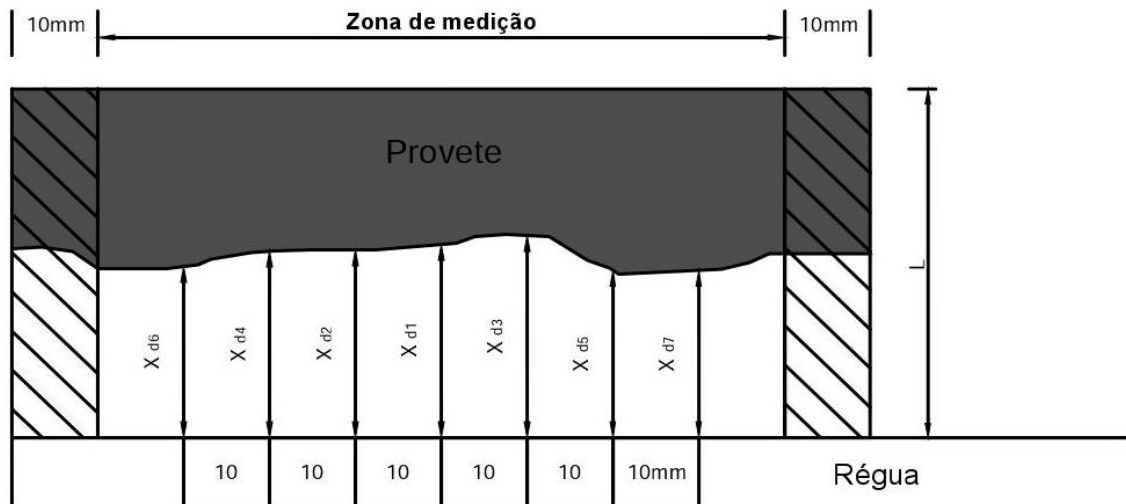


Figura 4.79 – Ilustração da medição das profundidades de penetração dos cloretos (Adaptada da E-463)

As médias das leituras das profundidades, medidas nos provetes das argamassas, foram as apresentados na tabela 4.22.

Tabela 4.22 – Profundidades médias de penetração de cloretos

Argamassa	Provete	$X_{\text{médio}}$ por provete	$X_{\text{médio}}$	σ
CTL ₁	1	20,79	18,65	3,16
	2	18,12		
	3	17,05		
CTL ₂	1	14,27	17,95	2,83
	2	19,63		
	3	19,95		
CTL	-	-	18,30	3,00
SW5	1	21,01	18,30	2,99
	2	14,03		
	3	19,86		
SW20	1	28,28	26,88	2,00
	2	27,08		
	3	25,27		
SW40	1	33,76	29,55	5,67
	2	32,87		
	3	22,01		

Aos valores médios obtidos da leitura das profundidades de penetração, apresentados na tabela 4.22, juntou-se os dados registados ao longo das 24 horas do ensaio e determinou-se o coeficiente de difusão dos cloretos a partir da expressão seguinte:

$$D = \frac{0,0239(273+T)L}{(U-2)t} \times \left(x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273+T)Lx_d}{(U-2)}} \right) \quad (4.8)$$

Onde:

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

T é o valor médio das temperaturas inicial e final na solução anódica (°C)

L é a espessura do provete (50 mm)

U é o valor absoluto da voltagem aplicada (V)

t é a duração em horas do ensaio (24 h)

x_d é o valor médio da profundidade de penetração (mm)

Ao contrário do que é dito na especificação LNEC E-463 (2004) para o cálculo de D , no valor de U usou-se a média das voltagens, e em T as médias das temperaturas, lidas durante o ensaio de difusão de cloretos.

Na tabela 4.23 estão apresentados os valores médios de x_d obtidos por cada provete ensaiado, e a tensão média ($U_{\text{médio}}$) em volts, por argamassa, registada durante as 24 horas do ensaio de difusão.

Por ter ocorrido um problema durante a leitura da temperatura, nos provetes 3, 1 e 3 das argamassas CTL1, SW5 e SW20, respetivamente, usou-se um valor médio das leituras dos outros dois provetes da mesma argamassa.

Tabela 4.23 – Resumo de valores para o cálculo de D ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)

Argamassa	Provete	Tempo de cura (dias)	$x_{d\text{médio}}$ por provete (cm)	$x_{d\text{médio}}$ (cm)	$U_{\text{médio}}$ (V)	$T_{\text{médio}}$ (°C)	D ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)
CTL ₁	1	56	20,79	18,65	25,18	26,71	10,32
	2		18,12			25,84	10,30
	3		17,05			26,28	10,31
CTL ₂	1	56	14,27	17,95	24,76	25,55	10,04
	2		19,63			26,03	10,05
	3		19,35			24,86	10,02
CTL	-	-	-	18,30	24,97	25,82	10,17
SW5	1	57	21,01	17,56	22,14	25,05	10,93
	2		14,03			25,87	10,96
	3		19,86			24,22	10,91
SW20	1	55	28,28	26,88	22,05	25,79	17,45
	2		27,08			23,31	17,31
	3		25,27			24,55	17,38
SW40	1	54	33,76	29,52	15,07	24,31	28,50
	2		32,87			23,84	28,45
	3		21,92			24,49	28,51

Ainda do ensaio de cloretos é possível analisar a resistividade associada a cada provete, cujos valores são os apresentados na tabela 4.24.

Por problemas durante a medição da intensidade de corrente, desprezam-se os valores do provete 2 de SW5, o provete 1 de SW20 e o provete de SW40. Como para o CTL₁ e CTL₂ houve registo para os três provetes de cada argamassa, é feita a análise completa de média, desvio-padrão (σ) e coeficiente (coef.) de variação em percentagem.

Tabela 4.24 – Resistividade do ensaio de cloretos

Argamassa	Provetes	U(V)	t(h)	I(Ma)	$\rho(K\Omega cm)$	$\rho_{\text{médio}}(K\Omega.cm)$	σ	Coef. Variação (%)
CTL ₁	1	25,18	24	771,81	5,11	5,61	0,43	7,67
	2			671,30	5,88			
	3			675,83	5,84			
CTL ₂	1	24,76	24	683,31	5,70	5,68	0,03	0,53
	2			685,50	5,69			
	3			684,41	5,64			
CTL	-	24,97	-	695,36	-	5,64	0,28	4,91
SW5	1	22,14	24	692,03	4,82	5,00	-	-
	2			-	-			
	3			644,42	5,181			
SW20	1	22,05	24	-	-	4,37	-	-
	2			767,39	4,49			
	3			810,86	4,25			
SW40	1	15,07	24	647,34	3,64	3,57	-	-
	2			-	-			
	3			674,14	3,50			

4.5.9. RESISTÊNCIA AO ATAQUE POR SULFATOS

Embora todos os tipos de sulfatos levem à deterioração do betão de cimento Portland, dependendo dos tipos de sulfatos existentes, e da solubilidade do sal de sulfato, o mecanismo e grau é diferente. Usando resíduos como adições cimentícias, os ensaios nos provetes foram realizados de acordo com a especificação do LNEC E-462 (2004) para os quais se determinou a resistência ao ataque por sulfatos.

Segundo a especificação LNEC E-462 (2004), em cada molde foram colocados 12 pernos nas extremidades para posterior leitura no defletómetro (ver figura 4.80).



Figura 4.80 – Molde montado para provetes a ensaiar à resistência aos sulfatos

Após a desmoldagem e identificação dos provetes foi necessário preparar uma solução (fig.4.81) de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) onde os provetes permaneceram submersos durante 28 dias.



Figura 4.81 – Preparação de solução de hidróxido de cálcio (reagente à esquerda e agitador à direita)

Terminados os 28 dias a contar desde a desmoldagem, efetuou-se a leitura zero. Durante todo o ensaio, começou-se por calibrar o defletómetro com uma barra de ínvar segundo a direção normal (fig.4.82) e de seguida invertida. Retiraram-se os provetes um a um, e com um pano húmido absorveu-se o excesso de solução da superfície dos provetes, antes de efectuar as leituras para todas as faces com os provetes nas direções normal e invertida.

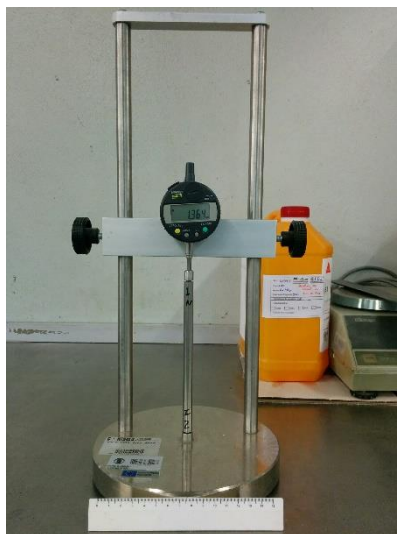


Figura 4.82 – Leitura da barra ínvar na direção normal

Para armazenamento (fig. 4.83), os provetes 1,3 e 5 de cada argamassa foram colocados num recipiente e, reutilizando a solução de hidróxido de cálcio, submergiram-se os provetes. Os restantes provetes com a numeração 2,4 e 6 foram colocados num outro recipiente submersos em 1 litro de solução de sulfato de sódio (Na_2SO_4), que era preparada minutos antes de se iniciar as leituras (fig. 4.84).



Figura 4.83 – Preparação de 1 L de sulfato de sódio



Figura 4.84 – Divisão dos provetes 1,3 e 5 e 2,4 e 6

As leituras foram realizadas de 14 em 14 dias, e como não foi possível realizar o ensaio durante as 26 semanas, serão apresentados os valores até às 8 semanas. As expressões que permitem o cálculo da expansão são as seguintes:

$$Exp^{Ca(OH)_2} (\%) = \frac{(LP_t - LI_x) - L_0}{1600} \quad (4.9)$$

$$Exp^{Na_2SO_4} (\%) = \frac{(LP_t - LI_x) - L_0}{1600} \quad (4.10)$$

$$Exp^{Ca(OH)_2} (\%) = \frac{Exp(1) + Exp(3) + Exp(5)}{3} \quad (4.11)$$

$$Exp^{Na_2SO_4} (\%) = \frac{Exp(2) + Exp(4) + Exp(6)}{3} \quad (4.12)$$

$$Expansão\ final\ (\%) = Exp^{Na_2SO_4} - Exp^{Ca(OH)_2} \quad (4.13)$$

Em que:

$Exp^{Na_2SO_4}$ é a expansão dos provetes imersos em hidróxido de sódio (%);

$Exp^{Ca(OH)_2}$ é a expansão dos provetes imersos em hidróxido de cálcio (%);

LP_t é a média do comprimento em cada dia de medição, de cada provete (m);

LI_x é a leitura média efetuada com a barra de invar (μm);

L_0 é a média do comprimento de leitura zero, subtraída pela leitura zero da barra de invar (μm).

Na tabela 4.25 apresentam-se os resultados das leituras efetuadas até a esta fase do ensaio.

Tabela 4.25 – Expansão média do ataque por sulfatos ao longo de 8 semanas

		Tempo (semanas)				
		0	2	4	6	8
Argamassas	CTL1	0,000	0,003	0,031	0,009	0,008
	CTL2	0,000	0,004	0,012	0,012	0,014
	CTL	0,000	0,004	0,022	0,011	0,011
	SW5	0,000	0,011	0,013	0,014	0,015
	SW20	0,000	0,028	0,039	0,035	0,050
	SW40	0,000	0,016	0,060	0,110	0,200

Como o ensaio só termina quando atinge a duração de 26 semanas, e uma vez que só foram realizadas leituras até à 8ª semana e não existem modificações significativas resultante do ataque por sulfatos, não foi possível retirar conclusões.

4.5.10. OBSERVAÇÃO EM MEV AOS 28 DIAS

4.5.10.1. Preparação de amostras para MEV

Para melhor compreender a microestrutura do cimento e do SW utilizados foram realizadas análises a amostras de argamassas com 28 dias de idade. Estas amostras foram preparadas 24 horas antes do início da observação no microscópio eletrónico de varrimento do CEMUP.

Note-se que cada tipo de amostra a observar exige uma preparação cuidada e adequada.

As amostras de argamassa foram inicialmente recolhidas em laboratório, numa parte escolhida do interior dos provetes, e depois coladas com cola epóxi (a dois componentes) sobre um disco metálico como ilustrado nas figuras 4.85 e 4.86. Posteriormente, no CEMUP as amostras foram revestidas por um fino filme de ouro-paládio (Au/Pd) por pulverização catódica, utilizando o equipamento SPI Module Sputter Coater.

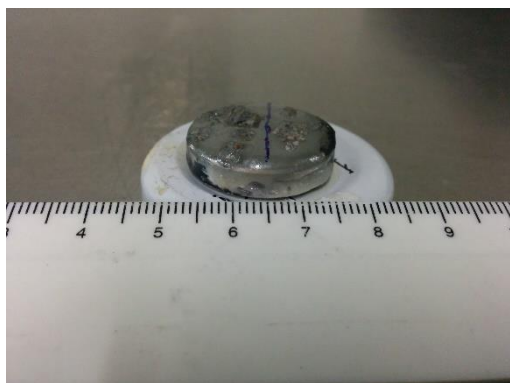


Figura 4.85 – Colagem de amostra em disco metálico



Figura 4.86 – Identificação de amostras

4.5.10.2. MEV de amostra de argamassas aos 28 dias

Das primeiras ampliações (ampliação a 100 vezes) usadas é possível distinguir parte dos agregados envolvidos pela pasta de cimento endurecida. Seguem-se sucessivas ampliações de 1000, 5000 e 20000 vezes. Destas últimas ampliações (20000 vezes) resultam imagens com uma maior resolução da microestrutura das diferentes argamassas onde se conseguem distinguir cristais de hidróxido de cálcio dos produtos de hidratação, denominado de gel CSH (silicato cálcico hidratado).

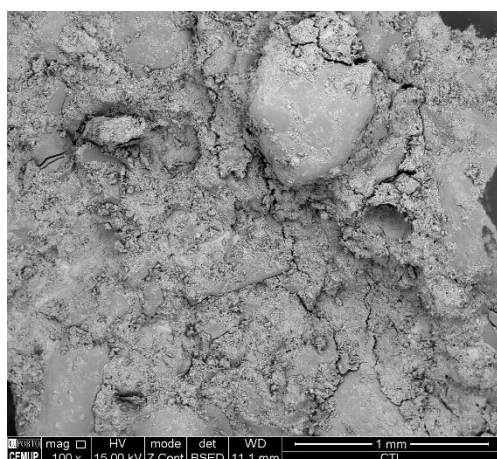


Figura 4.87 – Argamassa CTL ampliada 100 vezes

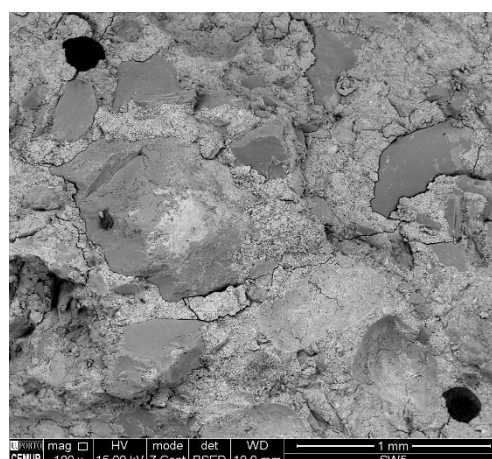


Figura 4.88 – Argamassa SW5 ampliada 100 vezes

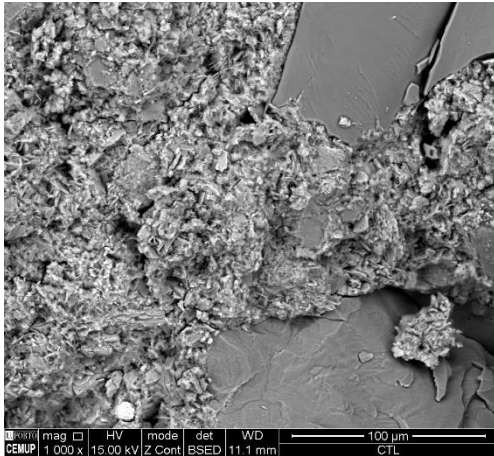


Figura 4.89 – Argamassa CTL ampliada 1000 vezes

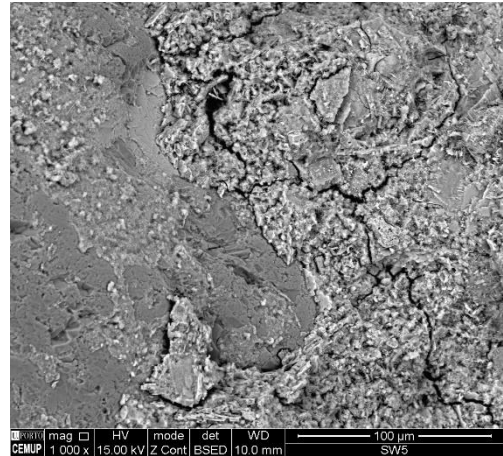


Figura 4.90 – Argamassa SW5 ampliada 1000 vezes

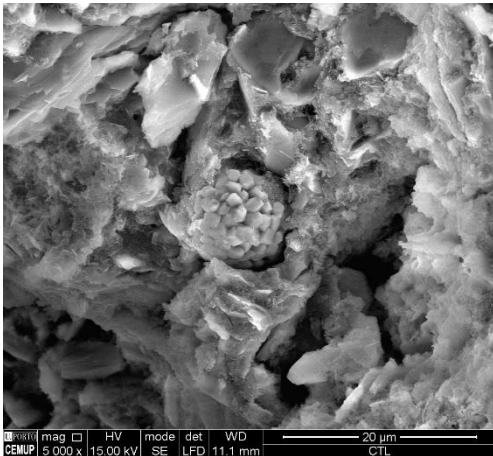


Figura 4.91 – Argamassa CTL ampliada 5000 vezes

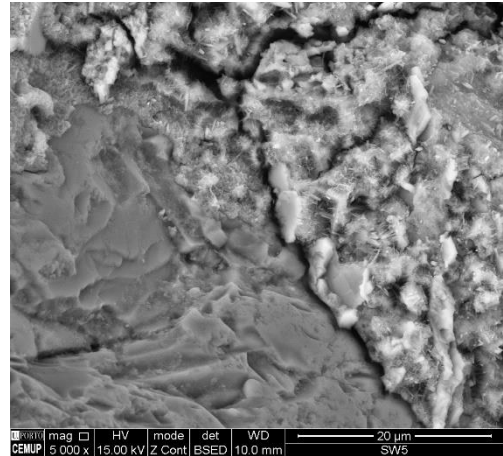


Figura 4.92 – Argamassa SW5 ampliada 5000 vezes

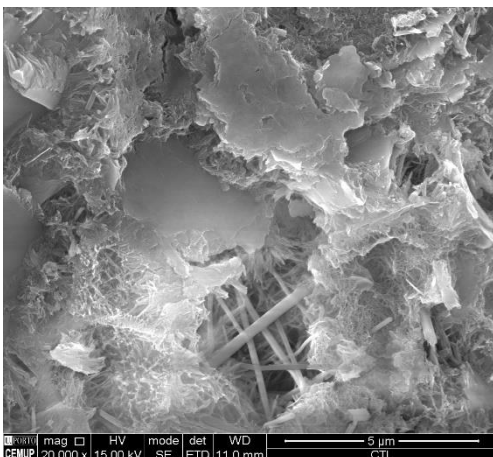


Figura 4.93 – Argamassa CTL ampliada 20000 vezes

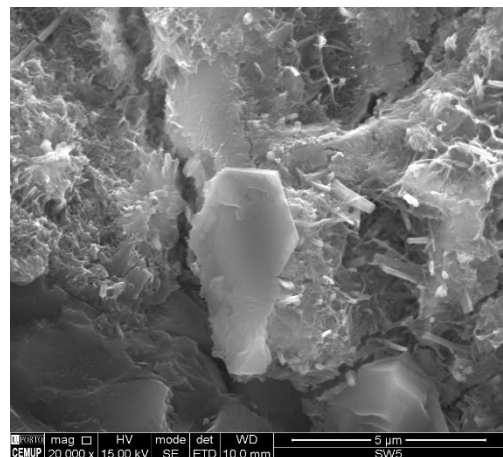


Figura 4.94 – Argamassa SW5 ampliada 20000 vezes

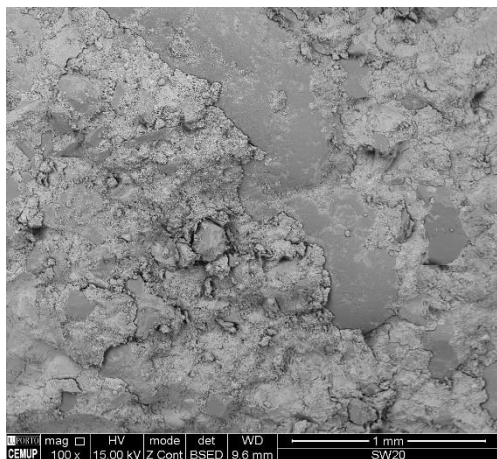


Figura 4.95 – Argamassa SW20 ampliada 100 vezes

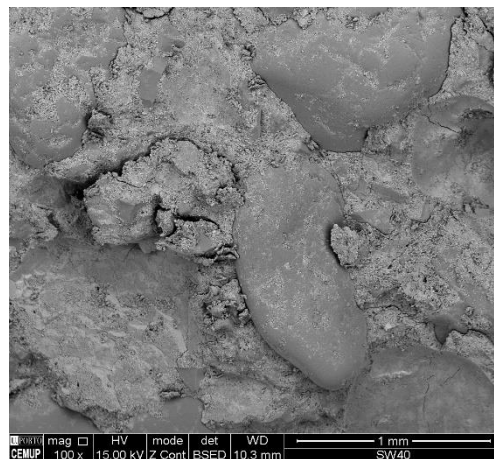


Figura 4.96 – Argamassa SW40 ampliada 100 vezes

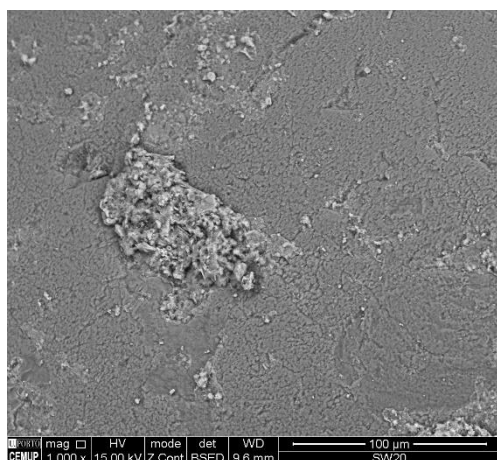


Figura 4.97 – Argamassa SW20 ampliada 1000 vezes

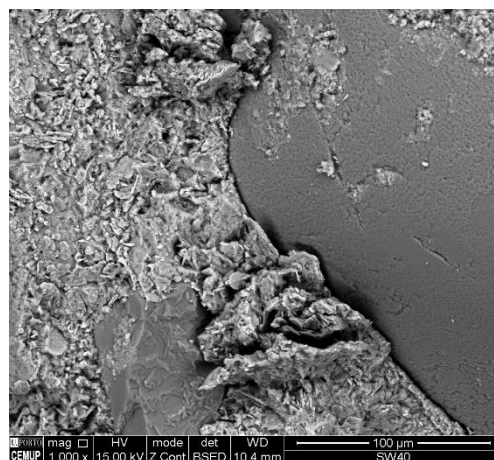


Figura 4.98 – Argamassa SW40 ampliada 1000 vezes

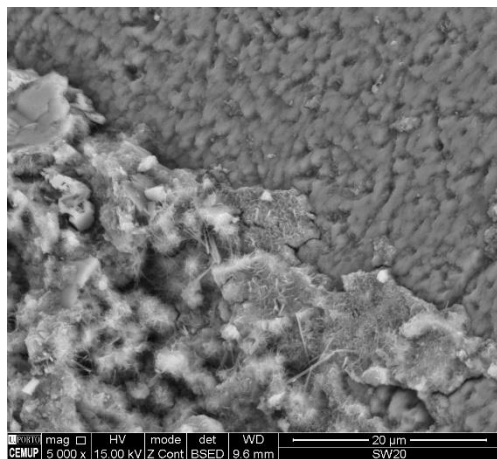


Figura 4.99 – Argamassa SW20 ampliada 5000 vezes

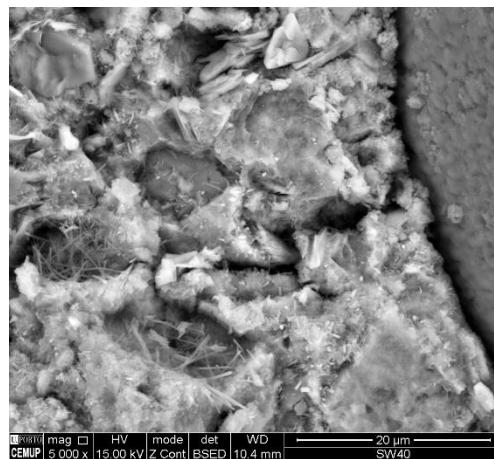


Figura 4.100 – Argamassa SW40 ampliada 5000 vezes

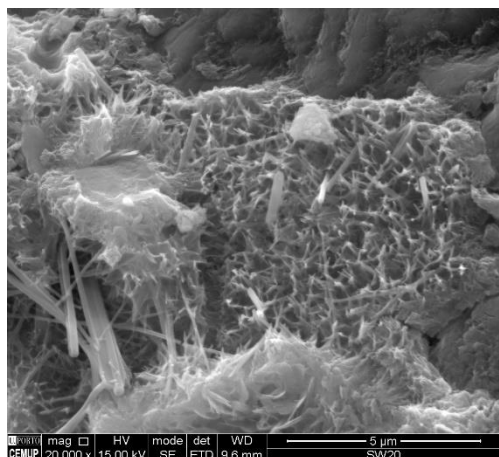


Figura 4.101 – Argamassa SW20 ampliada 20000 vezes

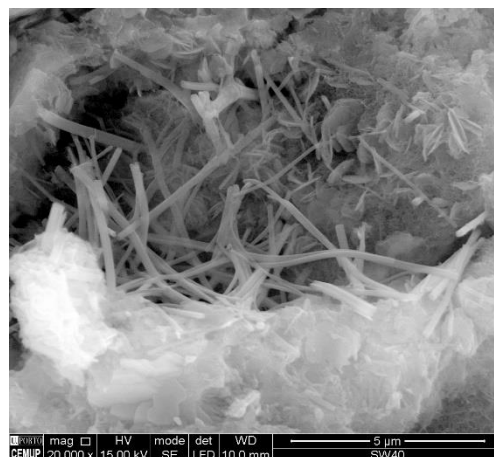


Figura 4.102 – Argamassa SW40 ampliada 20000 vezes

Em relação às amostras das argamassas aos 28 dias, foram realizadas análises químicas em zonas pontuais das amostras CTL, SW5 e SW40 que serão apresentadas de seguida.

Na amostra CTL foi encontrada uma forma de um composto diferente de toda a amostra (fig.4.103), pelo que se realizou uma análise na zona identificada por Z1.

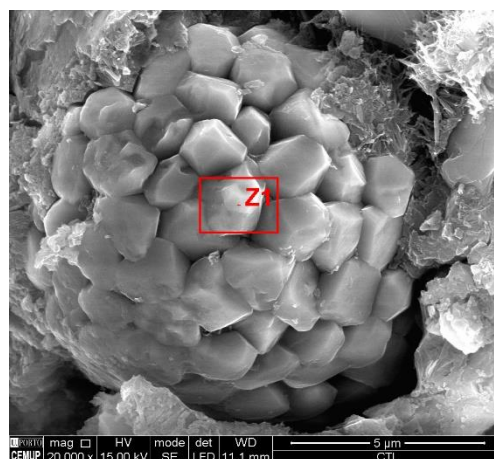
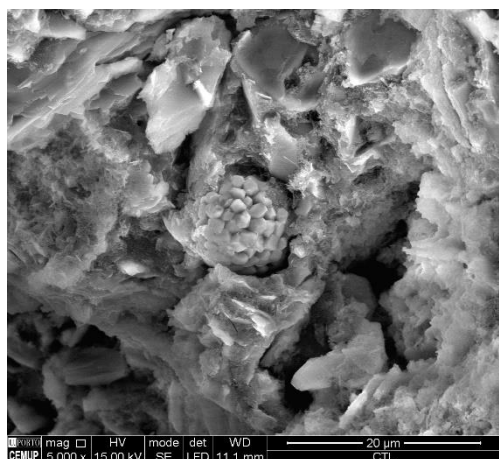


Figura 4.103- Amostra de argamassa CTL ampliada 5000 e 20000 vezes

Do espectro obtido (fig.4.104), constata-se uma quantidade elevadíssima de enxofre (S) e um valor significativo de ferro, pelo que poderá ser um vestígio de cinzas de pirite (FeS_2) usadas durante o processo do cimento como aditivo para obtenção do cru. Note-se que este composto apenas se encontrou num ponto de toda a amostra.

As figuras 4.105 e 4.106 são referentes às imagens duma amostra de argamassa SW40 ampliada 1000 e 5000 vezes e o espectro de análise química à zona identificada como Z1, respetivamente.

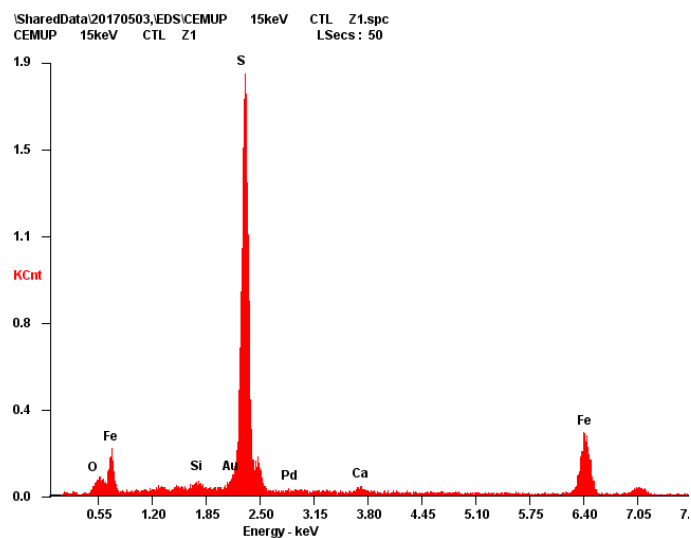


Figura 4.104 – Espectro da zona Z1 da figura 4.103

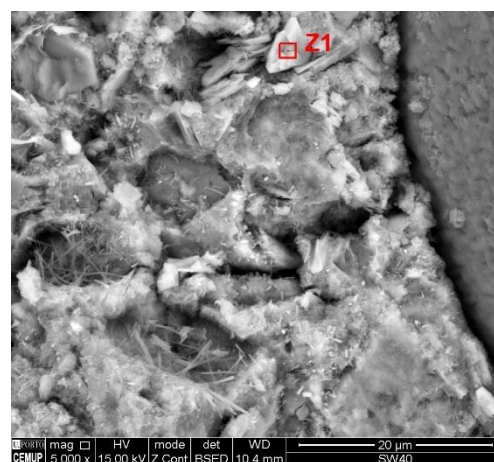
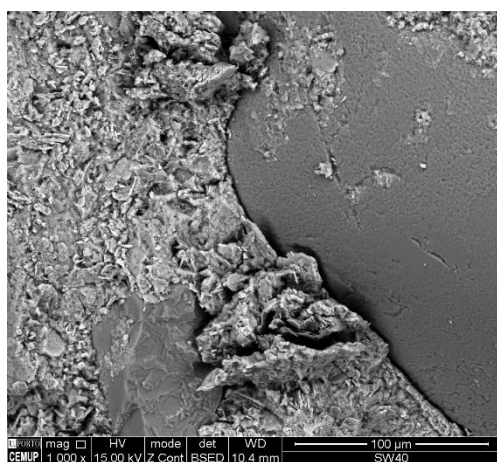


Figura 4.105 – Amostra de argamassa SW40 ampliada 1000 e 5000 vezes

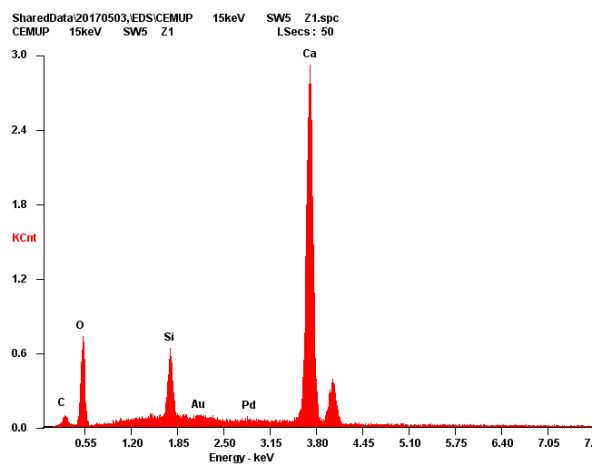


Figura 4.106 - Espectro da zona Z1 da fig.4.105

Da amostra de SW5 foi obtida a imagem seguinte, com uma magnitude de ampliação de 20000 vezes, onde se consegue identificar um cristal de hidróxido de cálcio quase hexagonal. O espectro da figura 4.107 confirma uma zona com elevadíssima percentagem de cálcio, e uma quantidade de oxigénio e sílica, mas bastante menores. De facto neste tipo de análise, em que a zona incidida tem a forma de um bolbo, é muito difícil analisar apenas a zona que se pretende e os resultados correspondendo a uma zona mais profunda, neste caso contendo gel silicato de cálcio hidratado.

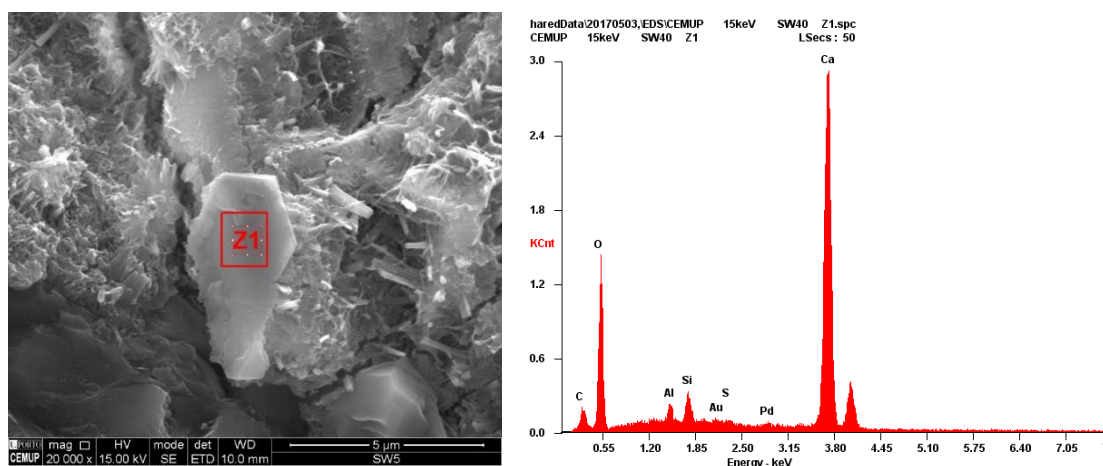


Figura 4.107 - Cristal de hidróxido de cálcio formado em argamassa SW5 e respetivo espectro

4.5.11. REAÇÃO ÁLCALIS-SÍLICA (ASR)

4.5.11.1. Procedimento experimental

Seguindo a ASTM C1260 (2014), método para determinar a potencial ASR de agregados em barras de argamassas, realizaram-se em laboratório provetes de argamassa (para as diferentes composições) que foram ensaiados durante 26 dias. Para determinar a expansão dos provetes compostos com SW em comparação com os de controlo (constituídos por 100 % de cimento) seguiu-se, na parte aplicável, a ASTM C1567 (2013) referente ao ensaio acelerado em barras de argamassa.

Após desmoldar e identificar os provetes estes foram submersos em água da torneira (fig.4.108) e colocados num recipiente fechado em estufa durante 24 horas a 80 °C com o objetivo de acelerar as reações de hidratação e endurecimento. Após esse período retiraram-se os provetes, um a um e, eliminou-se a água superficial com um pano húmido tendo-se tido sempre atenção aos pernos das extremidades.

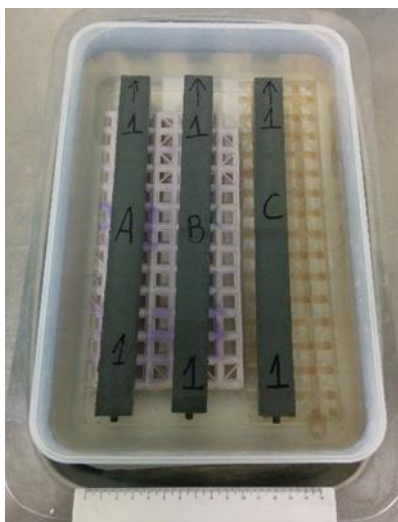


Figura 4.108 – Barras de argamassa para ensaio ASR imersas em água potável

Calibrou-se o defletômetro com a barra de ínvar (fig.4.109) antes de cada série de leituras, e durante todo o tempo de realização do ensaio (26 dias). As leituras dos provetes foram feitas nas 4 faces.

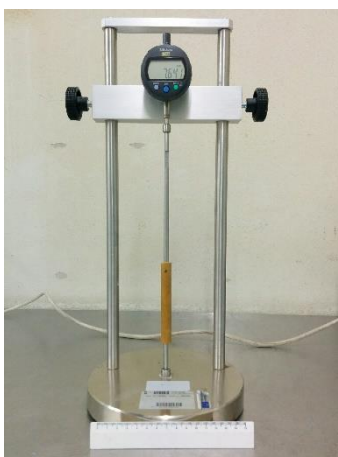


Figura 4.109 – Leitura da barra invar para ensaio ASR

Terminadas as primeiras leituras passaram-se os provetes para uma solução de hidróxido de sódio ($\text{Na}(\text{OH})_2$) previamente preparada (fig.4.110) e aquecida, para que não houvesse um grande desequilíbrio com a temperatura a que os provetes se encontravam, e ia-se adicionando mais solução (à medida que esta se ia evaporando), para manter o nível de solução cerca de 1 cm acima dos provetes.



Figura 4.110 – Preparação da solução de hidróxido de sódio

Como as leituras iniciais se realizaram a datas diferentes, na tabela 4.26 apresentam-se os resultados das expansões médias, das leituras dos 3 provetes de argamassas, durante os 26 dias que estiveram imersos em solução de $\text{Na}(\text{OH})_2$. A figura 4.111 corresponde à representação gráfica desses resultados.

Tabela 4.26 – Expansão média para cada tipo de argamassa

Dias em solução de NaOH	Expansão média dos 3 provetes (%)			
	CTL	SW5	SW20	SW40
0	0,00	0,00	0,00	0,00
1	-	-	0,01	0,01
2	-0,01	0,01	-	-
6	0,02	0,04	0,03	0,03
9	0,05	0,07	0,05	0,04
14	0,10	0,13	0,09	0,06
20	0,16	0,20	0,13	0,09
26	0,21	0,26	0,16	0,10

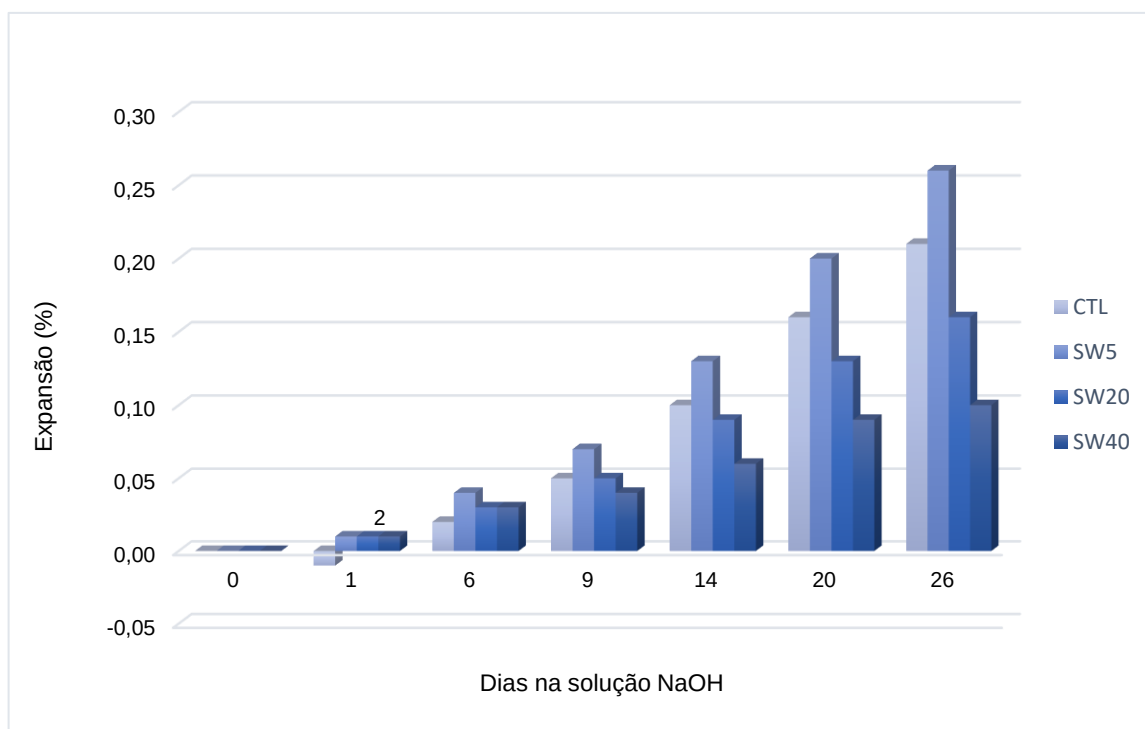


Figura 4.111 – Expansão dos provetes de argamassa até aos 26 dias

4.5.11.2. Observação em MEV – ASR

Dos provetes sujeitos à ASR durante 28 dias, foram analisadas amostras nos quatro tipos de argamassa (CTL, SW5, SW20 e SW40), procurando identificar o dano causado pela reação na superfície do agregado nas argamassas, e até que ponto nas misturas com diferentes percentagens de SW se criavam barreiras de defesa à reação.

Para as amostras dos provetes CTL e SW5, com uma ampliação de 5000 vezes já é visível um certo desgaste do agregado, enquanto que para as amostras dos provetes SW20 e SW40 foi preciso recorrer a uma magnitude de ampliação maior, de 20000 vezes, para identificar o mesmo efeito.

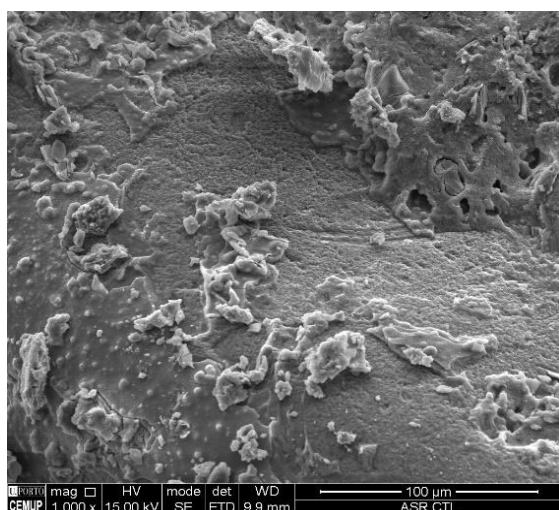


Figura 4.112 – Argamassa CTL ampliada 1000 vezes

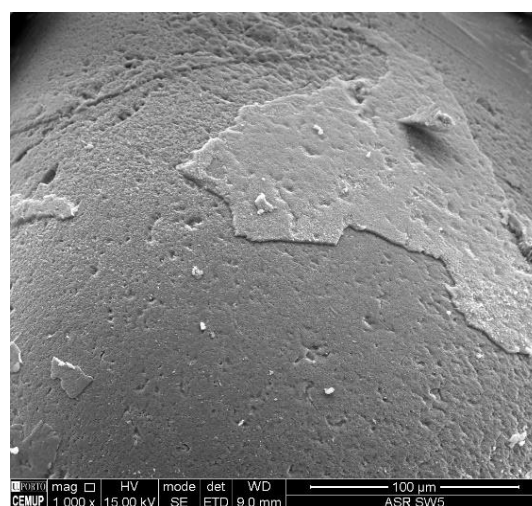


Figura 4.113 – Argamassa SW5 ampliada 1000 vezes

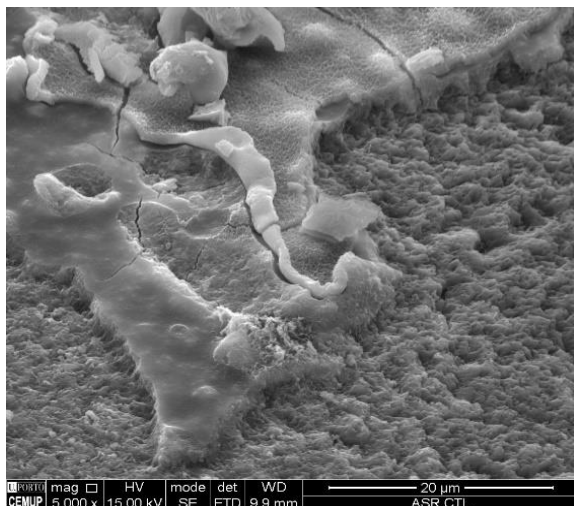


Figura 4.114- Argamassa CTL ampliada 5000 vezes

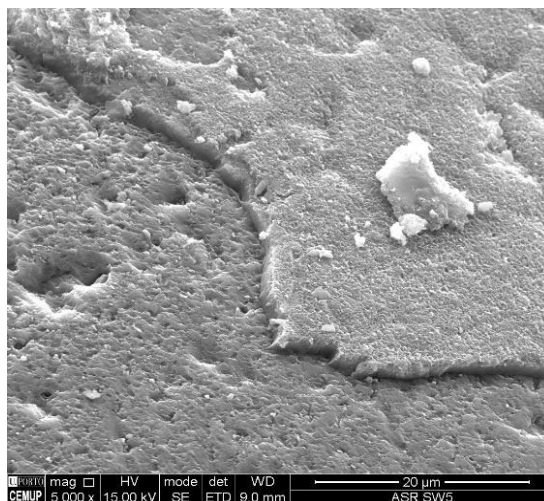


Figura 4.115 – Argamassa SW5 ampliada 5000 vezes

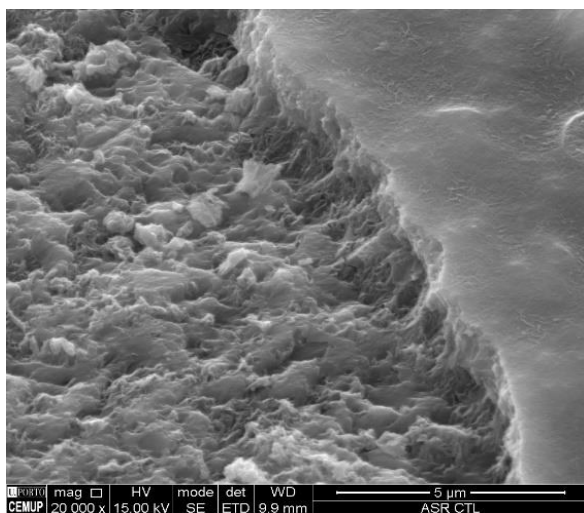


Figura 4.116 – Argamassa CTL ampliada 20000 vezes

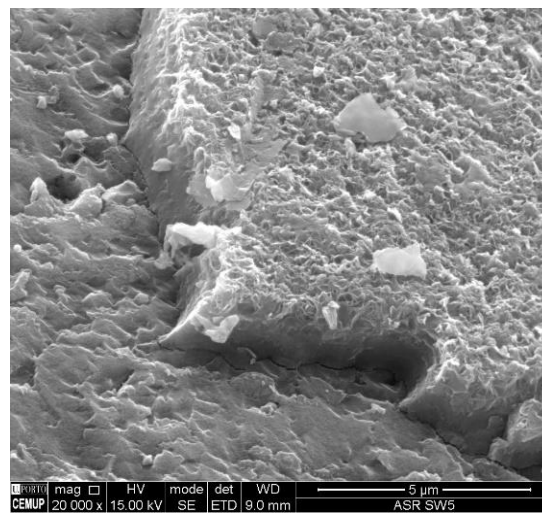


Figura 4.117 – Argamassa SW5 ampliada 20000 vezes

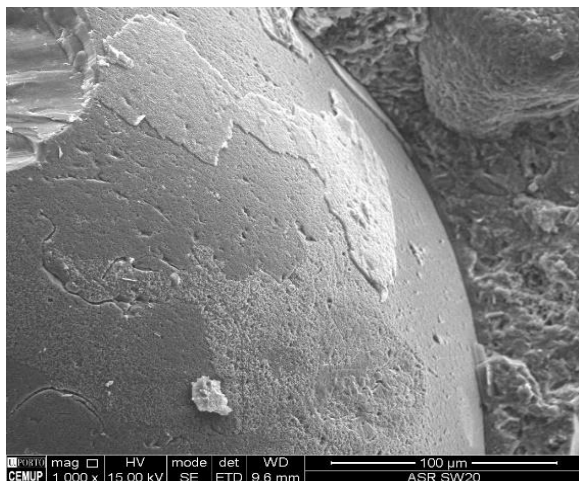


Figura 4.118 - Argamassa SW20 ampliada 1000 vezes

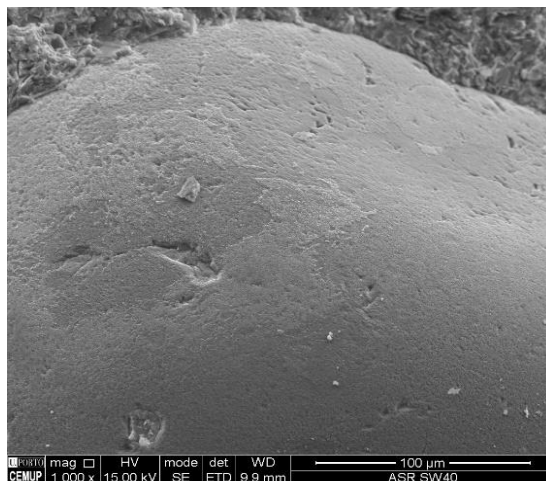


Figura 4.119 – Argamassa SW40 ampliada 1000 vezes

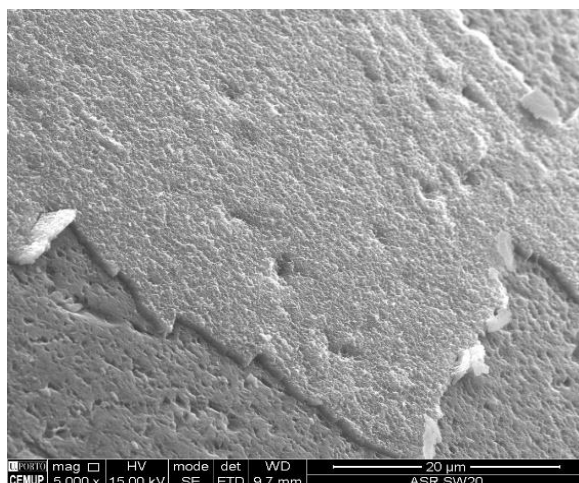


Figura 4.120 – Argamassa SW20 ampliada 5000 vezes

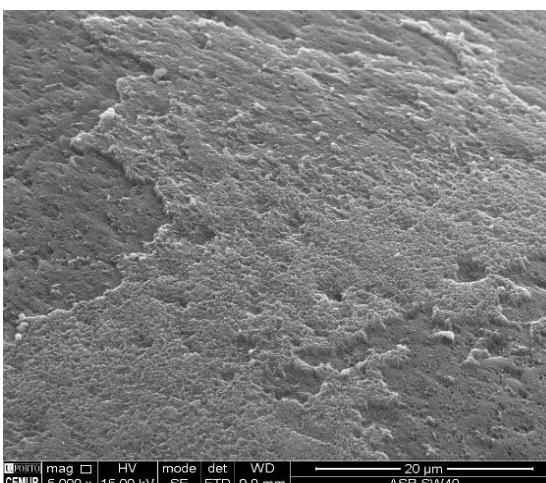


Figura 4.121 – Argamassa SW40 ampliada 5000 vezes

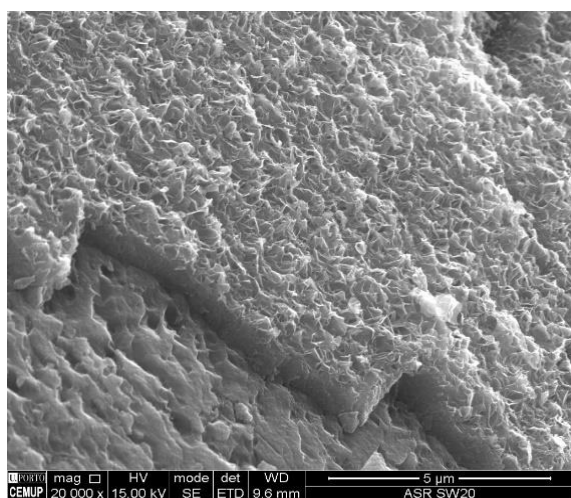


Figura 4.122 – Argamassa SW20 ampliada 20000 vezes

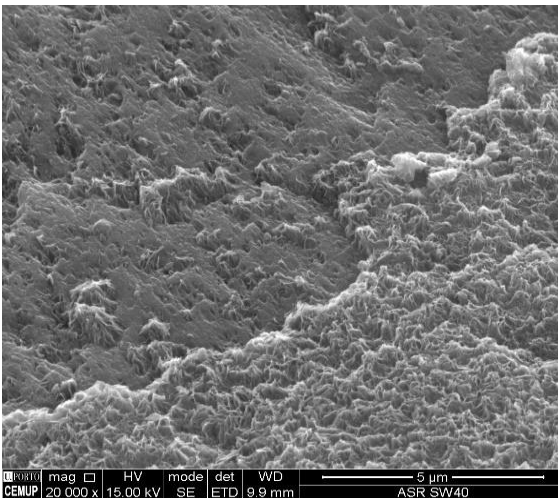


Figura 4.123 – Argamassa SW40 ampliada 20000 vezes

Nas figuras 4.124, 4.125 e 4.126 as zonas designadas po “Z1” correspondem às camadas de gel que se criam do processo acelerado de ASR, e as designadas por “Z2” apresentam o aspeto do agregado desgastado pelo ataque. Na figura 4.127 a zona Z6 corresponde à superfície do agregado e a zona Z7 corresponde ao gel formado da ASR.

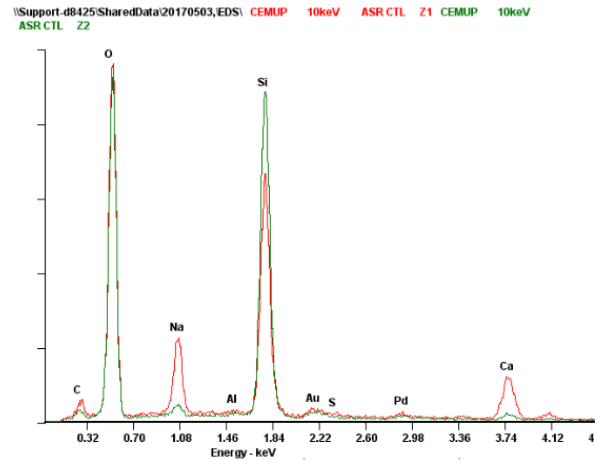
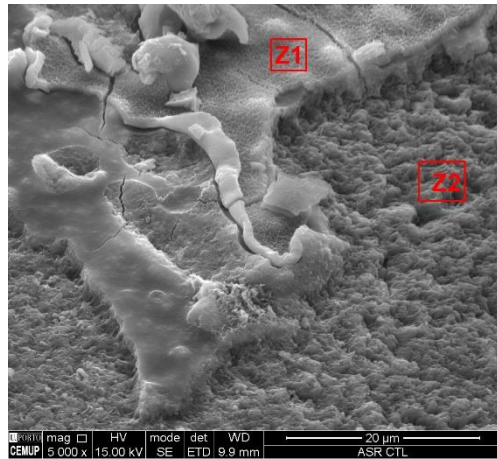


Figura 4.124 – Amostra de argamassa CTL ensaiada à ASR ampliada 5000 vezes e respetivo espectro

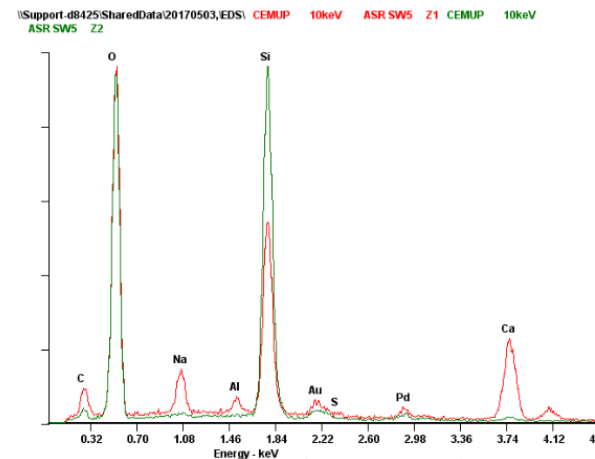
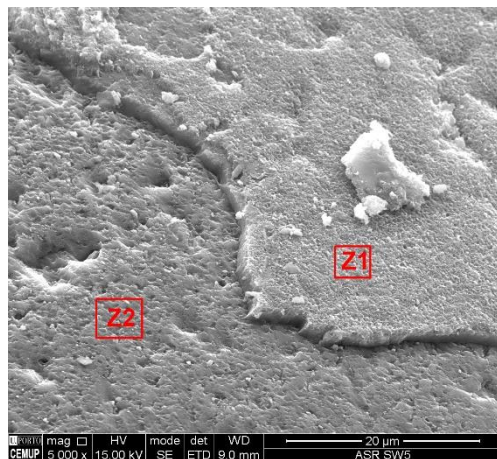


Figura 4.125 – Amostra de argamassa SW5 ensaiada à ASR ampliada 5000 vezes e respetivo espectro

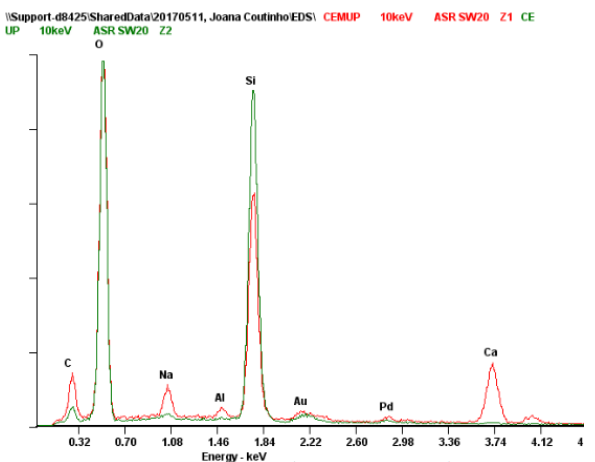
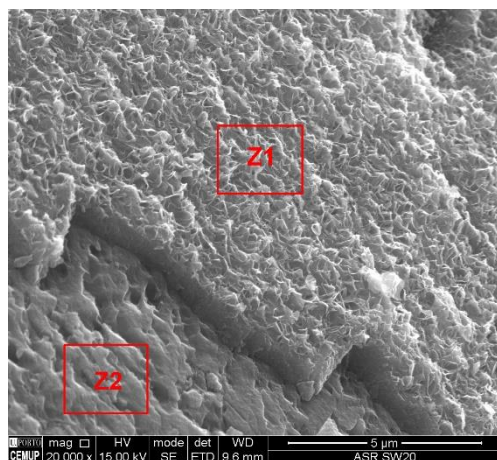


Figura 4.126 – Amostra de argamassa SW20 ensaiada à ASR ampliada 20000 vezes e respetivo espectro

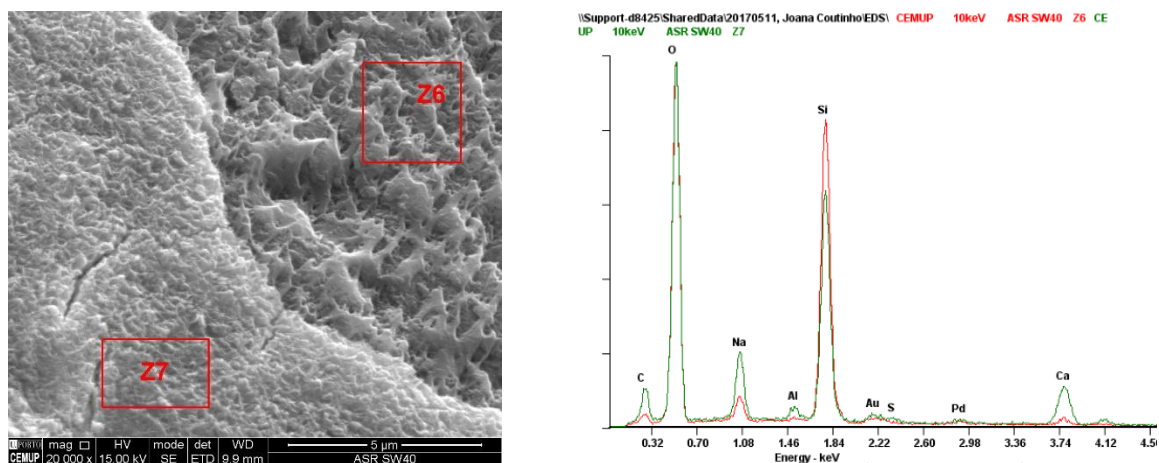


Figura 4.127 – Amostra de argamassa SW40 ensaiada à ASR ampliada 20000 vezes e respetivo espectro

Percebe-se, pelos espectros obtidos, que as zonas Z1 (e Z7 da argamassa SW40) representam a camada de gel criada da reação por serem zonas com uma quantidade de cálcio e sódio em geral maiores que a zona Z2 e Z6 (do agregado) com praticamente apenas silício e oxigénio, isto é, sílica.

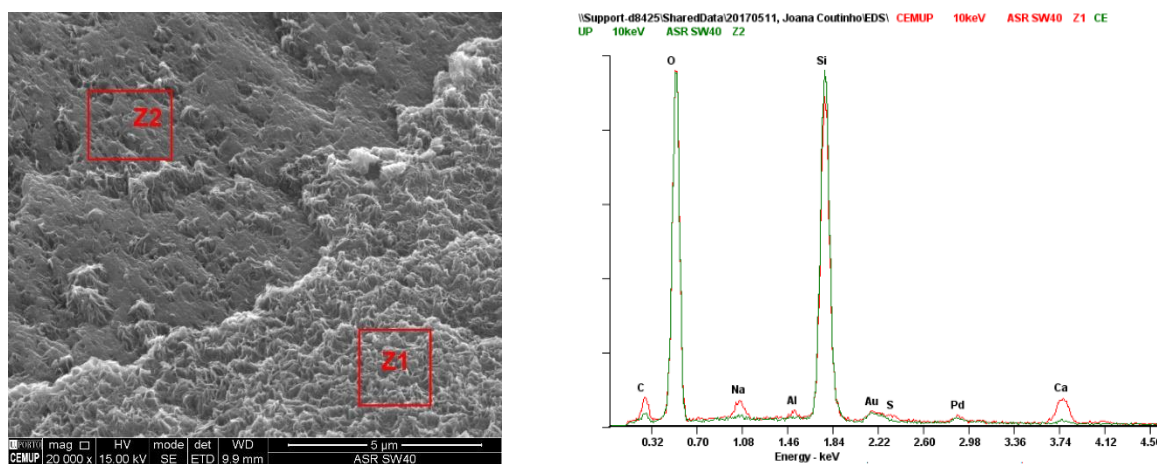


Figura 4.128 – Amostra de argamassa SW40 ampliada 20000 vezes e respetivo espectro

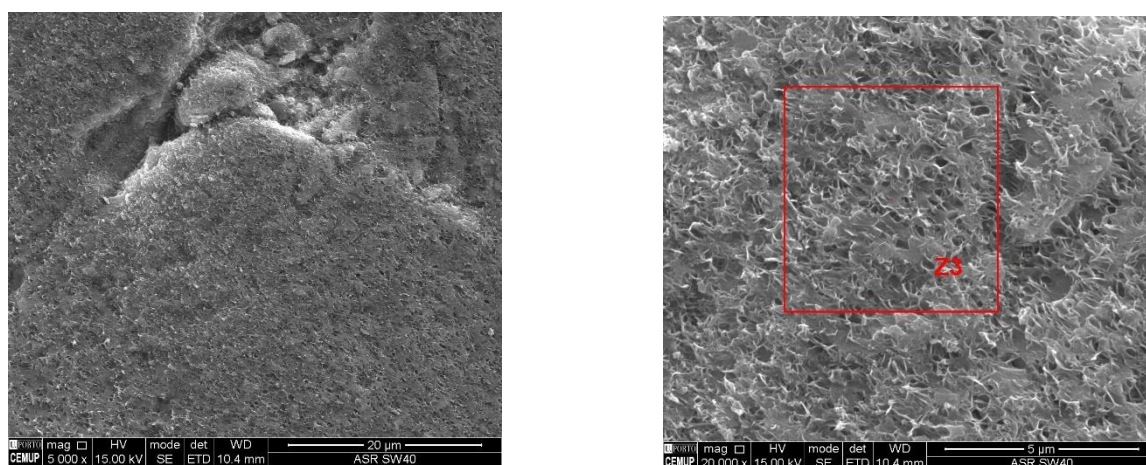


Figura 4.129 – Amostra de argamassa SW40 ampliada 5000 vezes à esquerda e 20000 vezes à direita

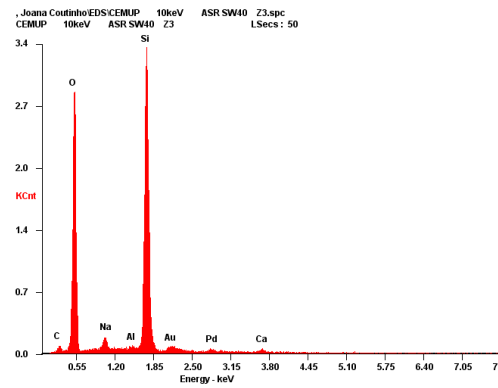


Figura 4.130 - Espectro da zona Z3 da figura 4.129

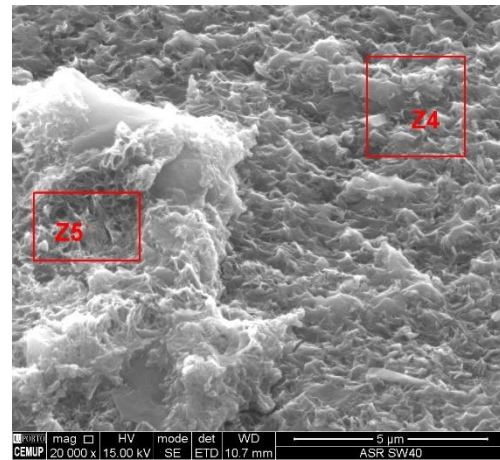
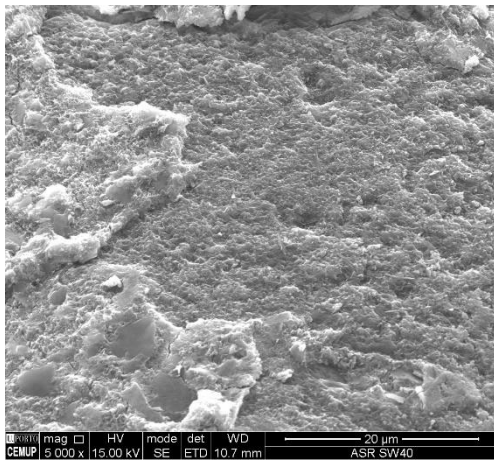


Figura 4.131 – Amostra de argamassa SW40 ampliada 5000 vezes à esquerda e 20000 vezes à direita

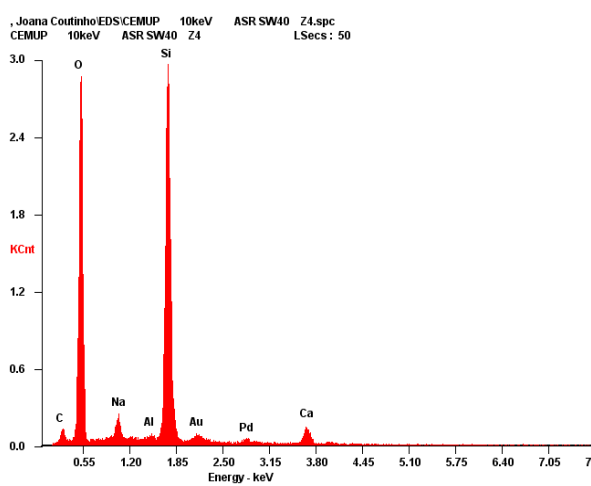


Figura 4.132 – Espectro da zona Z4 da fig.4.131

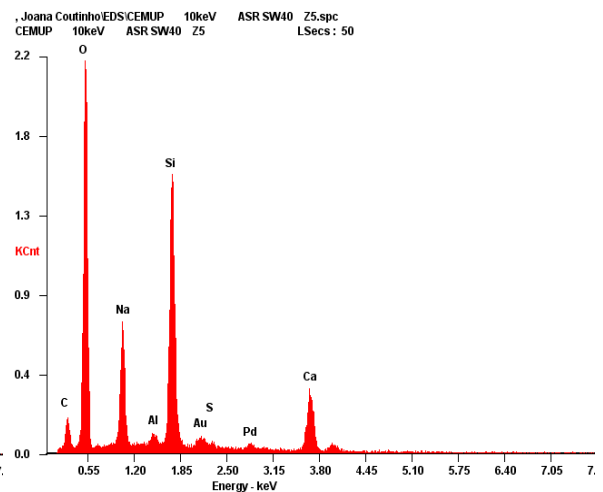


Figura 4.133 – Espectro da zona Z5 da fig.4.131

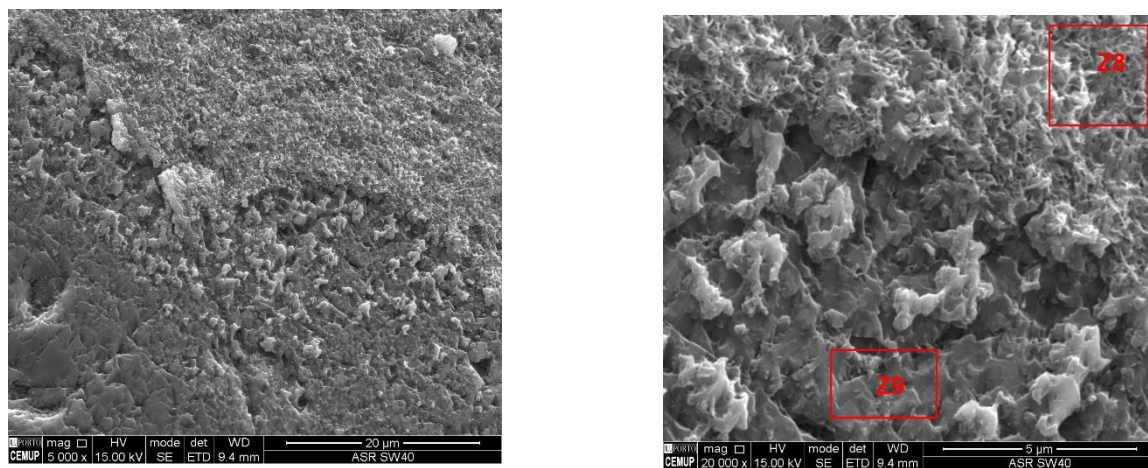


Figura 4.134 – Amostra de argamassa SW40 ampliada 5000 vezes à esquerda e 20000 vezes à direita

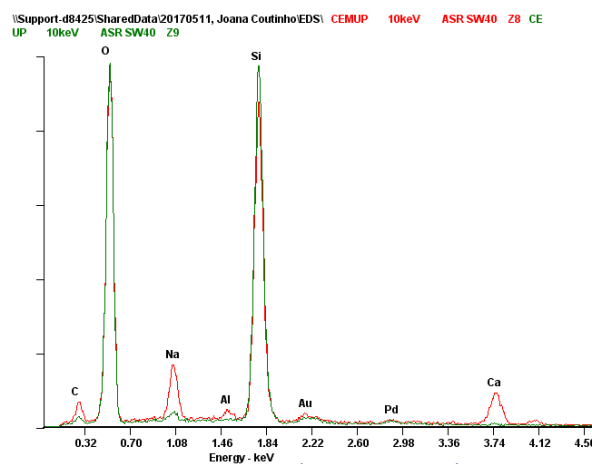


Figura 4.135 – Espectro da zona Z8 e Z9 identificadas na fig.4.134

5

DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5.1. INTRODUÇÃO

O presente capítulo tem como objetivo a discussão dos resultados obtidos do programa experimental descrito no capítulo 4, e uma breve análise a esses mesmos resultados.

Na apresentação de resultados, para além dos valores médios são também apresentados os valores do desempenho das argamassas com SW em relação ao controlo (CTL). Para tal, a avaliação do desempenho (em %) é obtida pela seguinte expressão:

$$Desempenho = \frac{X - X_{CTL}}{X_{CTL}} \times 100 \quad (5.1.)$$

Onde:

X é o resultado médio da propriedade X para a argamassa com substituição de cimento por SW;

X_{CTL} é o resultado da propriedade X para a argamassa de controlo.

Como para todos os ensaios, à exceção dos ensaios de carbonatação e ASR, foram realizada duas amassaduras para argamassas de controlo, CTL₁ e CTL₂, o valor de CTL usado para o cálculo do desempenho é a média dos resultados dos ensaios de CTL₁ e CTL₂.

5.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

5.2.1. GRANULOMETRIA

Como referido no capítulo anterior, não foi feito nenhum tratamento de moagem ou peneiração ao SW.

Das análises granulométricas feitas aos dois principais materiais, o cimento e o SW, é possível comparar as suas curvas granulométricas apresentadas na figura 5.1.

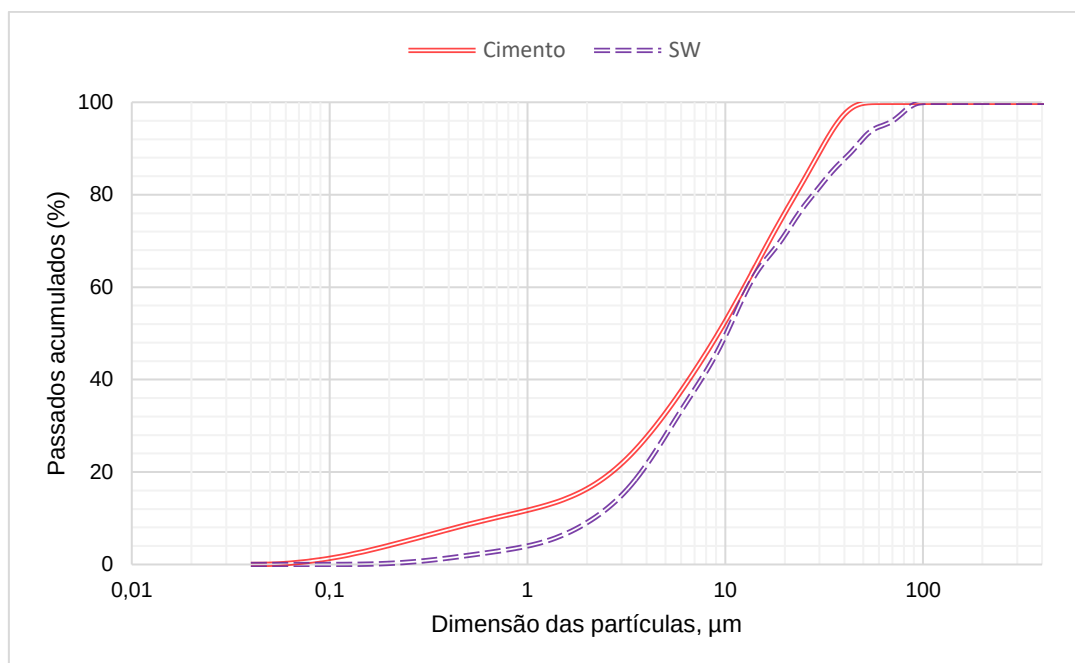


Figura 5.1 – Curvas granulométricas do cimento e do SW utilizados

Do estudo encontrado, e referido em 2.1.3 (Toledo, 2016), embora o pó de ardósia tenha passado por um processo de moagem (em moinho de bolas durante 2 minutos), são comparados na tabela 5.1 os valores de diâmetros d_{10} , d_{50} e d_{90} desse estudo, com os do SW e cimentos usados neste trabalho.

Ambos os resíduos têm dimensões de partículas superior à do cimento utilizado no presente trabalho para as dimensões d_{10} e d_{90} .

Tabela 5.1 – Granulometria dos materiais

Material	d_{10} (μm)	d_{50} (μm)	d_{90} (μm)	$d_{\text{médio}}$ (μm)
Cimento	0,74	10,13	33,76	10,13
SW	2,38	11,14	49,39	11,14
Pó de ardósia (Toledo, 2016)	1,20	5,53	40,5	5,53

O SW, como é um resíduo para substituir parcialmente o cimento, seria mais vantajoso ter dimensão média das partículas inferior à do cimento, o que não se verifica, com mais ênfase para as dimensões d_{10} e d_{90} dos dois materiais. Relativamente à dimensão d_{50} , dimensão média, há apenas um ligeiro aumento do SW comparativamente com o cimento.

5.2.2. ANÁLISES QUÍMICAS

Na tabela 5.2 compara-se a composição química do SW com os valores do cimento cedidos pela SECIL, e ainda do pó de ardósia do estudo já referido de Toledo (2016). São também apresentados os requisitos químicos definidos na norma NP 4220 (2015) em percentagem de massa seca que as pozolanas devem satisfazer e, os requisitos de fíler segundo a norma NP EN 12620 (2010) de agregados para betão.

De acordo com a norma NP EN 196-2 (2014) o cálculo do teor de álcalis equivalente é obtido sabendo as percentagens de óxido de sódio (Na_2O) e de óxido de potássio (K_2O) através do cálculo seguinte:

$$\% \text{Na}_2\text{O}_{eq} = \% \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \times \% \text{K}_2\text{O} \quad (5.2.)$$

Donde resulta um teor de álcalis equivalente (Na_2O_{eq}) para o SW de 3,26 % (menor que os 4,62 % do estudo de Toledo, 2016) que por ser menor que 5,00 % cumpre os requisitos da NP 4220 (2015).

Tabela 5.2 – Comparação das análises químicas

Elementos (%)	Cimento (SECIL)	SW	Requisitos segundo a NP4220 (%)	Requisitos segundo a EN NP 12620 (%)	Pó de ardósia (Toledo, 2016)
Óxido de silício (SiO_2)	20,47	52,34			59,56
Óxido de alumínio (Al_2O_3)	4,22	24,77			16,98
Óxido de ferro (Fe_2O_3)	3,27	9,25			8,49
Óxido de manganês (MnO)	-	0,08			0,13
Óxido de cálcio (CaO)	63,33	0,45	$\leq 10,00$		3,55
Óxido de magnésio (MgO)	1,88	2,15			3,30
Óxido de sódio (Na_2O)	0,19	1,10			2,05
Óxido de potássio (K_2O)	0,62	3,29			3,90
Óxido de sódio equivalente (Na_2O_{eq})	0,60	3,26	$\leq 5,00$		4,62
Dióxido de titânio (TiO_2)	-	1,11			0,86
Óxido de fósforo (P_2O_5)	-	0,19			0,51
Perda ao fogo	2,45	5,01	$\leq 9,00$		-
Sulfatos (SO_3)	3,08	0,29	$\leq 3,00$	$\leq 0,20$	-
Cloretos (Cl^-)	0,06	0,03	$\leq 0,10$	$\leq 0,10$	-
Resíduo insolúvel	0,93	-			-
Cal livre		-			-

5.2.3. POZOLANICIDADE

Como foi possível constatar no diagrama de pozolanicidade (fig.4.20) do ponto 4.3.4. do presente trabalho, ambas as amostras (SW5 e SW20) resultaram em ensaios negativos.

O normal em pozolanas naturais é que o aumento da sua percentagem, em misturas, corresponda a valores mais baixos de concentração de óxido de cálcio como ilustra a figura 5.2. do estudo apresentado por Coutinho et al. (1997).

Nos resultados obtidos para o SW aconteceu precisamente o contrário. Passar de SW5 para a percentagem de SW20 levou a um maior afastamento do limite que satisfaz o ensaio, por isso, a tendência seria do SW40 afastar-se ainda mais da curva de concentração de saturação em óxido de cálcio, pelo que não se realizou ensaio de pozolanicidade do SW40.

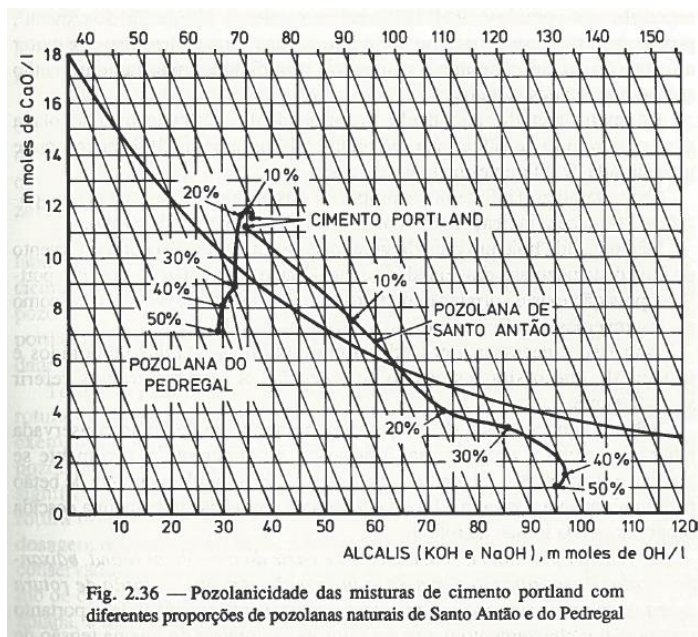


Figura 5.2 – Pozolanicidade de misturas de cimento Portland com pozolanas naturais – Adaptada de Coutinho, A. et al. (1997)

5.2.4. MASSA VOLÚMICA

Para a massa volúmica apresenta-se na tabela 5.3 a comparação de valor do ensaio realizado ao cimento com o valor indicado na ficha técnica da SECIL, e também o valor final do SW, lembrando que se tomou a média das amostras SW₁ e SW₂ indicada na tabela 4.8, e agora se designa como SW_{final}. Segundo a ELV, de análise às propriedades físico-mecânicas da ardósia, a massa volúmica corresponde a 2809 kg/m³ (2,809 g/cm³) o que vai de encontro ao valor SW_{final} (ELV, folheto não datado).

Tabela 5.3 – Resumo das massas volúmicas dos ligantes usados

Referência	ρ (g/cm ³)
Cimento – ensaio realizado	3,13
SW _{final}	2,81
Cimento (SECIL)	3,12
Ardósia (ELV)	2,81

Os resultados obtidos estão, portanto, de acordo com os das respetivas empresas.

5.2.5. ENSAIO BLAINE

Para as condições do método de Blaine, não foi possível caracterizar a superfície específica do SW. Contudo, foram realizados novos ensaios no LEMC ajustando a porosidade para valores de 0,100, 0,300 e 0,400. Apenas para a porosidade de 0,400 foi possível realizar o ensaio tendo-se obtido uma superfície específica para o SW de 6021 cm²/g.

Do ensaio realizado ao cimento o valor da superfície específica obtido foi de 4041 cm²/g, que em comparação com os dados da SECIL de 3729 cm²/g, indica uma finura ligeiramente maior que o esperado.

5.2.6. CONSISTÊNCIA NORMAL E TEMPOS DE PRESA

Para estes ensaios é feita uma comparação, na tabela 5.4, do ensaio realizado à pasta CTL com 100 % de cimento com os valores apresentados na ficha técnica da SECIL também realizados segundo a norma NP EN 196-3 (2017).

Tabela 5.4 – Tempos de início e fim de presa

Pasta	w/c	Tempo de IP	Diferença em relação ao CTL (IP)	Tempo de FP	Diferença em relação ao CTL (IP)
CTL	0,28	2h37min	-	-	-
SW _p	0,28	2h47min	+ 10 min	3h22min	- 15 min
Cimento (SECIL)	0,28	2h59min	+ 22 min	4h48min	+ 1h11min

De acordo com a norma NP 197-1 (2012), o tempo de início de presa deve ser superior a 60 minutos para o CEM I 42,5 R, que como se pode verificar é válido tanto para a pasta CTL como para SW_p (pasta com SW). Já a norma NP 4220 (2015) o tempo de presa das pozolanas não deve exceder os 120 minutos em relação ao tempo de presa de um cimento sem adições (neste caso, o CTL), o que se verifica para a pasta SW.

Comprova-se que o CTL perde plasticidade mais cedo que o previsto pela SECIL. Para a pasta com SW, como foi possível analisar na tabela 5.4, tem perda de plasticidade 10 minutos mais tarde que o CTL e adquire firmeza 15 minutos mais tarde.

Note-se que não foi possível encontrar na bibliografia resultados deste ensaio para o pó de ardósia.

5.2.7. EXPANSIBILIDADE

A tabela 5.5 é referente aos valores médios obtidos das leituras apresentadas na tabela 4.10, donde se pode verificar que o SW_p tem uma expansibilidade ligeiramente inferior ao cimento. Tanto a norma NP EN 197-1 (2012) para o cimento, como a norma NP 4220 (2015) para materiais pozolânicos definem que o valor da expansão não deve exceder os 10 mm, o que mostra que ambos os materiais são favoráveis, demonstrando a inexistência de cal livre a mais.

Tabela 5.5 – Expansibilidade média

Provetes	Expansibilidade média (mm)	Cumprimento de normas
CTL	2	✓
SW _p	1	✓
Cimento (SECIL)	1	

5.2.8. TRABALHABILIDADE

Apresentam-se na tabela 5.6 os valores médios da trabalhabilidade de todas as argamassas produzidas no programa experimental. Verifica-se que SW5 e SW20 demonstraram um ligeiro decréscimo no valor de espalhamento e, que para 20 % e 40 % de SW e quantidade mínima de SP (1,50 g e 3,0 g respetivamente) se conseguiu uma trabalhabilidade semelhante ao CTL (este objetivo foi conseguido após vários ensaios antes da realização do programa experimental).

Tabela 5.6 – Trabalhabilidade média das argamassas

Argamassa	Média (mm)	Desvio-padrão
CTL	227,3	0,7
SW5	226,2	1,0
SW20	226,4	2,2
SW40	227,3	1,7

5.2.9. RESISTÊNCIAS MECÂNICAS

Os resultados dos ensaios de flexão obtidos e o desempenho das argamassas SW, em relação ao CTL, são os apresentados na tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Resistências médias à flexão (MPa) e desempenho (%) das argamassas com SW

		Argamassas					
		CTL ₁	CTL ₂	CTL	SW5	SW20	SW40
R _f aos 7 dias	Resultado (MPa)	6,50	6,37	6,43	6,40	5,80	4,60
	σ	0,36	0,40	0,35	0,17	0,17	0,36
	Desempenho (%)	-	-	-	- 1	- 10	- 29
R _f aos 28 dias	Resultado (MPa)	7,27	7,03	7,15	7,40	6,90	5,20
	σ	0,25	0,25	0,26	0,12	0,12	0,25
	Desempenho (%)	-	-	-	+ 4	- 4	- 27
R _f aos 56 dias	Resultado (MPa)	6,87	7,27	7,07	7,10	6,80	5,20
	σ	0,23	0,25	0,31	0,36	0,40	0,25
	Desempenho (%)	-	-	-	+ 1	- 5	- 27
R _f resistiv.	Resultado (MPa)	7,80	7,67	7,74	7,60	6,90	5,60
	σ	0,17	0,29	0,23	0,12	0,12	0,25
	Desempenho (%)	-	-	-	- 2	- 11	- 28
R _f aos 84 dias	Resultado (MPa)	7,70	7,30	7,50	7,40	6,30	5,20
	σ	0,00	0,00	0,22	0,36	0,25	0,29
	Desempenho (%)	-	-	-	- 2	- 16	- 31

Na tabela 5.8 apresentam-se os resultados referentes ao ensaio de compressão e os respectivos desempenhos das argamassas SW.

Tabela 5.8 – Resistências médias à compressão (MPa) e desempenho (%) das argamassas com SW

		Argamassas					
		CTL ₁	CTL ₂	CTL	SW5	SW20	SW40
R _c aos 7 dias	Resultado (MPa)	45,50	43,60	44,56	43,90	35,90	23,70
	σ	1,87	1,12	1,76	0,45	0,77	0,47
	Desempenho (%)	-	-	-	- 2	- 19	- 47
R _c aos 28 dias	Resultado (MPa)	56,50	55,60	56,05	54,00	43,30	28,00
	σ	1,18	1,21	1,23	1,38	0,68	0,48
	Desempenho (%)	-	-	-	- 4	- 23	- 50
R _c aos 56 dias	Resultado (MPa)	59,00	59,80	59,38	55,88	44,35	28,50
	σ	1,88	1,65	1,75	1,55	0,75	0,40
	Desempenho (%)	-	-	-	- 6	- 25	- 52
R _c resistiv.	Resultado (MPa)	62,70	59,50	61,09	57,70	43,90	27,95
	σ	1,60	1,01	2,12	1,38	1,18	0,48
	Desempenho (%)	-	-	-	- 6	- 28	- 54
R _c aos 84 dias	Resultado (MPa)	62,30	62,60	62,44	59,22	43,83	27,85
	σ	1,33	1,38	1,30	1,36	0,75	0,67
	Desempenho (%)	-	-	-	- 5	- 30	- 55

Da análise do ensaio de compressão constata-se que a argamassa SW5 obteve sempre um desempenho negativo, contudo, sofre apenas um ligeiro decréscimo da resistência em relação ao CTL. A argamassa SW20 e SW40 tiveram um pior desempenho, com o SW40 claramente de piores resultados.

Os valores mínimos fixados pela norma NP EN 197-1 (2012), para os cimentos correntes são os indicados na tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Requisitos de resistência à compressão (adaptado da NP EN 197-1, 2012)

Classe de Resistência	Resistência à compressão (MPa)		
	Resistência inicial		Resistência de referência
	Aos 2 d	Aos 7 d	Aos 28 d
42,5 L	-	≥ 16,0	
42,5 N	≥ 10,0	-	≥ 42,5 ≤ 62,5
42,5 R	≥ 20,0	-	

No caso presente como se trata de um CEM I 42,5 R os valores obtidos aos 28 dias estão dentro do intervalo exigido.

5.2.10. ÍNDICE DE ATIVIDADE

Segundo a norma NP 4220 (2015) o índice de atividade indica a influência da pozolana na resistência à compressão do betão e é quantificado pela razão, expressa em percentagem, entre as resistências à compressão aos 28 dias da argamassa normal, preparada com cimento de referência e pozolana nas suas proporções correspondentes à classe de pozolanicidade declarada pelo produtor, e da argamassa normal produzida apenas com o cimento de referência.

As classes de pozolanicidade de acordo com a norma NP 4220 (2015) são as apresentadas na tabela 5.10. Para o caso em estudo, das argamassas SW5, SW20 e SW40, apenas o tipo SW5 não se enquadra nas percentagens de cimento de referência e pozolana.

Tabela 5.10 – Classes de pozolanicidade e respetivas composições do ligante da argamassa (Adaptada da norma NP 4220, 2015)

Classe de pozolanicidade	Ligante da argamassa normal	
	Cimento de referência (% em massa)	Pozolana (% em massa)
POZ 90/10	90	10
POZ 85/15	85	15
POZ 80/20	80	20
POZ 75/25	75	25
POZ 70/30	70	30
POZ 65/35	65	35
POZ 60/40	60	40

Embora não sejam contempladas na norma classes para as percentagens de 95 % de cimento e 5 % de SW (POZ 95/5) foi feita uma análise de referência para estas percentagens.

Para critério de aceitação, o índice de atividade (IA) das pozolanas aos 28 dias deve ser igual ou superior à percentagem de cimento de referência correspondente à classe de pozolanicidade.

Na tabela 5.11 apresentam-se os valores do IA para as idades de 28 dias.

Tabela 5.11 – Índice de atividade das pozolanas

Argamassas	Mínimo pretendido (%)	IA aos 28 d (%)
SW5	95	96
SW20	80	77
SW40	60	50

Assim poderá dizer-se que embora o ensaio de pozolanicidade tenha dado negativo para SW, em termos de índice de atividade o resultado é satisfatório para 5 % de substituição apesar de a finura ser maior do que a do cimento. Para 20 e 40 % os valores mínimos não são atingidos

5.2.11. RESISTIVIDADE

Como foi referido em 4.5.5 o ensaio de resistividade é um ensaio não destrutivo, o que permitiu avaliar a resistividade média das argamassas aos 28 e depois aos 56 dias.

Os resultados dos dois ensaios são apresentados nas tabelas 5.12 e 5.13 para aos 28 e 56 dias, respetivamente.

Tabela 5.12 – Resistividade média aos 28 dias

Argamassa	Provete	ρ (k Ω .cm)	$\rho_{\text{médio}}$ (k Ω .cm)	σ	Coefficiente de variação (%)	Desempenho (%)
CTL1	1	4,16	4,19	0,02	0,46	-
	2	4,19				
	3	4,20				
CTL2	1	4,02	3,97	0,05	1,29	-
	2	3,92				
	3	3,97				
CTL	-	-	4,08	0,11	2,76	-
SW5	1	3,80	3,76	0,07	1,87	- 8
	2	3,80				
	3	3,68				
SW20	1	3,01	2,98	0,03	0,91	- 27
	2	2,98				
	3	2,96				
SW40	1	2,34	2,31	0,04	1,75	- 43
	2	2,26				
	3	2,32				

Tabela 5.13 – Resistividade média aos 56 dias

Argamassa	Provete	ρ (k Ω .cm)	$\rho_{\text{médio}}$ (k Ω .cm)	σ	Coefficiente de variação (%)	Desempenho (%)
CTL1	1	4,39	4,37	0,04	0,91	-
	2	4,32				
	3	4,39				
CTL2	1	4,23	4,19	0,03	0,76	-
	2	4,16				
	3	4,19				
CTL	-	-	4,28	0,09	2,13	-
SW5	1	3,93	3,88	0,07	1,79	- 9
	2	3,91				
	3	3,80				
SW20	1	3,08	3,07	0,02	0,52	- 28
	2	3,08				
	3	3,06				
SW40	1	2,54	2,51	0,05	2,01	- 41
	2	2,46				
	3	2,55				

5.2.12. CARBONATAÇÃO

Os resultados referentes às áreas médias de carbonatação e respectivo desempenho das argamassas SW são os indicados na tabela 5.14.

Tabela 5.14 – Área média de carbonatação e desempenho das argamassas SW

Argamassa	Profundidade média de carbonatação (cm)	Área de carbonatação média (cm ²)	Desvio-padrão	Desempenho
CTL	0,38	5,48	0,39	-
SW5	0,46	6,47	0,14	- 18
SW20	0,64	8,64	0,30	- 58
SW40	1,44	14,77	0,33	- 170

5.2.13. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Na tabela 5.15 apresenta-se a média do coeficiente de absorção de água por capilaridade e o desempenho das argamassas com SW. A figura 5.7 é a representação gráfica dos desempenhos obtidos.

Tabela 5.15 – Coeficiente médio de absorção de água por capilaridade e desempenho

Argamassa	$S_{\text{médio}}$	σ	Coeficiente de variação (%)	Desempenho (%)
CTL1	0,0536	0,0061	11	-
CTL2	0,0410	0,0029	7	-
CTL	0,0473	0,0081	17	-
SW5	0,0456	0,0056	12	+ 4
SW20	0,0651	0,0058	9	- 38
SW40	0,0830	0,0122	15	- 76

A compilação das curvas resultantes do ensaio de absorção de água por capilaridade, durante as primeiras 4h30min de ensaio são apresentadas na página seguinte, na figura 5.8, cuja inclinação corresponde ao coeficiente de absorção para esse provete.

Como se pode verificar, tanto nas argamassas CTL (a tons de azul escuro e azul claro) como o SW5 (a tons de cinza), o SW20(a laranja) e SW40(a amarelo), os coeficientes de correlação R^2 foram todos superior a 0,95 evidenciado uma boa relação linear entre as variáveis.

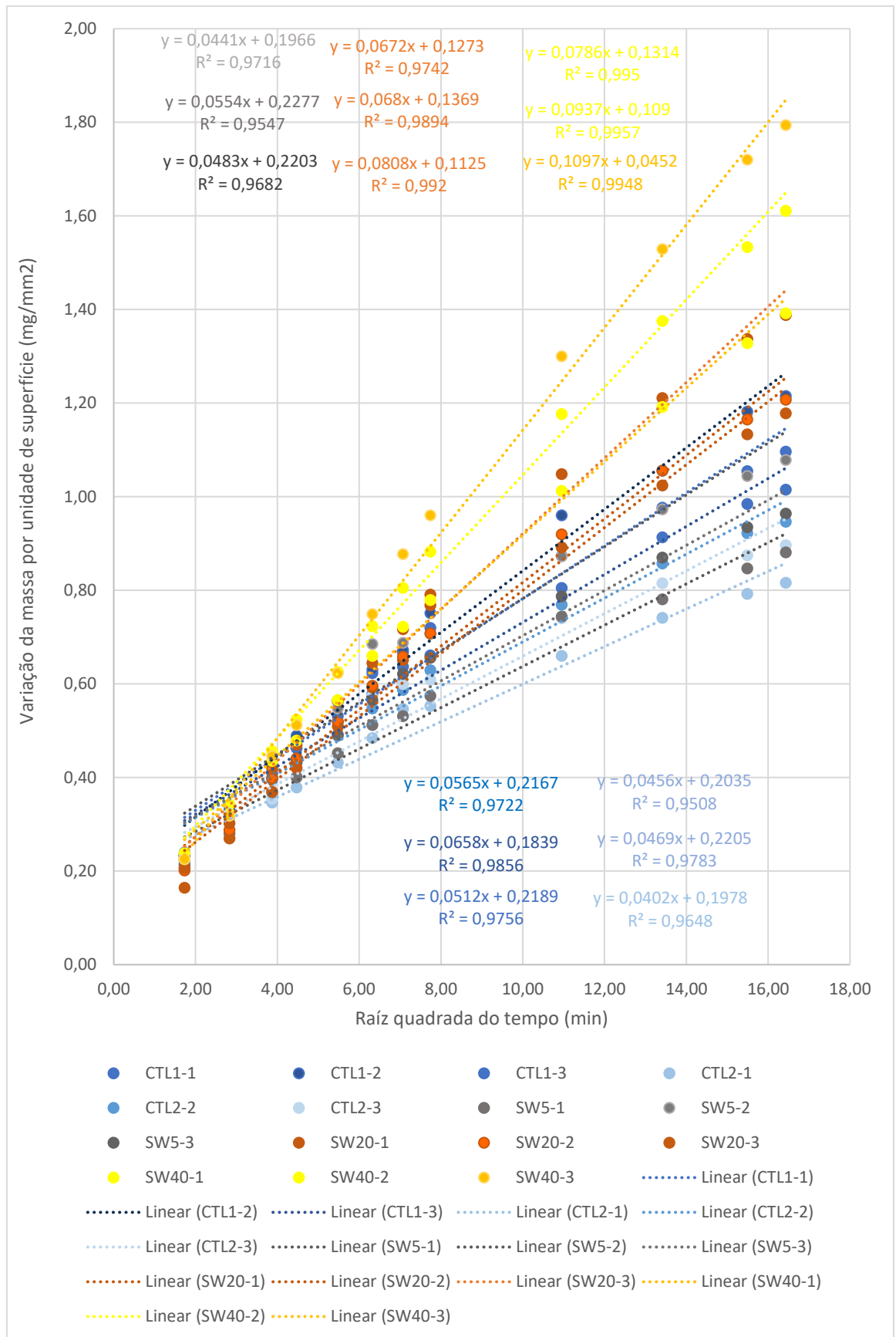


Figura 5.3 – Curvas de absorção capilar obtidas para as primeiras 4h30min do ensaio

5.2.14. PENETRAÇÃO DE CLORETOS

Na tabela 5.16, apresenta-se por argamassa o resultado do $D_{\text{médio}}$, com respetivo desvio padrão e coeficiente de variação. Como se pode analisar, nas argamassas com maior percentagem de adição houve um aumento significativo do coeficiente de difusão, principalmente na argamassa SW40. No entanto, para o SW5 o valor foi semelhante aos obtidos para a argamassa de controlo.

Tabela 5.16 – Apresentação de $D_{\text{médio}}$ e desempenho das argamassas

Argamassa	$D_{\text{médio}}(10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$	σ	Coeficiente de Variação(%)	Desempenho
CTL ₁	10,31	0,02	0,19	-
CTL ₂	10,03	0,02	0,20	-
CTL	10,17	0,15	1,51	-
SW5	10,93	0,04	0,37	-7
SW20	17,38	0,10	0,58	-71
SW40	28,49	0,03	0,11	-180

5.2.15. REAÇÃO ÁLCALIS-SÍLICA (ASR)

Como a norma usada, ASTM C1260 (2014), refere que as leituras do ensaio devem ser realizadas pelo menos durante 14 dias, apresentam-se na tabela 5.17 os respetivos resultados assim como o desempenho aos 14 e 26 dias em solução. A representação gráfica dos desempenhos está na figura 5.10.

Tabela 5.17 – Expansão ao fim de 14 e 26 dias na solução de NaOH

Argamassa	Expansão (%)		Desempenho (%)	
	14 d	26 d	14 d	26 d
CTL	0,10	0,21	-	-
SW5	0,13	0,26	- 30	- 19
SW20	0,09	0,16	+ 10	+ 24
SW40	0,06	0,10	+ 40	+ 52

Como se pode verificar pelos resultados, a reação ASR parece ser mais intensa para uma substituição baixa de cimento (5 %) e depois reduz significativamente para teores maiores de substituição, chegando a diminuir para cerca de metade da expansão quando se utiliza 40 % de substituição.

Note-se que a quantidade de álcalis (sódio equivalente) é de 0,60 % no cimento (tabela 5.2) e no SW é de 3,26 % portanto mais elevado. Seria de esperar maior reatividade ao substituir cimento por SW o que só se verifica para 5 % de substituição. Na realidade para 20 e 40 % verifica-se uma inesperada redução da expansão. Esta redução pode ter várias causas de origem química incluindo o facto de apenas nestes casos (SW20 e SW40) se ter usado SP.

Estes resultados são surpreendentes e, a confirmarem-se, este fenómeno poderá ser aproveitado em situações específicas de durabilidade de estruturas sujeitas a ASR.

6.

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÕES GERAIS

Neste capítulo apresenta-se na tabela 6.1 uma síntese dos resultados obtidos para todas as argamassas ensaiadas.

Da análise geral dos resultados apresentados é possível concluir que:

- Das análises químicas realizadas a uma amostra de SW as percentagens de óxido de cálcio, de sulfatos, de cloretos e o teor de álcalis equivalente cumprem os requisitos normativos da NP 4220 (2015);
- Embora o ensaio de pozolanicidade tenha sido negativo, o índice de atividade aos 28 dias para a argamassa SW5 cumpre o requisito previsto na NP 4220 (2015);
- A trabalhabilidade diminuiu ligeiramente nas argamassas SW5 e SW20, mas não de forma significativa;
- Em relação às resistências à flexão a argamassa SW5 apresentou uma ligeira melhoria aos 28 e 56 dias. De um modo geral as argamassas SW5 e SW20 tiveram resistências próximas do controlo, sendo a argamassa SW40 a que apresenta um pior desempenho;
- Relativamente à resistência à compressão verifica-se um decréscimo de resistência à medida que aumenta a idade dos provetes com SW. Contudo, a argamassa SW5 apresenta valores de resistência bastante próximos da argamassa CTL. Para SW20 e SW40 a perda de resistência é significativa;
- Da comparação da resistividade constata-se um ligeiro aumento dos 28 para os 56 dias mas as argamassas com substituição SW sempre numericamente inferiores à argamassa de controlo. Para a resistividade obtida do ensaio de cloretos há uma pequena diferença de resultados por se tratar de um processo de ensaio diferente mas, são valores da mesma ordem de grandeza;
- A área de carbonatação foi superior nas argamassas com SW mas, a argamassa SW5 volta a apresentar um desempenho muito próximo das argamassas de controlo;
- O coeficiente de absorção de água por capilaridade mostrou-se melhor na argamassa SW5, mas com o aumento da percentagem de substituição, as argamassas são mais permeáveis que a argamassa de controlo;
- Do ensaio de resistência à penetração de cloretos, as argamassas com SW mantêm um desempenho negativo sendo, pior na argamassa com maior percentagem de substituição (SW40);

- No ensaio à ASR, ao contrário dos restantes ensaios, as maiores percentagens de SW apresentaram um melhor desempenho e, melhor para SW40 de maior percentagem de SW como substituo do cimento. As observações em MEV vão de encontro a estes valores numéricos com expansões mais significativas nas argamassas CTL e SW5.

Tabela 6.1 – Síntese dos resultados obtidos nos ensaios

Ensaio		Argamassas			
		CTL	SW5 / SW _p	SW20	SW40
Tempo de início de presa		2h37min	2h47min	-	-
NP EN 197-1; NP EN 4220		✓	✓	-	-
Expansibilidade (mm)		2	1	-	-
NP EN 197-1; NP EN 4220		✓	✓		
Trabalhabilidade (mm)		227,3 ± 0,7	226,2 ± 1,0	226,4 ± 2,2	227,3 ± 1,7
Resistência mecânica à flexão (MPa)	7 dias	6,43 ± 0,35	6,40 ± 0,17	5,80 ± 0,17	4,60 ± 0,36
	28 dias	7,15 ± 0,26	7,40 ± 0,12	6,90 ± 0,12	5,20 ± 0,25
	56 dias	7,07 ± 0,31	7,10 ± 0,36	6,80 ± 0,40	5,20 ± 0,25
	56 dias (resistividade)	7,73 ± 0,23	7,60 ± 0,12	6,90 ± 0,12	5,60 ± 0,25
	84 dias	7,50 ± 0,22	7,40 ± 0,36	6,30 ± 0,25	5,20 ± 0,29
Resistência mecânica à compressão (MPa)	7 dias	44,56 ± 1,76	43,90 ± 0,45	35,90 ± 0,77	23,70 ± 0,47
	28 dias	56,05 ± 1,23	54,00 ± 1,38	43,30 ± 0,68	28,00 ± 0,48
	Conformidade com a NP EN 197-1	✓	-	-	-
	56 dias	59,38 ± 1,75	55,88 ± 1,55	44,35 ± 0,75	28,50 ± 0,40
	56 dias (resistividade)	61,09 ± 2,12	57,70 ± 1,38	43,90 ± 1,18	27,95 ± 0,48
	84 dias	62,44 ± 1,30	59,22 ± 1,36	43,83 ± 0,75	27,85 ± 0,67
Índice de atividade aos 28 dias		-	96	77	50
Respeita a norma NP EN 4220		-	(✓)	X	X
Resistividade aos 28 dias (kΩ.cm)		4,08 ± 0,11	3,76 ± 0,07	2,98 ± 0,03	2,31 ± 0,04
Resistividade aos 56 dias (kΩ.cm)		4,28 ± 0,09	3,88 ± 0,07	3,07 ± 0,02	2,51 ± 0,05
Resistividade obtida do ensaio de cloretos aos 56 dias (kΩ.cm)		5,64 ± 0,28	5,00	4,37	3,57

Área de carbonatação (cm ²)	5,48	6,47	8,64	14,77
Coefficiente de absorção por capilaridade (mg/mm ² .min ^{0,5}) em provetes com 56 dias de cura e às 4h30min	0,0473 ± 0,0081	0,0456 ± 0,0056	0,0651 ± 0,0058	0,0830 ± 0,0122
Coefficiente de absorção por capilaridade (mg/mm ² .min ^{0,5}) às 24 h	0,0375 ± 0,0055	0,0365 ± 0,0031	0,0533 ± 0,0043	0,0751 ± 0,0084
Coefficiente de difusão de cloretos (x10 ⁻¹² m ² /s) após 56 dias de cura	10,17 ± 0,15	10,93 ± 0,04	17,38 ± 0,10	28,49 ± 0,03
ASR ao fim de 14 dias em solução NaOH	0,10	0,13	0,09	0,06

Note-se, que o único resultado notoriamente positivo foi o da ASR para as argamassas SW20 e SW40. Assim em situações onde se possa prever a ocorrência de ASR e em que os outros ataques agressivos não se verifiquem, será possível usar SW em percentagens de substituição mais elevadas sugerindo-se da ordem dos 10 a 15 %.

Analisando globalmente os resultados parece evidente que quer do ponto de vista de resistências mecânicas quer de durabilidade as perdas resultantes da utilização de 5 % de SW são marginais. Esta realidade deve-se muito provavelmente ao efeito “fíler” do resíduo que não demonstrou propriedades pozolânicas. Assim o pó de ardósia, resíduo que não sofreu qualquer tratamento prévio, poderá ser utilizado sem desvantagens, como fíler até 5 % de substituição do cimento.

Os requisitos químicos para o fíler segundo a NP EN 12620 (2010) são praticamente respeitados para o SW5 (0,06 % de cloretos que é inferior a 0,10 % ; 0,29 % de sulfatos que é semelhante aos 0,20 %) assim como os requisitos de granulometria (95 %, que está dentro do intervalo 70 a 100 %, de partículas inferiores a 0,063 mm).

Em suma, o trabalho presente permitiu valorizar este resíduo, podendo, nesta realidade, ser considerado como um subproduto.

A figura 6.1 ilustra uma perspectiva geral dos resultados apresentando-se os valores do desempenho das argamassas estudadas.

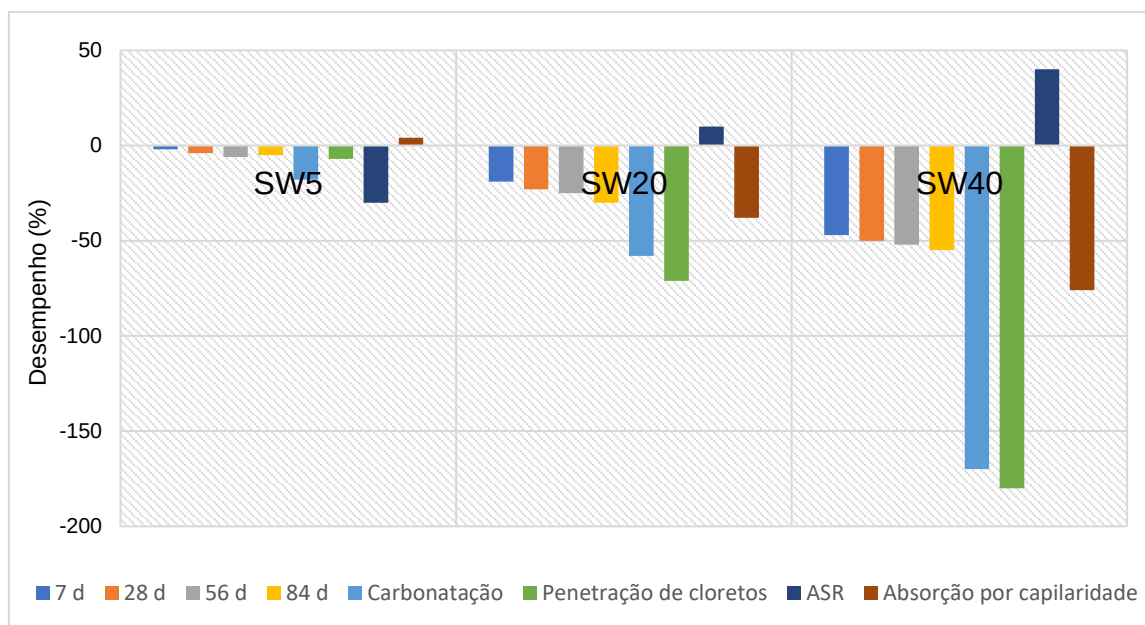


Figura 6.1 – Comparação geral do desempenho das argamassas estudadas

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Por se tratar de um resíduo ainda em início de estudo, dão-se algumas sugestões para possíveis investigações futuras para que seja promovida a economia circular e a ecologia industrial aliadas à sustentabilidade na construção.

Como tal, sugere-se que este estudo seja complementado da seguinte forma:

- Para que se tente evidenciar o possível efeito pozolânico do SW, este seja submetido a uma queima com temperaturas de cerca de 800 °C (valor sugerido com base em conhecimentos relacionados com a queima de xisto betuminoso);
- Prolongar o ensaio de carbonatação para perceber melhor a sua evolução no tempo;
- Completar os ensaios de resistência aos sulfatos para melhor caracterizar o SW;
- Quantificar a percentagem de resíduos de ardósia gerados com dados mais actuais para perceber a sua possível valorização como subproduto;
- Realizar um programa experimental em betão para conhecer o comportamento do betão com SW como substituto parcial do cimento.

REFERÊNCIAS

A

AGÊNCIA PORTUGUESA DO AMBIENTE (2017) – Disponível em: <https://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84&sub2ref=972>

AROSO, Manuel Eduardo Lobão de Sousa (2012) – “Durabilidade dos betões. Degradação dos betões. Causas e efeitos. Reparação e reabilitação dos betões. Controlo e garantia da qualidade dos betões” – Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil. Porto: FEUP.

ASTM C204 (2000) – Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air Permeability Apparatus. West Conshohocken: ASTM International.

ASTM C230/C230M (2014) - Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement. West Conshohocken: ASTM International.

ASTM C490 (2011) – Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete. West Conshohocken: ASTM International.

ASTM C1260 (2014) – Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method). West Conshohocken: ASTM International.

ASTM C1437 (2015) – Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar. West Conshohocken: ASTM International.

ASTM C1567 (2013) – Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method). West Conshohocken: ASTM International.

B

BALLOU, Ronald H. (1999) – “Business logistics management planning, organizing, and controlling the supply chain”. Instructor’s Manual. Prentice Hall.

BERNAL, Susan A., Erich D. Rodríguez, Ana Paula Kirchheim e John L. Provis. 2016. "Management and valorisation of wastes through use in producing alkali-activated cement materials". Journal of Chemical Technology & Biotechnology no. 91 (9):2365-2388. <http://dx.doi.org/10.1002/jctb.4927>.

C

CIMPOR (2011) – Relatório de Sustentabilidade 2011. Disponível em: http://www.cimpor.pt/listagem.aspx?caso=NOTICIAS&lang=pt&id_class=77&name=Relatorios-e-Publicacoes.

COUTINHO, Agostinho de Sousa “*Fabrico e Propriedades do Betão*”, vol. I, LNEC, 1997.

COUTINHO, Agostinho de Sousa “*Fabrico e Propriedades do Betão*”, vol. II, LNEC, 1988.

- COUTINHO A. S. e GONÇALVES A., “*Fabrico e Propriedades do Betão*”, vol. III, LNEC, 1988.
- COUTINHO, Joana Sousa (1999) – *Materiais de Construção 1 - “Agregados para argamassas e betões”*. Porto: Edições DEC-FEUP
- COUTINHO, Joana Sousa (2002) -*Materiais de Construção 2 – Ligantes*. Porto: Acessível na FEUP – Atualizado em 2015.
- COUTINHO, Joana Sousa (2005) – “*Melhoria da Durabilidade dos Betões por Tratamento da Cofragem*”. Porto: FEUP edições. ISBN 9727520731.
- COUTINHO, Joana Sousa (2011) – *Betões eco-eficientes com resíduos*. In 1as Jornadas de Materiais de Construção. Porto: 2011. FEUP
- COUTINHO, Joana Sousa (2014) – *Texto de apoio à unidade curricular de Construções com Novos Materiais*. Porto: Acessível na FEUP.
- CUNHA, Ana Isabel Trigo da (2013) – *Estudo da possibilidade de utilização de resíduos em materiais cimentícios – Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil*. Porto: FEUP.

D

- DOMINGOS, Rúben Samuel da Silva (2014) – “*Contribuição para o conhecimento da fauna do devónico do anticlinal de Valongo (norte de Portugal)*”. Universidade de Évora.

E

- E-64 (1979) – *Determinação da massa volúmica*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).
- E-391 (1993) – *Determinação da resistência à carbonatação*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).
- E-393 (1993) – *Determinação da absorção de água por capilaridade*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).
- E-461 (2007) – *Metodologias para prevenir reações expansivas internas*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).
- E-462 (2004) – *Resistência dos cimentos ao ataque por sulfatos*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).
- E-463 (2004) – *Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).
- E-471 (2009) – *Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).
- EN 196-1 (2016) – *Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength*. Bruxelas: European Committee for Standardization.
- ELV – Empresa de Lousas de Valongo. Disponível em: <http://valongoslate.pai.pt>

EUROSTAT. STATISTICS EXPLAINED – Waste statistics. Disponível em:
http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics

F

FERNANDES, João Pedro Matos (2016) – Conferência sobre o “Financiamento da Economia Circular”. Disponível em:
<http://www.portugal.gov.pt/pt/ministerios/mamb/noticias/20160411-mamb-economia-circular.aspx>

Fichas de caracterização: Anexo IV – Levantamento das Serras do Porto – Levantamento do Património Natural e Cultural

G

GARCIA, Maria da Luz; SOUSA-COUTINHO, Joana (2013) – Strength and durability of cement with forest waste bottom ash. Construction and Building Materials. 41: 897-910. ISSN 0950-0618.

GONÇALVES, Eduardo (2013) - Hidrogeologia das áreas de Valongo, de Paredes e de Arouca, no contexto do Anticlinal de Valongo – Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Geociências. Universidade do Porto.

I

iiSBE Portugal – Iniciativa Internacional para a Sustentabilidade do Ambiente Construído. Disponível em: <http://www.iisbeportugal.org/portugues/portugues.html>

Iniciativa para a Sustentabilidade do Cimento (2012) – Relatório e Monitoramento das Emissões, Versão 2.0.

INE – Instituto Nacional de Estatística. Disponível em:
https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_publicacoes

K

KÁSSIA RODRIGUES, Rafaela de (2015) – “Propostas de aproveitamento de resíduos de ardósia de Pompéu, Minas Gerais” – Revista Intercâmbio no. 6: pág.86-95.

L

LEAL, Ângela Isabel Gonçalves da Costa (2015) – O Impacto da Economia Circular na Cadeia de Valor: O Contexto das Empresas Portuguesas – Dissertação de Mestrado de Marketing e Estratégia. Universidade do Minho.

M

MATOS, Ana Mafalda (2010) – “Estudo de argamassas com substituição parcial do cimento por Resíduos de Vidro moídos” - Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil. Porto: FEUP.

MATOS, Ana Mafalda; SOUSA-COUTINHO, Joana (2012) – “Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement”. *Construction and Building Materials*. 36: 205-215. ISSN 0950-0618.

MOREIRA, Alberto Mário Vasconcelos Tavares (2014) – *Patologias do Betão* – texto de apoio à unidade curricular de Patologias dos Materiais. Porto: Acessível na FEUP.

N

NEVES, José Miguel Marinho (2010) – *Reacção álcalis-sílica e resistência aos sulfatos em betão: ensaios* - Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil. Porto: FEUP.

NEVILLE, Adam (1995) – *Properties of Concrete*. United Kingdom: Longman

NEVILLE, Adam (2004) – "Review article: The confused world of sulfate attack on concrete". *Cement and Concrete Research* no. 34:1275-1296. Disponível em: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=ip,sso,url,uid&db=edselp&AN=S0008884604001620&lang=pt-br&site=eds-live&scope=site&authtype=sso>.

NP 4220 (2015) – *Pozolanas para betão, argamassa e caldas. Definições, requisitos e verificação da conformidade*. Caparica: IPQ.

NP EN 196-2 (2014) – *Métodos de ensaio de cimentos. Parte 2: Análise química dos cimentos*. Caparica: IPQ.

NP EN 196-3 (2017) – *Métodos de ensaio de cimentos. Parte3: Determinação dos tempos de presa e da expansibilidade*. Caparica: IPQ.

NP EN 196-5 (2011) – *Métodos de ensaio de cimentos. Parte 5: Ensaio de pozolanicidade dos cimentos pozolânicos*. Caparica: IPQ.

NP EN 197-1 (2012) – *Cimento. Parte 1: composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes*. Caparica: IPQ.

NP EN 12620:2002 + A1 (2010) – *Agregados para betão*. Caparica: IPQ.

O

OEC – The Observatory of Economic Complexity. Disponível em: <http://atlas.media.mit.edu/en/>

OLIVEIRA, MC de A, E de P Rodrigues e AC Artur (2000) – “Ardósia como Matéria Prima Para Cerâmica” – Comunicação apresentada em Congresso Brasileiro de Cerâmica.

ORÉFICE, RL, HS Mansur e GMX de Carvalho – “Desenvolvimento de compósitos a partir da combinação de polipropileno e resíduos de ardósia”.

P

PAYÁ, J., J. Monzó, MV Borrachero, F. Amahjour, I. Girbés, S. Velázquez e LM Ordóñez. 2002. "Advantages in the use of fly ashes in cements containing pozzolanic combustion residues: silica fume, sewage sludge ash, spent fluidized bed catalyst and rice husk ash". *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* no. 77 (3):331-335. <http://dx.doi.org/10.1002/jctb.583>.

PINTO, Bruno Miguel Pinheiro Soares (2013) – “Cinza de madeira como adição em betão – resistências mecânicas e durabilidade”. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil. Porto: FEUP.

R

RAMOS, Telma, Ana Mafalda Matos, Bruno Schimdt, João Rio e Joana Sousa Coutinho (2013). “Granitic quarry sludge waste in mostar: Effect on strength and durability”. *Construction and Building Materials* no.47:1001-1009.

RECIVALONGO – Disponível em: <http://www.recivalongo.pt/>

REIMER, Ludwig (2013) – “Transmission electron microscopy physics of image formation and microanalysis”. Vol.36: Springer.

ROCHA, Telma Sabina Vieira (2016) – “Resíduos de construção e demolição como substituto parcial do cimento – efeito na durabilidade em materiais cimentícios” - Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil. Porto: FEUP

ROMANO, Pedro e Paulo SD Brito (2012) – “Estudo da degradação de estruturas de betão armado expostas ao ataque por sulfatos”.

S

SALAS, A., M. A. Ospina, S. Delvasto e R. Mejía de Gutierrez. 2007. "Study on the pozzolanic properties of silica obtained from rice husk by chemical and thermal process". *physica status solidi (c)* no. 4 (11):4311-4318. <http://dx.doi.org/10.1002/pssc.200675924>.

SANTOS, Gabriel Barros dos (2008) – Estudo da Durabilidade de Betão Estrutural com Resíduos Industriais” – Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil. Porto: FEUP

SILVA, Ana Filipa Cadima da (2016) – “Resíduos de Mármore e Resíduos de Construção e Demolição no Cimento” – Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil. Porto: FEUP

SILVA, PC, RM Ferreira e H. Figueiras (2012) – “Influência da geometria e da presença de armadura em lajetas de betão na medição de resistividade elétrica”.

SILVA, Goreti Sofia Marques de Sá (2010) – “Durabilidade e Absorção por Capilaridade em Betão” – Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil. Porto: FEUP

T

TOLEDO, Júlia Franca (2016) – “Estudo da reatividade do resíduo de ardósia como adição em matrizes cimentícias”. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2016.

U

UNRIC (2016) – Centro Regional de Informação das Nações Unidas – “Transformar o nosso mundo : Agenda 2030 de Desenvolvimento Sustentável”. EUA (2015). Disponível em: <http://www.unric.org/pt/>

W

WRI (2015) – World Resources Institute. Disponível em: <http://www.wri.org>

ANEXOS

Anexo 1 – Ficha técnica do adjuvante Sika ViscoCrete 3005 (Sika)

Anexo 2 – Ficha técnica do cimento CEM I 42,5 R (fornecida pela SECIL)

Anexo 3 – Boletim de análise da determinação da pozolanicidade

Anexo 4 – Análise química do SW (realizada pelo LNEG)

Ficha de Produto
Edição de Abril de 2011
Nº de identificação: 01.004
Versão nº 1
Sika® ViscoCrete® 3005



Sika® ViscoCrete® 3005

Superplastificante de alto desempenho

Descrição do produto	Sika® ViscoCrete® 3005 é um superplastificante forte redutor de água para betão.
Utilizações	Sika® ViscoCrete® 3005 permite obter uma muito forte plastificação e uma boa manutenção de consistência, aliadas a um desenvolvimento rápido das resistências mecânicas. Sika® ViscoCrete® 3005 é especialmente adequado para os seguintes casos: ■ Betões de Classe igual ou superior a C 30/37, com qualquer consistência, nos quais se pretenda obter uma economia grande de cimento. ■ Betões plásticos com descofragem rápida ou solicitados numa idade curta. ■ Betão muito plástico, fluido ou mesmo autocompactável (BAC) com resistências iniciais melhoradas e com menor custo. ■ Betonagens mais rápidas em época fria. ■ Préfabricação de betão estrutural, em fábrica ou in-situ.
Características/ Vantagens	Sika® ViscoCrete® 3005 actua sobre as partículas do ligante por dois mecanismos principais: adsorção superficial e efeito espacial. Ambos concorrem para um efeito dispersante muito intenso, permitindo uma elevada redução da água de amassadura ou um aumento marcado da trabalhabilidade. A combinação de vários polímeros permite atingir uma eficácia elevada com qualquer tipo de cimento. Consegue-se assim: ■ Um nível de redução de água muito elevado, podendo atingir 20% a 30% conforme a dosagem e a composição; daqui resultam betões com forte aumento de resistências mecânicas, de compacidade elevada e de permeabilidade muito baixa. ■ Um efeito plastificante intenso, permitindo obter, mesmo com forte redução de água, consistências favoráveis para uma colocação fácil. ■ Uma boa manutenção de consistência, que pode atingir as 2 horas a 20°C, dependendo do tipo de cimento, da consistência inicial e da dosagem de adjuvante. ■ Composições adequadas para betão autocompactável (BAC) em prefabricação, com bom desenvolvimento de resistências. ■ Um comportamento mais favorável quanto à retracção e quanto à fluência. Sika® ViscoCrete® 3005 é isento de cloretos ou quaisquer outros ingredientes corrosivos para as armaduras, podendo ser usado sem restrições em betão armado e betão pré-esforçado.
Certificados/ Boletins de Ensaio	Conforme as especificações da norma NP EN 934-2: T3.1/3.2.
Dados do produto	
Aspecto / Cor	Líquido castanho claro, levemente turvo; são possíveis pequenas diferenças de tom, sem influência sobre o desempenho do adjuvante.
Fornecimento	210 kg (200 l); 1.050 kg (1 m ³).



Sika® ViscoCrete® 3005 1/3

Armazenagem e conservação	O produto conserva-se durante 12 meses a partir da data de fabrico, na embalagem original não encetada, a temperaturas entre +5 °C e + 30 °C. Armazenar em local seco e ao abrigo da luz solar directa.
Dados técnicos	
Base química	Solução aquosa de policarboxilatos modificados.
Massa volúmica	1,05 ± 0,02 kg/dm ³ (a +23 ± 2 °C)
pH (23 ± 2 °C)	4,0 ± 1,0.
Teor de sólidos	26,0 ± 1,3%.
Teor em cloretos	≤ 0,1%.
Informação sobre o sistema	
Pormenores de aplicação	
Consumo/ Dosagem	Conforme o objectivo pretendido, recomenda-se partir das seguintes dosagens: ■ Betão facilmente trabalhável: com optimização do teor em cimento: 0,4% a 0,9% do peso do cimento. ■ Betão quase sem vibração e betão autocompactável (BAC): 1,0% a 1,4% do peso do cimento. ■ Betão de consistências S4 ou S5 com os objectivos de combinar optimização do ligante e manutenção de consistência: 1,0% a 1,6% do peso do cimento. ■ Sika® ViscoCrete® 3005, em condições médias, apresenta uma excelente manutenção da consistência. Se for oportuno aumentar a trabalhabilidade, devido a qualquer dificuldade do trabalho em causa, poderá efectuar-se uma redosagem com Sika® ViscoCrete® 3005, desde que o adjuvante seja bem misturado na autobetoneira ou no misturador e desde que não se ultrapasse um total de 1,8%. ■ Dosagens de conformidade com EN 934-2: 0,6% a 0,8% do peso do cimento.
Instruções de aplicação	
Mistura	Se for possível, deverá preparar-se o betão com apenas cerca de $\frac{2}{3}$ da água prevista e adicionar então o adjuvante misturando energicamente cerca de 1 minuto/m³; só então será adicionada mais alguma água até à consistência desejada. Este processo conduz ao aproveitamento máximo do adjuvante e permite controlar convenientemente a razão água/ligante. Se o processo não for viável, então adicionar o produto à água de amassadura previamente determinada e misturar o betão até obter uma mistura homogénea. É importante garantir um tempo mínimo de 1,5 a 2 minutos de amassadura, para obter o efeito pleno do adjuvante. Nunca adicionar o adjuvante ao cimento ou agregados, em seco (redução de eficácia). É possível a adição na autobetoneira desde que seja garantida a uniformidade do betão. No caso de redosagem em obra, deve haver o cuidado de homogeneizar bem o adjuvante na massa do betão. Para isso, recomenda-se uma muito pequena adição de água no recipiente que contém o adjuvante, apenas para reduzir a sua viscosidade e facilitar a sua boa incorporação. O betão deve ser "puxado" acima e o adjuvante deve ser adicionado lentamente, com o tambor a rodar rapidamente; se necessário, inverter o sentido de rotação para ajudar a homogeneização. Tempo de mistura mínimo: 3 minutos.

Aplicação	Sika® ViscoCrete® 3005 permite o fabrico de betão de qualidade, consequentemente devem ser cumpridas as regras de boa prática para o fabrico, a colocação e a cura do betão.
Compatibilidade	Sika® ViscoCrete® 3005 pode ser combinado com os seguintes produtos: ■ Sika® FerroGard® 901. ■ Sika® Pump. ■ Sika® Rapid. ■ Sikacrete®. Recomenda-se sempre a realização de ensaios prévios.
Limpeza de ferramentas	Limpar todas as ferramentas e equipamento com água imediatamente após a utilização. Material curado/endurecido só pode ser removido mecanicamente.
Importante	■ Recomenda-se a realização de ensaios prévios para se encontrar a dosagem óptima do adjuvante e sempre que se altere os componentes do betão ou a própria composição. ■ Com geada intensa o adjuvante pode gelar, porém uma vez descongelado lentamente, agitado cuidadosamente e verificada a homogeneidade, poderá voltar a empregar-se. Para qualquer esclarecimento, consultar o Departamento Técnico Sika.
Nota	Todos os dados técnicos referidos nesta Ficha de Produto são baseados em ensaios laboratoriais. Resultados obtidos noutras condições podem divergir dos apresentados, devido a circunstâncias que não podemos controlar.
Risco e segurança	
Medidas de segurança	Para informações complementares sobre o manuseamento, armazenagem e eliminação de resíduos do produto consultar a respectiva Ficha de Dados de Segurança e o rótulo da embalagem.
	"O produto está seguro na C* Seguros XL Insurance Switzerland (Apólice nºCH00003018L105A), a título de responsabilidade civil do fabricante" A informação e em particular as recomendações relacionadas com aplicação e utilização final dos produtos Sika são fornecidas em boa fé e baseadas no conhecimento e experiência dos produtos sempre que devidamente armazenados, manuseados e aplicados em condições normais, de acordo com as recomendações da Sika. Na prática, as diferenças no estado dos materiais, das superfícies, e das condições de aplicação em obra, são de tal forma imprevisíveis que nenhuma garantia a respeito da comercialização ou aptidão para um fim em particular nem qualquer responsabilidade decorrente de qualquer relacionamento legal poderão ser inferidas desta informação, ou de qualquer recomendação por escrito, ou de qualquer outra recomendação dada. O produto deve ser ensaiado para aferir a adequabilidade do mesmo à aplicação e fins pretendidos. Os direitos de propriedade de terceiros deverão ser observados. Todas as encomendas aceites estão sujeitas às nossas condições de venda e de entrega vigentes. Os utilizadores deverão sempre consultar a versão mais recente da nossa Ficha de Produto específica do produto a que diz respeito, que será entregue sempre que solicitada.
Marcação CE	A Norma Europeia EN 934-2:2003 "Adjuvantes para betão, argamassa e caldas de injeção. Parte 2: Adjuvantes para betão. Definições, requisitos, conformidade, marcação e rotulagem" especifica as definições e os requisitos dos adjuvantes para uso no betão. Abrange adjuvantes para betão simples, armado e pré-esforçados usados no betão fabricado no local da obra, no betão pronto e no betão fabricado em centrais de produção de elementos prefabricados. Nesta norma os requisitos de desempenho aplicam-se a adjuvantes usados no betão de consistência normal. Eles podem não ser aplicáveis a adjuvantes para outros tipos de betão tais como betões meio secos e de consistência terra húmida.



Sika Portugal, SA
R. de Santarém, 113
4400-292 V. N. Gaia
Portugal
Tel. +351 22 377 69 00
Fax +351 22 370 20 12
www.sika.pt



Sika® ViscoCrete® 3005 3/3



RESULTADOS DO AUTOCONTROLO

AUTOCONTROL RESULTS | RÉSULTATS DE L'AUTOCONTRÔLE

VALORES MÉDIOS

AVERAGE RESULTS | RÉSULTATS MOYENNE

REFERÊNCIA **Cimento Portland - EN 197-1 CEM I 42,5 R**
REFERENCE **Portland Cement | Ciment Portland**

BOLETIM Nº **ACM-049/2016**
REPORT N. | RAPPORT N.

FÁBRICA **Maceira-Liz**
PLANT | USINE

DATA **16-12-2016**
DATE

MÊS **Outubro 2016**
MONTH | MOIS **October | Octobre**

ENSAIOS MECÂNICOS

MECHANICAL TESTS | ESSAIS MECANQUES [NP EN 196-1]

IDADE AGE	Resistência à Flexão (MPa) Flexural Strength Résistance à la Flexion		Resistência à Compressão (MPa) Compressive Strength Résistance à la Compression	
	MÊS MONTH MOIS	ANO YEAR AN	MÊS MONTH MOIS	ANO YEAR AN
2 dias days jours	5.6	5.5	30.8	31.2
7 dias days jours	7.5	7.6	45.8	48.1
28 dias days jours	8.8	8.6	55.9	58.8

ENSAIOS FÍSICOS

PHYSICAL TESTS | ESSAIS PHYSIQUES

	MÊS MONTH MOIS	ANO YEAR AN
Peso Específico (g/cm³) Specific weight Masse volumique	3.12	3.12
Resíduo de Peneiração (%) Sieve Residue Résidu de Tamisage [NP EN 196-6]	45 µm 32 µm	5.31 9.20
Superfície Específica de Blaine (cm²/g) Blaine Spec. Surface Surface spécifique Blaine [NP EN 196-6]	3508	3729
Água na Pasta Normal (%) Water demand Eau de Gâchage [NP EN 196-3]	27.9	28.3
Tempo de Pressa (min) Setting Time Temps de Prise [NP EN 196-3]	Início Initial Debut Fim Final Fin	173 179 226 269
Expansibilidade (mm) Soundness Expansion [NP EN 196-3]	0.7	0.7
Índice de Reflectância - Y (0 a 100) Reflectance Réflectance	26	28

INFORMAÇÃO ADICIONAL

ADDITIONAL INFORMATION | INFORMATION SUPPLÉMENTAIRE

ANÁLISE QUÍMICA

CHEMICAL ANALYSIS | ANALYSES CHIMIQUES

	MÊS MONTH MOIS	ANO YEAR AN
Perda ao Fogo (%) Loss on Ignition Perte au Feu	-	2.05
Resíduo Insolúvel (%) Insoluble Residue Résidu Insoluble	-	0.90
Óxido de Silício (%) Silicon Oxide Oxyde de Silicium	SiO ₂	20.55
Óxido de Alumínio (%) Aluminium Oxide Oxyde de Aluminium	Al ₂ O ₃	4.27
Óxido de Ferro (%) Ferric Oxide Oxyde de Fer	Fe ₂ O ₃	3.20
Óxido de Cálcio (%) Calcium Oxide Oxyde de Calcium	CaO	63.40
Óxido de Magnésio (%) Magnesium Oxide Oxyde de Magnésium	MgO	1.75
Sulfatos (%) Sulfates Sulfates	SO ₃	3.05
Óxido de Potássio (%) Potassium Oxide Oxyde de Potassium	K ₂ O	0.77
Óxido de Sódio (%) Sodium Oxide Oxyde de Sodium	Na ₂ O	0.23
Clorretos (%) Chloride Chlorures [NP EN 196-2]	Cl ⁻	0.07
Cal Livre (%) Free Lime Chaux Libre		
Índice da Saturação em Cal Lime Saturation Factor Depot de Chaux		
Índice Silicioso Silica Ratio Indice Silicieux		
Índice Aluminoso Alumina-iron Ratio Indice Alumineux		

COMPOSIÇÃO POTENCIAL DE BOGUE

BOGUE'S COMPOSITION | COMPOSITION POTENCIAL DE BOGUE

Silicato Tricálcico (%) Tricalcium Silicate Silicate Tricalcique	C ₃ S DR _x	62.2	61.5
Silicato Bicálcico (%) Dicalcium Silicate Silicate Bicalcique	C ₂ S DR _x	12.6	12.5
Aluminato Tricálcico (%) Tricalcium Aluminate Aluminate Tricalcique	C ₃ A		
Ferro-aluminato Tetracálcico (%) Tetracalcium Aluminoferrite Ferualuminate Tetracalcique	C ₄ AF		

APROVADO

APPROVED | APPROVÉ

ANO | YEAR | AN : Últimos 12 meses. Last 12 months. Dernier 12 mois.
NOTA | NOTE : Os parâmetros são determinados por métodos internos com excepção dos que indicam a [norma aplicada]. The parameters are determined by internal methods, except when a [standard] is indicated. Les paramètres sont déterminés par méthodes internes, except leurs que indique la [norme appliquée].

Homologado por : GQAE

Pág. 1/1
PG 00 12/02



BOLETIM DE ANÁLISE 05/17

REQUERENTE: A/C Patrícia Pereira

Orientador: Professora Joana de Sousa Coutinho

Nome: Ana Filipa Leal

Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção – LEMC

Universidade do Porto – Faculdade de Engenharia

NATUREZA DO ENSAIO: Determinação da pozolanicidade em uma amostra de cimento.

MATERIAL APRESENTADO PARA ENSAIO: 1 saco de plástico hermeticamente fechado contendo a amostra que deu entrada no laboratório a 07/03/2017.

RESULTADOS DA ANÁLISE:

Parâmetros	Ref ^a amostra: SWs
Iões hidroxilos OH ⁻ (mmol/L)	64,4
Óxido de cálcio CaO (mmol/L)	9,3

De acordo com a Norma Portuguesa EN 196-5 este cimento não satisfaz o ensaio da pozolanicidade, porque o ponto se situa acima da curva de concentração de saturação em ião cálcio.

Porto, 27 de março de 2017

Técnica analista

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Liliana Pereira'.

(Liliana Pereira)

Responsável pela análise

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Cidália Botelho'.

(Doutora Cidália Botelho)



BOLETIM DE ANÁLISE 08/17

REQUERENTE: A/C Patrícia Pereira

Orientador: Professora Joana de Sousa Coutinho

Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção – LEMC

Universidade do Porto – Faculdade de Engenharia

NATUREZA DO ENSAIO: Determinação da pozolanicidade em uma amostra de cimento.

MATERIAL APRESENTADO PARA ENSAIO: 1 saco de plástico hermeticamente fechado contendo a amostra que deu entrada no laboratório a 30/03/2017.

RESULTADOS DA ANÁLISE:

Parâmetros	Refª amostra: SW20
Iões hidroxilos OH^- (mmol/L)	61,5
Óxido de cálcio CaO (mmol/L)	10,6

De acordo com a Norma Portuguesa EN 196-5 este cimento não satisfaz o ensaio da pozolanicidade, porque o ponto se situa acima da curva de concentração de saturação em ião cálcio.

Porto, 19 de abril de 2017

Técnica analista

Liliana Pereira

(Liliana Pereira)

Responsável pela análise

Cidália Botelho

(Doutora Cidália Botelho)



UNIDADE DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
MINERAL - LABORATÓRIO

BOLETIM DE ANÁLISE

Boletim nº 09/FRX/2017
Página nº 1 de 1
Nº Ordem Lab. 32/2017

Amostras 1 Amostra com referência: SW (Cimento)
A amostragem é da responsabilidade do requerente

Requerente FEUP-DEC Joana Sousa Coutinho
Endereço FEUP – Rua Dr. Roberto Frias S/nº – 4200-465 PORTO
Req. PAD 148/1383/C17

Estudo Solicitado Análise de Elementos Maiores

Método Instrumental Dosagem de elementos Maiores/Fluorescência de Raios-X
Metodologia Método Interno - PA 003/FRX (2010-10-15)

Sector: Fluorescência de Raios-X
Data de Início da Análise: 22-03-2017
Registo: 57 FRX
Data de Conclusão da Análise: 29-03-2017

(Resultados dados em %)

Elementos	SW
SiO ₂	52,34
Al ₂ O ₃	24,77
Fe total (Fe ₂ O ₃)	9,25
MnO	0,08
CaO	0,45
MgO	2,15
Na ₂ O	1,10
K ₂ O	3,29
TiO ₂	1,11
P ₂ O ₅	0,19
P. Rubro	5,01

S. Mamede de Infesta, 31 de Março de 2017

O Responsável Técnico do Sector de FRX,

Rogério Calvo

Rogério Calvo
(Eng.º Químico)

Rua da Amieira, Apartado 1089
4466-901 S. MAMEDE DE INFESTA - Portugal
Tel: +351 226 400 000
Fax: +351 226 514 040
www.lneg.pt

Este Boletim não pode ser parcialmente reproduzido sem autorização por escrito dada pela Direcção da UCTM-Lab. Os resultados referem-se exclusivamente às amostras recebidas e ensaiadas. Qualquer extrapolação é da exclusiva responsabilidade do requerente.

Colecção 2010
Mod. nº 013

19JUN2015



UNIDADE DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
MINERAL - LABORATÓRIO

BOLETIM DE ANÁLISE

Boletim nº 10/FRX/2017
Página nº 1 de 1
Nº Ordem Lab. 32/2017

Amostras 1 Amostra com referência: SW (Cimento)
A amostragem é da responsabilidade do requerente

Requerente FEUP-DEC Joana Sousa Coutinho
Endereço FEUP – Rua Dr. Roberto Frias S/nº – 4200-465 PORTO

Estudo Solicitado Determinação do teor de SO₃. **Req. PAD I48/1383/C17**

Método Instrumental Análise Semi - Quantitativa/ Fluorescência de Raios-X
Metodologia Método Interno - PA 004/FRX (2010-10-15)

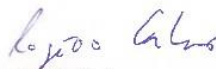
Sector: Fluorescência de Raios-X **Registo: 57 FRX**
Data de Início da Análise: 22-03-2017 **Data de Conclusão da Análise: 27-03-2017**

Análise Semi- Quantitativa

Refª amostra	SO ₃ (%)
SW	0,29

S. Mamede de Infesta, 31 de Março de 2017

O Responsável Técnico do Sector de FRX,


Rogério Calvo
(Eng.º Químico)

Rua da Amália, Apartado 1289
4464-901 S. MAMEDE DE INFESTA - Portugal
Tel: +351 220 400 090
Fax: +351 229 514 040
www.lneg.pt

Este Boletim não pode ser parcialmente reproduzido sem autorização por escrito dada pela Direcção da UCTM-Lab.
Os resultados referem-se exclusivamente às amostras recebidas e ensaiadas. Qualquer extrapolação é da exclusiva responsabilidade do requerente.

Colecção 2010
Mod. nº 013

19JUN2015



UNIDADE DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
MINERAL - LABORATÓRIO

BOLETIM DE ANÁLISE

Boletim nº 07/AA/2017
Página nº 1 de 1
Nº Ordem Lab. 32/2017

Amostras Amostra de Cimento (?)
A amostragem é da responsabilidade do requerente

Requerente FEUP - DEC - Joana Sousa Coutinho
Endereço Rua Dr. Roberto Frias S/nº - 4200-465 PORTO

Req. PAD
148/1383/C17

Estudo Solicitado Análise de Cloretos solúveis em HNO_3

Método Instrumental Argentometria
Metodologia PA002QC

Sector: ABSORÇÃO ATÓMICA
Data de Início da Análise: 23/ 03/ 17

Registo:
Data de Conclusão da Análise: 23/ 03/ 17

AMOSTRA	mg/kg Cl
SW	< 270

NOTA: Ensaio realizado em duplicado. Método controlado com o MRC DR-N.

$$270 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{kg}} = 0.000270$$

$$= 0.027\%$$

S. MAMEDE DE INFESTA, 23 de Março de 2017

O Investigador Auxiliar

(Dr.ª Maria Adelaide Ferreira)

Rua da Amieira, Apartado 1089
4466-901 S. MAMEDE DE INFESTA - Portugal
Tel: +351 229 468 000
Fax: +351 229 514 040
www.lneg.pt

Este Boletim não pode ser parcialmente reproduzido sem autorização por escrito dada pela Direcção da UCTM-Lab. Os resultados referem-se exclusivamente às amostras recebidas e ensaiadas. Qualquer extrapolação é da exclusiva responsabilidade do requerente.

Colecção 2010
Mod. nº 013

19JUN2015